

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Sonido
2. **TÍTULO:** MÉTODO DE AURALIZACIÓN ORIENTADO A LA IMPLEMENTACION DE TEORÍA ACÚSTICA DE PREFERENCIA SUBJETIVA EN SALAS DE CONCIERTO
3. **AUTORES:** Diego Eustacio Cárdenas Uribe, Iván Fernando Correa Galvis
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C.
5. **FECHA:** Noviembre de 2011
6. **PALABRAS CLAVE:** Acústica Virtual, Psicoacústica, Auralización, Simulación Acústica, Prueba Psicométrica, Acústica de Salas, Salas de Concierto.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo de la investigación fue analizar la acústica de una sala de conciertos por medio de pruebas psicométricas de preferencia en una sala de pruebas de escucha, a través de simulaciones de campos sonoros obtenidos por procesos de convolución, los cuales involucran respuestas impulsivas obtenidas por medio de mediciones binaurales en diferentes ubicaciones en el área de audiencia. En el documento se presentan todos los métodos procedimentales de medición de parámetros acústicos de la sala de estudios y sala de aplicación del test de preferencia (junto con el acondicionamiento acústico aplicado. De igual forma, se muestra todo el tratamiento realizado a las mediciones realizadas por medio de procesamiento digital de señales, así como el tratamiento estadístico del Test de Preferencia.
8. **LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Línea de Investigación USB: Tecnologías Actuales y Sociedad. Línea de Investigación de Facultad: Análisis y Procesamiento de Señales. Campo temático: Acústica y Audio.
9. **FUENTES CONSULTADAS:** Carrión, A. *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 1998. Beranek, L.L. *'Concert hallas and opera houses: music, acoustics, and architecture'* Segunda Edición. Editorial Springer-Verlag New York Inc. 2004. M. Kleiner, B-I. Dalenbäck, y P. Svensson. *Auralization: An overview*. Journal of the Audio Engineering Society. 1983. Segura, J, et al. *Sistemas de auralización y sonido 3D para su aplicación en entornos virtuales de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico*. En: Jornadas de acústica Tecniacústica (2010: Cádiz, España). Kirkeby, O., Nelson, P., Hamada, H. *The 'Stereo Dipole' – Binaural Sound Reproduction Using Two Closely Spaced Loudspeakers*. En: AES 102nd Convention. Munich, Germany, 1997. Sato, S. *Theory of subjective preference for sound fields in concert halls: Process and application*. En: 2do Congreso Internacional de Acústica UNTREF (2010: Buenos Aires, Argentina). Sato, S. *Auralization and visualization for seat selection system of concert halls and theaters*. En: 2do Congreso Internacional de Acústica UNTREF (2010: Buenos Aires, Argentina). Ando, Y. *Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo*. En: Journal of the Acoustical Society of America 1983. Ando, Y., Imamura, M. *Subjective preference test for sound fields in concert halls simulated by the aid of a computer*. En: Journal of Sound and Vibration. Fujii, et al. *Spacial Distribution of Acoustical Parameters in Concert Halls: Comparison of Different Scattered Reflections*. Journal of Temporal Design in Architecture and the Enviroment, 2004. Farina, A. et al. *Listening Tests Performed Inside a Virtual Room Acoustic Simulator*. En: I seminario Música Ciência e Tecnologia 'Acústica Musical'. São Paulo do Brasil, 3-5 November 2004.

10. **CONTENIDOS:** Mediciones de parámetros acústicos fueron realizadas en una sala de conciertos, con el fin de obtener respuestas impulsivas binaurales (utilizando un *dummy-head*) en las distintas ubicaciones de audiencia. Por medio de procesos de convolución y muestras de música anecoica, fue posible obtener simulaciones de campos sonoros para cada ubicación. Las respuestas impulsivas binaurales obtenidas fueron analizadas respecto a cuatro parámetros acústicos principales: *Tiempo de Reverberación (T60)*, *Sonoridad (G)*, *Initial Time Delay Gap (ITDG)* y *Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural (IACC)*. Una prueba psicométrica de comparación de pares, implementada mediante una prueba de escucha realizada en una sala con características acústicas específicas y un sistema de reproducción Stereo Dipole, fue aplicada con el fin de analizar el nivel de preferencia subjetiva de los sujetos respecto a los campos sonoros simulados y sus respectivos parámetros acústicos. El *tiempo de reverberación medio* obtenido en las mediciones fue considerado no apropiado para el tipo de sala y el tipo de música interpretada en la misma, ya que excede en aproximadamente 1.0s el valor recomendado. Según los resultados de la prueba psicométrica, los cuales fueron analizados mediante la Ley de Juicio Comparativo, los sujetos prefieren estar en presencia de un alto Tiempo de Reverberación. De igual forma, los campos sonoros correspondientes a ubicaciones con mayor presencia de campo directo presentaron un alto nivel de preferencia.
11. **METODOLOGÍA:** Empírico-Analítico, ya que ésta se centra específicamente en la información que brindarán mediciones acústicas realizadas de forma *in situ* en un recinto, y de pruebas psicológicas hechas con una muestra poblacional determinada. A toda esta información se le dará un uso netamente técnico y una interpretación desde el punto de vista de la acústica arquitectónica y la psicoacústica.
12. **CONCLUSIONES:** La Teoría de Preferencia Subjetiva es aplicable a Salas de Concierto en Colombia. La técnica de auralización utilizada permitió realizar una simulación adecuada de fuentes virtuales en la sala estudiada, donde fue posible para los sujetos distinguir las ubicaciones en las áreas de audiencia simuladas mediante campos sonoros reproducidos en la sala de pruebas de escucha. La Sala de Conciertos de la Biblioteca Luis Ángel Arango requiere un riguroso acondicionamiento acústico interior, debido al excesivo tiempo de reverberación obtenido en las mediciones de parámetros acústicos. Es necesario realizar un control de absorción en las superficies presentes, con el fin de controlar dicho fenómeno de reverberación, así como el volumen acústico de la sala. El Control Room del Estudio C de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, recinto utilizado para la aplicación del Test de Preferencia, es un recinto apto para la realización de pruebas de escucha mediante auralización. El acondicionamiento acústico implementado, y el equipamiento de audio instalado en el mismo, permitió obtener condiciones óptimas para la reproducción de campos sonoros y fuentes virtuales simulados mediante procesos de convolución y cancelación *cross-talk*.

MÉTODO DE AURALIZACIÓN ORIENTADO A LA IMPLEMENTACIÓN
DE TEORÍA ACÚSTICA DE PREFERENCIA SUBJETIVA EN SALAS DE
CONCIERTO

DIEGO EUSTACIO CÁRDENAS URIBE
IVÁN FERNANDO CORREA GALVIS

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ, D.C.
2011

MÉTODO DE AURALIZACIÓN ORIENTADO A LA IMPLEMENTACIÓN
DE TEORÍA ACÚSTICA DE PREFERENCIA SUBJETIVA EN SALAS DE
CONCIERTO

DIEGO EUSTACIO CÁRDENAS URIBE
IVÁN FERNANDO CORREA GALVIS

Proyecto de Grado

Tutor:
Ing. Luis Fernando Hermida Cadena

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ, D.C.
2011

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, D.C. 21 de Noviembre de 2011

DEDICATORIA

Al Ingeniero Francisco Ruffa, de quien surgió la idea original de todo el proyecto. Por brindarnos incondicionalmente toda su experiencia, apoyo e inmenso conocimiento, y ser la piedra angular de la acústica en Ingeniería de Sonido de la Universidad de San Buenaventura.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Yoshiharu Soeta, y al Dr. Shin-ichi Sato, por ser los principales guías de este proyecto, por su acompañamiento incondicional, su conocimiento y la inmensa humildad y pasión por la ciencia que nos transmitieron a lo largo de un año y medio de investigación.

A Mauricio Peña y Susana Palacios, de la Sección Cultural del Banco de la República, por abrirnos las puertas de la Sala de Conciertos de la Biblioteca Luis Ángel Arango, por brindarnos toda la atención y apoyo necesario, y por su gran interés y fe en el proyecto.

Al Dr. Carlos Gantiva, de la Facultad de Psicología de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, por aportar su conocimiento para el desarrollo del proyecto, por su gran interés en el proyecto y disposición.

A todos nuestros compañeros que nos acompañaron en el camino, y brindaron su apoyo en momentos difíciles, especialmente a quienes hicieron parte del Test de Preferencia. A la unidad de Laboratorios de Ingeniería de Sonido, por estar siempre dispuestos a brindarnos todas las herramientas y apoyo necesario.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.1 ANTECEDENTES	20
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.3 JUSTIFICACIÓN	24
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 Objetivo General	24
1.4.2 Objetivos Específicos	25
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	25
1.5.1 Alcances	25
1.5.2 Limitaciones	26
2. MARCO DE REFERENCIA	27
2.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL	27
2.1.1 Acústica de Salas	27
2.1.1.1 Reverberación	27
2.1.1.2 Tiempo de Reverberación	27
2.1.1.3 Calidez y Brillo: Parámetros acústicos subjetivos	29
2.1.1.4 Early Decay Time (EDT)	30
2.1.1.5 Sonoridad (G)	31

2.1.1.6 Initial-Time-Delay Gap (ITDG)	32
2.1.1.7 Claridad Musical (C80)	32
2.1.1.8 Ancho Aparente de la fuente (ASW)	33
2.1.1.9 Eficiencia Lateral (LF)	34
2.1.1.10 Correlación cruzada interaural (IACC)	34
2.1.1.11 Nivel de Ruido: Curvas NC	35
2.1.2 Análisis y procesamiento de señales	37
2.1.2.1 Señal	37
2.1.2.2 Representación de señales	37
2.1.2.3 Clasificación de señales	37
2.1.2.4 Sistema	38
2.1.2.5 Sistemas Lineales e Invariantes en el tiempo	39
2.1.2.6 Función ‘Delta de Dirac’ o función ‘impulso unitario’	40
2.1.2.7 Respuesta al Impulso	41
2.1.3 Acústica Virtual	41
2.1.3.1 Respuesta impulsiva de un recinto (RIR)	41
2.1.3.2 Respuesta Impulsiva Binaural	42
2.1.3.3 Simuladores Cabeza-Torso (Dummy-Head)	43
2.1.3.4 Auralización	44
2.1.3.5 Efecto <i>Cross-talk</i> y Sistema de Reproducción ‘Stereo Dipole’	45
2.1.3.6 Auralización con Aurora Plugins	48
2.1.3.7 Teoría de Preferencia Subjetiva: Proceso y Aplicación	49

2.1.4 Ley de Juicio Comparativo: Análisis por Escalamiento Lineal de Thurstone	53
2.2 MARCO LEGAL Y NORMATIVO	53
2.2.1 Norma ISO 3382: Acústica – Medición del tiempo de reverberación de salas con referencia a otros parámetros acústicos	53
2.2.2 Norma IRAM 4070: Ruidos – Procedimiento para su evaluación utilizando los perfiles ‘NC’ y ‘RC’	54
2.2.4 Norma NTC 1486: Documentación – Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación	54
3. METODOLOGÍA	55
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	55
3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN USB/SUB-LÍNEA DE FACULTAD/CAMPO TEMÁTICO	55
3.1.1 Línea de Investigación	55
3.1.2 Línea de Investigación de Facultad	55
3.1.3 Núcleos Problémicos	55
3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	56
3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA	56
3.5 HIPÓTESIS	56
3.6 VARIABLES	57
3.6.1 Variables Independientes	57
3.6.2 Variables Dependientes	57
3.7 SALA DE CONCIERTOS DE LA BIBLIOTECA LUIS ANGEL ARANGO, BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA	57
3.7.1 Características del diseño arquitectónico	57

3.8 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS	58
3.8.1 Levantamiento arquitectónico	59
3.8.2 Instrumental de medición	59
3.8.3 Metodología de medición	59
3.9 MEDICIÓN BINAURAL ORIENTADA A IMPLEMENTACIÓN DE PREFERENCIA SUBJETIVA	60
3.9.1 Instrumental de medición	61
3.9.2 Metodología de medición	61
3.10 SOFTWARE	62
3.10.1 EASERA 1.0	62
3.10.2 dBFA Suite	62
3.10.3 Adobe Audition - Versión 3.0	63
3.10.4 Aurora Plugins - Versión 4.0	63
3.10.5 Muestras de Música Anecoica	63
3.10.6 Mathworks MATLAB	64
3.11 SALA DE PRUEBAS DE ESCUCHA	64
3.11.1 Diseño Experimental: Medición de Parámetros Acústicos	65
3.11.2 Configuración 'Stereo Dipole': Sistema de Reproducción	66
3.12 TEST DE PREFERENCIA SUBJETIVA	67
3.12.1 Muestreo	67
3.12.2 Metodología del Test	69

4. DESARROLLO INGENIERIL	70
4.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN SALA DE CONCIERTOS BIBLIOTECA LUIS ÁNGEL ARANGO	70
4.1.1 Levantamiento arquitectónico y análisis de materiales	70
4.1.2 Medición de <i>tiempo de reverberación</i>	74
4.1.3 Simulación acústica de la sala	78
4.2 MEDICIONES BINAURALES ÁREAS DE AUDIENCIA	81
4.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN SALA DE ESCUCHA	85
4.4 CALIBRACIÓN DE SISTEMA DE REPRODUCCIÓN STEREO DIPOLE	89
4.5 SIMULACIÓN DE CAMPOS SONOROS	92
4.5.1 Discriminación de respuestas impulsivas	92
4.5.2 Procesos de Convolución y Cancelación Cross-talk	95
4.6 TEST DE PREFERENCIA SUBJETIVA	98
4.6.1 Diseño del test	98
4.6.2 Aspectos éticos y procedimentales	99
4.6.1 Aplicación del test	100
5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	102
5.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN SALA DE CONCIERTOS BIBLIOTECA LUIS ANGEL ARANGO	102
5.1.1 Comparación de tiempo de reverberación medido con valores óptimos recomendados	104
5.2 NIVEL DE RUIDO EN SALA DE CONCIERTOS BIBLIOTECA LUIS ANGEL ARANGO	106
5.3 TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN SALA DE ESCUCHA	107

5.4 TEST DE PREFERENCIA SUBJETIVA	108
5.4.1 Aplicación de Ley de Juicio Comparativo (Escalamiento Lineal de Thurstone)	108
5.4.2 Mapa de Preferencia	112
5.4.3 Software de aplicación de Test de Preferencia	114
6. CONCLUSIONES	115
7. RECOMENDACIONES	116
8. BIBLIOGRAFÍA	117
GLOSARIO	120
ANEXOS	122

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores recomendados de RT_{mid} para salas de concierto según tipo de música

Tabla 2. Valores medios de $1-IACC_{E3}$ correspondientes con categorías de salas desde punto de vista acústico

Tabla 3. Valores recomendados de nivel de ruido según Curva NC

Tabla 4. Cuatro factores ortogonales de un campo sonoro, y sus respectivos coeficientes α_i

Tabla 5. Valores de Subjective Limen (JND) de parámetros acústicos

Tabla 6. Valores de RT y G para respuestas binaurales

Tabla 8. Valores obtenidos de *parámetros acústicos*

Tabla 9. Comparación de RT_{mid} obtenido con valores recomendados

Tabla 10. Valores de parámetros subjetivos

Tabla 11. Matriz de Frecuencias Acumuladas

Tabla 12. Tabla Ordenada de Frecuencias Acumuladas

Tabla 13. Matriz de Proporciones

Tabla 14. Matriz de puntuaciones típicas (z)

Tabla 15. Matriz de diferencias

Tabla 16. Valores en escala lineal

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala.

Figura 2. Relación entre EDT y RT60

Figura 3. Valores categorizados medios de $1-IACC_{E3}$ en salas

Figura 4. Diagrama de Curvas NC

Figura 5. Dominios de la RIR

Figura 6. *Dummy-head* Brüel & Kjaer Type 4128

Figura 7. Diagrama geométrico de arreglo de reproducción altavoz/micrófono

Figura 8. Diagrama de arreglo de reproducción altavoz/micrófono con filtrado

Figura 9. Diagrama de procesos de Aurora Plugins

Figura 10. Vistas de la Sala de Conciertos

Figura 11. Fotografía del escenario central

Figura 12. Diagrama. Medición de tiempo de reverberación

Figura 13. Diagrama. Medición de parámetros binaurales

Figura 15. Fotografía *control room* Estudio C USB

Figura 16. Diagrama. Medición de *tiempo de reverberación* en control room

Figura 17. Reproducción sonora con sistema Stereo Dipole

Figura 18. Vista general del escenario principal.

Figura 19. Vista general del escenario principal

Figura 20. Alfombra instalada en piso de la Sala

Figura 21. Escaleras laterales de escenario principal

Figura 22. Muro lateral de Sala de Conciertos

Figura 24. Área de audiencia central

Figura 25. Puntos de medición de ruido de fondo

Figura 26. Medición de ruido de fondo

Figura 27. Posiciones de fuente para medición de RT60

Figura 28. Posiciones de fuente para medición de RT60

Figura 29. Captura de impulsos en Posición C

Figura 30. Posición de Fuente 2

Figura 31. Vista 3D de la sala en software EASE

Figura 32. Vista de escenario principal en software EASE

Figura 33. Comportamiento de absorción para *Madera Parquet*

Figura 34. Comportamiento de absorción para *Madera Parquet*

Figura 35. *Dummy-head* 01dB-Metravib

Figura 36. Medición binaural con dummy-head 01dB-Metravib

Figura 37. Equipamiento de medición binaural

Figura 38. Medición en tiempo real en software dBfa

Figura 39. Captura de respuesta impulsiva en dBfa

Figura 40. Base de datos de medición en software dBfa

Figura 41. Archivo de audio final de respuesta impulsiva binaural

Figura 42. Instalación de paneles absorbentes

Figura 43. Instalación de alfombra en Estudio C

Figura 44. Paneles absorbentes en sistema Stereo Dipole

Figura 45. Posiciones de fuente para medición de RT60 en *control room*

Figura 46. Posiciones de micrófono en Punto A

Figura 47. Diagrama de medición de RT60

Figura 48. Sistema Stereo Dipole

Figura 49. Diagrama de reproducción de campos sonoros

Figura 50. Diagrama de calibración

Figura 51. Interfaz gráfica de Smaart en calibración de sistema

Figura 52. Mapa de ubicaciones de respuestas impulsivas

Figura 53. Ventana de edición Adobe Audition

Figura 54. Muestra de música anecoica en Audition

Figura 55. Ventana del plugin *Convolve with Clipboard*

Figura 56. Simulación de campo sonoro en sala de conciertos mediante Aurora

Figura 57. Pares de comparación para Test de Preferencia

Figura 58. Aplicación de Prueba de Escucha

Figura 59. Software Pro Tools HD en Prueba de Escucha

Figura 60. Resultados de *parámetros acústicos* para punto A

Figura 61. Gráfica de comportamiento del *tiempo de reverberación*

Figura 62. Gráfica de *tiempo de reverberación, EDT, T20 y T30*

Figura 63. Resultados de medición de ruido de fondo

Figura 64. Gráfica de comportamiento del *tiempo de reverberación*

Figura 65. Continuo lineal de Preferencia

Figura 66. Mapa de Preferencia

Figura 67. Mapa de Preferencia de Acuerdo a RT60

Figura 68. Software de aplicación de Test de Preferencia

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Método de Análisis por Ley de Juicio Comparativo (Escalamiento Unidimensional de Thurstone) por Vicent Gonzàlez.

ANEXO B. Planos arquitectónicos Sala de Conciertos Biblioteca Luis Ángel Arango

ANEXO C. Test de Preferencia Subjetiva

ANEXO D. Ficha técnica de transductores de *dummy-head* 01dB-Metravib

ANEXO E. Ficha técnica de tarjeta 01dB-Metravib dB4

ANEXO F. Ficha técnica de micrófono de medición Gold-Line Tef04

RESUMEN

Mediciones de parámetros acústicos fueron realizadas en una sala de conciertos, con el fin de obtener respuestas impulsivas binaurales (utilizando un *dummy-head*) en las distintas ubicaciones de audiencia. Por medio de procesos de convolución y muestras de música anecoica, fue posible obtener simulaciones de campos sonoros para cada ubicación. Las respuestas impulsivas binaurales obtenidas fueron analizadas respecto a cuatro parámetros acústicos principales: *Tiempo de Reverberación (T60)*, *Sonoridad (G)*, *Initial Time Delay Gap (ITDG)* y *Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural (IACC)*. Una prueba psicométrica de comparación de pares, implementada mediante una prueba de escucha realizada en una sala con características acústicas específicas y un sistema de reproducción Stereo Dipole, fue aplicada con el fin de analizar el nivel de preferencia subjetiva de los sujetos respecto a los campos sonoros simulados y sus respectivos parámetros acústicos. El *tiempo de reverberación medio* obtenido en las mediciones fue considerado no apropiado para el tipo de sala y el tipo de música interpretada en la misma, ya que excede en aproximadamente 1.0s el valor recomendado. Según los resultados de la prueba psicométrica, los cuales fueron analizados mediante la Ley de Juicio Comparativo, los sujetos prefieren estar en presencia de un alto Tiempo de Reverberación. De igual forma, los campos sonoros correspondientes a ubicaciones con mayor presencia de campo directo presentaron un alto nivel de preferencia.

INTRODUCCIÓN

La Acústica Arquitectónica y la Psicoacústica son dos disciplinas que han permitido introducir el concepto de *percepción del sonido* en los seres humanos; gracias a esto, numerosas investigaciones se llevan a cabo con el fin de analizar las respuestas del cerebro humano respecto a distintos estímulos sonoros, los cuales son concebidos como *sensaciones* y los cuales están presentes en todo tipo de espacios, cuyas características tienen una gran influencia en la recepción humana del sonido.

El estudio del comportamiento sonoro en una sala permite obtener una valoración cuantitativa de sus características acústicas, las cuales están definidas por diversos parámetros (tales como el *tiempo de reverberación*, *tiempo de llegada de las reflexiones*, etc.). La obtención de dichos parámetros se da por la aplicación de métodos y tipos de estudios que permiten la recopilación de los datos necesarios para tal fin. El tipo de estudio implementado, el cual puede ser de carácter objetivo ó subjetivo, depende del tipo de fenómeno acústico a analizar, y como todo método científico, sus resultados se verán afectados por diversos tipos de variables que requerirán de un proceso de corrección y tratamiento estadístico.

Desde sus inicios, la acústica se ha preocupado por relacionar en su estudio un factor que puede considerarse influyente en el análisis acústico de sala: la subjetividad de la audiencia. Los parámetros acústicos objetivos descritos en la teoría acústica clásica han sido relacionados con la percepción del oyente respecto a todo tipo de recintos, bajo lo cual se han planteado a diversos tipos de valoraciones para los mismos, con los cuales ha sido posible dar una evaluación acústica en un idioma universal. A pesar de esto, en muchos fenómenos acústicos no ha sido posible hallar una relación concreta entre datos objetivos experimentales producto de procesos de medición y la opinión y el juicio de la audiencia.

La presente investigación tratará el tema de la preferencia subjetiva del oyente respecto a los campos sonoros presentes en salas de concierto, y su motivación radica en brindar una nueva perspectiva para el análisis acústico de salas. Mediante la implementación de la Teoría de Preferencia Subjetiva en salas de concierto podrá darse un punto de partida para la expansión del campo de la acústica y la psicoacústica, y se abrirán las puertas a una nueva era de diseño y tratamiento acústico en Colombia y Latinoamérica.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE)

La percepción sonora y el análisis de la subjetividad de la audiencia en la acústica son campos muy amplios en materia de investigación, y existe una gran cantidad de perspectivas y fenómenos sonoros desde las cuales pueden abarcarse. Durante el último siglo muchos investigadores han realizado numerosos trabajos de análisis de temas donde el Audio, la Música y la Acústica se juntan en una sola ciencia. En 1953, Norman C. Pickering y Eric Baender plantean una discusión, en su publicación *Two Ears In Three Dimensions*, acerca de un tema que, desde la primera reproducción en dos canales (1878 en la Paris Exposition), ha sido uno de los objetos de estudio más importantes en el audio: la creación de la sensación de espacio en el oyente. A partir de allí, el continuo y rápido avance de la tecnología ha permitido a los investigadores contar con equipamiento con el que cada vez es más posible obtener mejores resultados en las ilusiones de espacio que se presentan a las personas, tanto en la música como en el cine. A pesar de esto, factores como las condiciones acústicas de los recintos han tendido a ser una limitación y una variante muy importante en todos los procesos que deben llevarse a cabo para un estudio de este tipo.

Basados en el estudio de las señales recibidas en los dos oídos, cuyas diferencias son la base de las sensaciones percibidas y apreciadas por cada individuo. Lo que se denominó *correlación interaural* (cuantificada por el coeficiente IACC) es considerado un factor importante para definir las preferencias de las personas en cuanto a la acústica de los recintos, y las respectivas valoraciones que dan respecto a su condición. En 1980, un equipo de investigación de Kenwood Electronics desarrolló dos dispositivos simples que permitieron realizar la obtención del IACC, donde basados en distintos métodos de medición y equipamiento utilizado, les fue posible analizar la efectividad de los mismos respecto a la imagen sonora producida en el oyente. Este trabajo fue presentado en el paper AES *On the simplified measurement of the interaural crosscorrelation coefficient and its effects on sound imaging and quality*.

Posteriormente, muchas investigaciones fueron orientadas a analizar fenómenos sonoros respecto a la forma en que las personas perciben y pueden dar un juicio o valoración de lo que escuchan. Tener en cuenta tanto la parte objetiva como subjetiva de los procesos de mediciones acústicas empezó a hacer parte de la evolución en materia del estudio de la percepción sonora. Mahlon Bukhard y Klaus Genuit, en su trabajo *Merging Subjective and Objective Acoustical Measurements* (11th AES Conference: Test & Measurement, 1992), hacen un planteamiento importante de la necesidad que se tiene de poder realizar una descripción completa de todos los eventos sonoros, lo cual no es posible teniendo en cuenta solamente resultados objetivos de medición, todo debido a que la comprensión o

recepción de un mensaje por parte del oyente se ve afectada por numerosos parámetros (tales como el nivel, la distribución espacial, componente espectral, componente temporal, etc.), que requieren de un análisis psicoacústico. Gracias a esto es posible dar una escala de atributos que permite evaluar, subjetivamente, cuál es la respuesta de una persona frente a un sonido o evento sonoros específico. Un modelo de procesamiento de señal para la audición humana, la cual se hace de forma binaural, y divide los procesos de filtrado y adquisición de información de cada estímulo sonoro según los procesos fisiológicos del oído es presentado en esta investigación.

David Griesinger, investigador y programador de simulaciones de espacios sonoros y efectos de reverberación para dispositivos procesadores de señal de la empresa Lexicon, ha desarrollado numerosos estudios en salas de concierto relacionados con el tema desde varias perspectivas. En *Spaciousness and envelopment in musical acoustics*, presentado en el año de 1996, describió, por medio de una serie de experimentos enfocados en el análisis de la energía después del decaimiento de la señal musical dada por la fuente, cómo la energía lateral en salas de concierto es la razón de ser de los conceptos de *espacialidad* y *envolvimiento*. En *Perception of Concert Hall Acoustics in seats where the reflected energy is stronger than the direct energy* (2007, 122nd AES Convention), se trata el tema de cómo la relación entre la energía directa y reflejada en ciertos puntos de una sala de conciertos puede afectar factores como la sonoridad, la espacialidad, la claridad y la ubicación de las fuentes sonoras por parte del oyente. En el año 2010, Griesinger presentó la tercera parte de su investigación llamada *Phase Coherence as a Measure of Acoustic Quality*, la cual nombró *Part III: Hall Design*. En este trabajo (publicado en el Congreso Internacional ICA), se dan pautas importantes para el diseño de salas de concierto, y a la vez métodos de acondicionamiento de salas ya existentes, donde se resalta el papel de la reverberación en la percepción del sonido directo por parte de la audiencia, y a la vez su relación con parámetros como la sonoridad.

Angelo Farina, investigador y profesor del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Parma, Italia, ha desarrollado numerosos proyectos relacionados con recreaciones de espacios sonoros a partir de procesamiento digital de señales. En *Convolution of anechoic music with binaural impulse responses*, publicado en el año 1993, mostró los primeros resultados de la reconstrucción de características acústicas de campos sonoros en salas de concierto a través de algoritmos que implementan filtros digitales. En el año de 1995, Farina, junto con Andreas Langhoff (Scuola Internazionale di Liuteria, Cremona) y Lamberto Tronchin (Istituto di Fisica Tecnica, University of Bologna), desarrolló y publicó un trabajo de investigación titulado *Subjective Comparison of 'Virtual' Violins Obtained by Convolution*. En ese trabajo se realizó un test de comparaciones por pares entre muestras de grabaciones acústicas microfónicas reales de instrumentos de música clásica y muestras obtenidas por procesos de convolución para los mismos instrumentos. Los resultados obtenidos concluyen

que la similitud alcanzada por las muestras de audio obtenidas digitalmente respecto a las muestras reales es considerablemente alta, bajo lo cual se afirma que la técnica de convolución diseñada con filtros digitales es capaz de crear 'instrumentos reales' y emular fielmente su respuesta en frecuencia. Farina es mundialmente conocido por el aporte realizado al cálculo de parámetros acústicos en salas gracias a la creación de los Plugins Aurora.

El Profesor Yoichi Ando, fundador de Ando Labs y docente de la Universidad de Kobe, Japón, ha sido el principal gestor de la implementación de la Teoría de Preferencia Subjetiva. Desde finales de los años 70's, Ando ha dedicado su trabajo a la aplicación de su teoría desde distintas perspectivas. En su publicación *Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall*, se describe un método de cálculo de la preferencia subjetiva para el diseño de salas de concierto teniendo en cuenta los parámetros más influyentes en la misma (nivel de sonoridad, tiempo de llegada de reflexiones, tiempo de reverberación y la magnitud de la correlación cruzada interaural). *Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo* y *Effects of early multiple reflections on subjective preference judgments of music sound fields* abarcan la teoría desde el punto de vista de la energía reflejada en las salas, donde los resultados de preferencia obtenidos entrarán a depender de la correlación cruzada interaural, y la su vez de la amplitud de las reflexiones en la sala. Trabajos como *On the Preferred Reverberation Time in Auditoriums* se enfocan en el parámetro acústico por excelencia (el tiempo de reverberación) para analizar y aplicar la teoría, donde mediante simulación de campos sonoros y pruebas de juicio para los mismos es posible hallar los valores óptimos que permitan realizar un diseño eficiente de una sala. En el año 2010, el profesor Shin-ichi Sato presenta su investigación *Theory of subjective preference for sound fields in concert halls: process and application*, donde realiza una exposición del proceso de aplicación de la teoría de Ando para este tipo de salas, y propone un sistema de selección de silla para aplicar la preferencia individual. Mapas de preferencia subjetiva que reflejan gráficamente los resultados de dicha aplicación para salas de concierto son expuestos en esta investigación.

Un equipo de investigación de la Universidad Politécnica de Valencia, España, implementó en el año 2001, en su trabajo *Evaluación subjetiva de la calidad del sonido mediante test de parejas*, una herramienta en software que permite realizar diseños de test de comparación por pares de señales sonoras, con el fin de evaluar la calidad del sonido de los motores diesel según el juicio subjetivo de una determinada muestra poblacional. En las pruebas se tuvieron en cuenta distintas valoraciones referentes a características de las muestras sonoras tales como nivel de potencia, nivel de molestia, etc.

En el año 2009, Diego Hidalgo, estudiante de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, Colombia, presentó en su tesis de grado *Medición y análisis acústico de diez salas de concierto y teatro de Bogotá* una descripción de

la calidad acústica de algunos de los recintos con mejor calidad acústica en Colombia, presentando resultados acerca de los parámetros acústicos obtenidos. El proyecto ofrece una perspectiva de las salas de concierto desde el punto de vista de la acústica arquitectónica, y puede considerarse parte del punto de partida para el análisis de dichas salas de concierto a partir de la percepción de la audiencia, y también de la preferencia subjetiva sobre los campos sonoros que en ellas se presentan.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En una sala de conciertos, la percepción de un campo sonoro claro y agradable para el oyente en cualquier ubicación de la misma hace parte de sus objetivos principales. Estas condiciones están dadas a partir del comportamiento acústico descrito por una serie de parámetros objetivos que permiten su cuantificación. A pesar de esto, algunas de las mediciones acústicas que generalmente son realizadas en este tipo de recintos no tienen en cuenta la valoración subjetiva y el juicio de la audiencia para definir los valores óptimos para los distintos parámetros acústicos.

El comportamiento sonoro dentro de salas de concierto está directamente relacionado con los numerosos fenómenos que en éstas se presentan. Cualquier tipo de interpretación musical en una sala de este tipo requiere de un estudio acústico complejo respecto a la subjetividad con la que cada individuo da una valoración sobre la recepción de un mensaje o una señal. Parámetros acústicos tales como el nivel de sonoridad, tiempo de llegada de las distintas reflexiones en cada ubicación de la sala, el tiempo de reverberación y la correlación cruzada interaural tienen, independientemente, una fuerte influencia en la preferencia que cada persona tiene en un lugar específico de la sala respecto al campo sonoro que experimenta. Los métodos de análisis aplicados a dicha preferencia de cada individuo respecto a condiciones acústicas específicas, muchas veces requieren la implementación de procesos complejos tales como procesamiento de señal, la reproducción o simulación de distintos campos sonoros dados en una prueba de escucha, entre otros. Por tratarse de una prueba subjetiva, es necesario también realizar un estudio psicológico y estadístico de los datos arrojados por las pruebas aplicadas. En el caso de la Preferencia Subjetiva, debe ser aplicada la Ley de Juicio Comparativo, la cual permite documentar, usando como estímulos los campos sonoros simulados, la preferencia de cada individuo a partir de sus atributos. Los procesos anteriormente mencionados deben llevarse a cabo en condiciones acústicas específicas, y a su vez requieren la implementación y programación de instrumentos y equipos avanzados y a veces costosos. Pensando en la importancia de la implementación de la Preferencia Subjetiva en las mediciones acústicas y en su gran influencia en el diseño y acondicionamiento acústico en recintos, la pregunta problema planteada es: ***¿Cómo evaluar el juicio subjetivo de las personas respecto a los campos sonoros presentes en salas***

de conciertos por medio de un método de auralización que permita implementar la teoría de Preferencia Subjetiva?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las mediciones acústicas son la base de la comprensión del comportamiento sonoro en los recintos. Algunas personas desconocen las razones por las cuales dicho comportamiento puede verse afectado, las cuales se relacionan con las respectivas características de diseño, construcción y acondicionamiento interior. Las salas de concierto, a través de la historia, han cumplido un papel muy importante en la sociedad debido a la gran variedad de eventos culturales que en ellas se realizan. En el mundo existe un grupo muy selecto de las que pueden considerarse las mejores salas de concierto del mundo, respecto a su diseño arquitectónico y acondicionamiento acústico. Dentro de la cadena de evaluación de la calidad de dichas salas, el último eslabón lo ocupan las personas, a las cuales está dirigida tanto la interpretación musical como el comportamiento del campo sonoro en su interior. En Colombia, el diseño acústico en los últimos años ha estado limitado por factores tanto económicos como culturales, por lo cual se hace fundamental plantear nuevas alternativas para el desarrollo de ésta disciplina, y en general del análisis acústico de recintos.

Es necesario, a través de la Teoría de Preferencia Subjetiva, identificar la verdadera influencia del juicio de las personas en la evaluación de la calidad acústica de las salas de concierto. Este proyecto permitirá a los estudiantes y profesionales que se desempeñen en las áreas de la Acústica y la Psicoacústica, a través de la aplicación de ésta teoría en las salas de concierto de Bogotá, y por medio de una propuesta metodológica, realizar análisis acústicos con una base teórica sólida, y podrán abrirse puertas a la investigación interdisciplinaria con áreas como la psicología, la fisiología y la fonoaudiología, y finalmente poder dar un punto de partida para la investigación relacionada con éstas disciplinas en Colombia y Latinoamérica.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el nivel de preferencia de las personas respecto a las distintas ubicaciones de la audiencia en salas de concierto a través de un método de auralización que simule los campos sonoros de las mismas y permita implementar la Teoría de Preferencia Subjetiva.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento arquitectónico de la sala seleccionada y elaborar en CAD versiones digitales de sus respectivos planos arquitectónicos.
- Efectuar mediciones de parámetros acústicos (tanto espaciales como temporales) monoaurales y binaurales en la sala objeto de estudio, lo cual incluye la obtención de respuestas impulsivas binaurales.
- Obtener, por medio de respuestas impulsivas binaurales y procesos de convolución con muestras musicales anecoicas, simulaciones de campos sonoros correspondientes a distintas ubicaciones dentro de las salas.
- Aplicar pruebas de preferencia a través de un Test de Comparación de Pares a muestras poblacionales con experiencia y sin experiencia musical, con el fin de obtener los valores de grado de preferencia para los distintos campos sonoros.
- Realizar un análisis psicométrico y estadístico de los resultados obtenidos en las pruebas de preferencia a través de la aplicación de la Ley de Juicio Comparativo.
- Implementar un sistema de selección de silla bajo la programación de un software que permita la aplicación de las pruebas de preferencia.
- Trazar un mapa de preferencia subjetiva según los resultados obtenidos, donde se muestre la variación de dicha preferencia en las distintas áreas de la audiencia.
- Identificar una relación concreta entre los datos obtenidos de mediciones de parámetros acústicos objetivos y las pruebas de preferencia subjetivas aplicadas a la audiencia.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcances

- Plantear una nueva perspectiva para criterios de diseño acústico en Colombia en el cual se tengan en cuenta las variables referentes al nivel de preferencia de la audiencia.
- Fomentar la investigación interdisciplinaria en los estudiantes de Ingeniería de Sonido de la Universidad de San Buenaventura, lo cual llevará a la ejecución de proyectos de mayor calidad e impacto social.

- El proyecto servirá como referencia para la realización de futuras investigaciones en el campo de la percepción sonora y la Psicoacústica. Permitiendo realizar mediciones y análisis con una base teórica sólida.
- Detectar distintas patologías de tipo acústico en la sala propuesta a partir de los resultados obtenidos, y plantear una propuesta de solución para las mismas.

1.5.2 Limitaciones

- La sala de escucha para las pruebas de preferencia puede requerir tratamiento acústico debido a posibles problemas en su comportamiento modal y de absorción.
- El acceso a las salas escogidas puede ser restringido debido a su uso constante.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

2.1.1 Acústica de Salas

Los siguientes conceptos y definiciones referentes a parámetros acústicos y acústica de salas de concierto pueden encontrarse en *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*, de Antoni Carrión Isbert [1], a excepción de los conceptos tomados de diferentes fuentes, denotadas con su respectiva cita bibliográfica.

2.1.1.1 Reverberación

La radiación de energía producida por una fuente dentro de un recinto provoca, junto con el sonido directo, la aparición de una serie de reflexiones que también son percibidas por el receptor. Al interrumpir bruscamente la fuente, el nivel de presión sonora dentro de la sala empezará a decaer progresivamente en el tiempo, hasta alcanzar con el ruido de fondo de la misma. Esta atenuación del nivel de presión sonora depende directamente de la absorción de las superficies del recinto; por lo cual a mayor absorción se tendrá una atenuación más rápida. El grado de permanencia del sonido dentro de un recinto una vez que la fuente es interrumpida es denominado *reverberación*.

2.1.1.2 Tiempo de Reverberación

Con el fin de poder cuantificar la reverberación de un recinto, se define el tiempo de reverberación como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial. Un recinto 'vivo' tendrá un tiempo de reverberación alto, mientras que un recinto con un tiempo de reverberación bajo será denominado un recinto 'apagado'.

Generalmente, el tiempo de reverberación varía con la frecuencia, todo debido a las características de absorción que poseen los materiales que componen las superficies del recinto, las cuales poseen una acción mayor para ciertos rangos de frecuencias.

El físico W. C. Sabine formuló en 1900 una ecuación que permite calcular el tiempo de reverberación de un recinto:

$$RT60 = \frac{0.161 * V}{ABS}$$

Donde **V** es el volumen de la sala [m³] y **ABS** su área de absorción [Sabine*m²]

La fórmula de Sabine es válida si el local tiene una distribución uniforme y difusa de la energía y con una absorción continua y constante de la absorción sonora en todas las superficies. Como estas condiciones no se cumplen para la gran mayoría de recintos, la ecuación de Sabine ha tenido que ser transformada para poder tener en cuenta todas las variables de absorción y campo sonoro en los recintos.

El físico catalán Higiní Arau planteó la que es considerada la más moderna y definitiva ecuación de tiempo de reverberación, en la que se tiene en cuenta una distribución asimétrica en la absorción de un recinto [14].

$$RT_{60} = \left[\frac{0.162V}{-S \ln(1 - \alpha_x)} \right]^{S_x/S} * \left[\frac{0.162V}{-S \ln(1 - \alpha_y)} \right]^{S_y/S} * \left[\frac{0.162V}{-S \ln(1 - \alpha_z)} \right]^{S_z/S}$$

Donde:

V = volumen de la sala en m³

S = Total de superficies de la sala en m²

α = Coeficiente de absorción promediado de cada pared promediado por fracción de área

S_x = área de superficie dada por Suelo + Techo

S_y = área de superficie dada por Pared Lateral izquierda + Pared lateral derecha

S_z = área de superficie dada por Pared frontal + Pared de fondo

Con el objeto de analizar el comportamiento del nivel de campo reverberante en salas, se ha definido un valor promedio del *tiempo de reverberación*, denominado RT_{mid} . Dicho parámetro es definido como el promedio aritmético de los valores de *tiempo de reverberación* en las bandas de 500Hz y 1KHz.

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1KHz)}{2}$$

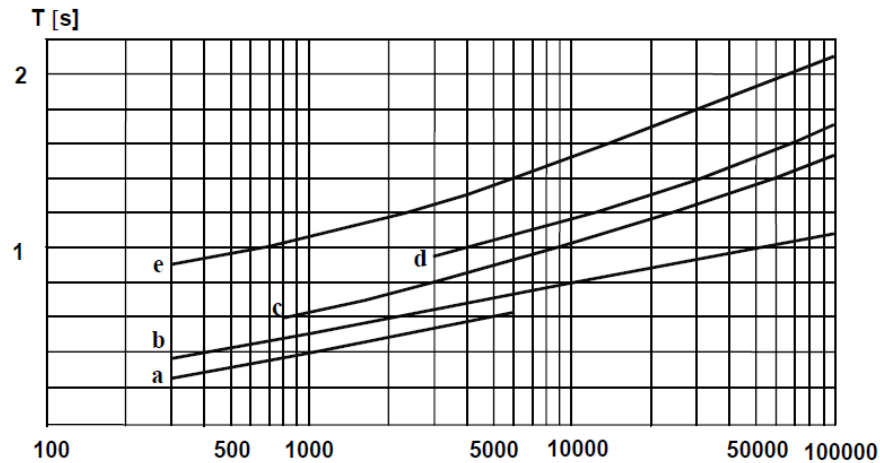
Los valores recomendados de *tiempo de reverberación* dados por investigaciones modernas tienen en cuenta, en su mayoría, el valor de RT_{mid} .

- **Valores recomendados de Tiempo de Reverberación**

Diversos investigadores, a lo largo de la historia, han realizado estudios acústicos de las mejores salas del mundo, para lo cual también tuvieron en cuenta opiniones

de la audiencia, usuarios y expertos. Los estudios revelaron que para cada sala el tiempo de reverberación óptimo aumenta con el volumen de la sala (dado en m^3). Leo Beranek realizó una estadística de dichos tiempos de reverberación óptimos en función del volumen.

Figura 1. Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala. Donde **(a)** Estudios de radiodifusión para voz. **(b)** Salas de conferencias. **(c)** Estudios de radiodifusión para música. **(d)** Salas de conciertos. **(e)** Iglesias.



Para salas de concierto, existe una recomendación para valores de *tiempo de reverberación* acorde no solamente con el volumen de la sala, sino también con el tipo de música que será reproducida en ella. Los valores recomendados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores recomendados de RT_{mid} para salas de concierto según tipo de música [1]

Tipo de música	RT_{mid} recomendado (s)
Música sinfónica	1.8 – 2.0
Música barroca y clásica	1.6 – 1.8
Música de cámara	1.3 – 1.7
Ópera	1.2 – 1.5

2.1.1.3 Calidez y Brillo: Parámetros acústicos subjetivos

La *calidez* de una sala de conciertos está relacionada directamente con la forma en que los sonidos bajos son escuchados claramente por la audiencia cuando la

orquesta completa está interpretando una pieza. En términos técnicos, la *calidez* en la música es determinada por la ‘fuerza’ de los tonos bajos. Algunas veces los músicos describen como ‘*oscura*’ una sala con mucha fuerza en tonos bajos, lo cual puede atribuirse a la atenuación de las frecuencias altas por elementos en la sala tales como alfombras, cortinas y demás materiales absorbentes.

Un sonido claro, rico en armónicos, es descrito como *brillante*. Un sonido brillante tiene prominente contenido en frecuencias altas que decaen lentamente. En una sala de conciertos, las frecuencias altas van a disminuir naturalmente, ya que sufren el efecto de la absorción por el aire mismo. Un exceso de brillo en la sala puede atribuirse a malas adecuaciones de amplificación electrónica en el interior, así como una carencia de la misma puede causarse por el exceso de absorción [2].

Los índices de Calidez (BR) y Brillo (Br) de una sala, son los que determinan, respectivamente, la respuesta de la misma en bajas y en altas frecuencias, lo cual se relaciona directamente con el comportamiento de la sala respecto a la interpretación musical y su percepción. Éstos índices están dados por las expresiones:

$$BR = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1KHz)}$$

$$Br = \frac{RT(2KHz) + RT(4KHz)}{RT(500Hz) + RT(1KHz)}$$

Beranek recomienda, para salas ocupadas, un valor de Br menor o igual a 0,87. Respecto a BR, es recomendado, para salas con un RT menor o igual a 1.8, un valor entre 1.10 y 1.45.

2.1.1.4 Early Decay Time (EDT)

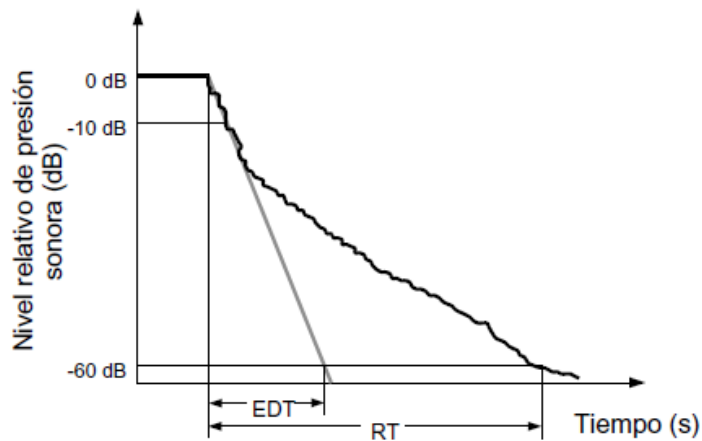
El parámetro EDT es definido como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10dB. Al igual que el *tiempo de reverberación*, el EDT varía en función de la frecuencia. De forma general, el decaimiento energético en salas presenta más de una pendiente, a causa de falencias en la difusión del sonido. En el caso de las salas de concierto, ciertas zonas donde las características de absorción presentan cambios notorios (tales como los palcos, los cuales son conformados por sillas tapizadas y cortinas de alta densidad), pueden ser zonas donde el decaimiento, en los primeros instantes de tiempo, sea más rápido, para después decaer conforme al comportamiento del resto de la sala. En dichas zonas, el valor de EDT es considerablemente inferior al *tiempo de reverberación*, y de igual forma, la

impresión subjetiva de viveza en la sala, también será menor. Con objeto de garantizar una difusión óptima del sonido en una sala ocupada; el valor EDT_{mid} , definido como el promedio de los valores de EDT en las bandas de 500Hz y 1KHz, debe ser del mismo orden que el valor del RT_{mid} de la sala.

$$EDT_{mid} = RT_{mid}$$

La Figura 2 ilustra la relación entre el Early Decay Time (EDT) y el *Tiempo de Reverberación* (RT60).

Figura 2. Relación entre EDT y RT60 [1]



2.1.1.5 Sonoridad (G)

La sonoridad de la sala, definida por el parámetro *Strength Factor* (G), corresponde con el grado de amplificación producido por la sala. Depende de la distancia del oyente al escenario, de la energía asociada a las primeras reflexiones, de la superficie ocupada por el público y del nivel de campo reverberante. Según Lehmann, el parámetro G se define como la diferencia entre en nivel total de presión sonora producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente en campo libre y medido a una distancia de 10m (tomado como nivel de referencia). Ambos niveles se miden por bandas de frecuencias de octava entre 125Hz y 4KHz, aplicando la misma potencia a la fuente sonora en ambos casos. El nivel de referencia en cada banda de frecuencias es de 69dB.

Beranek recomienda que el valor de G para la sala vacía, obtenido como promedio de los correspondientes a las bandas de octava centradas en 500Hz y 1KHz, esté situado entre:

$$4 \leq G_{mid} \leq 5.5dB$$

2.1.1.6 Initial-Time-Delay Gap (ITDG)

El ITDG corresponde con la impresión subjetiva de 'intimidad acústica'. Beranek asocia la valoración de intimidad acústica con la sensación que tiene el oyente de escuchar la música en un espacio de dimensiones más reducidas que las dimensiones de la sala. Este parámetro se define como el intervalo de tiempo (en milisegundos) existente entre la llegada del sonido directo procedente del escenario y la primera reflexión significativa.

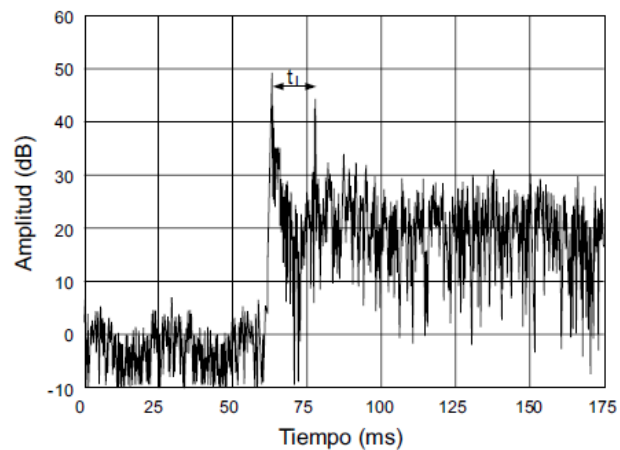
Según Beranek, el valor recomendado de este parámetro en el centro de la platea debe verificar:

$$ITDG \leq 20ms$$

La obtención de valores superiores a 35ms representa generalmente una reducción significativa de la calidad acústica de una sala. El punto representativo para el análisis del ITDG es la platea de la zona de la audiencia, debido a que analizarlo en puntos cercanos a las paredes o a los frontales de los anfiteatros o palcos resulta inútil en términos de intimidad acústica.

La Figura 3 ilustra un decaimiento energético donde se destaca la llegada del sonido directo y la primera reflexión significativa.

Figura 3. Descripción de ITDG [1]



2.1.1.7 Claridad Musical (C80)

El parámetro C80 indica el grado de separación entre los sonidos individuales de un ensamble musical. Según Cremer, es definido como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 milisegundos desde la llegada del sonido directo y la que llega después de ese intervalo de tiempo. El intervalo

de 80ms es escogido gracias a que constituye las primeras reflexiones, las cuales son integradas por el oído junto con el sonido directo.

$$C80[dB] = \frac{\int_0^{80ms} p^2(t)dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t)dt}$$

Esta expresión es la forma habitual de expresar su valor y generalmente para las frecuencias de 500Hz, 1kHz y 2kHz, por lo que el valor global de C80 será la media aritmética de los correspondientes a estas frecuencias. Los valores recomendados de C80 según Leo Beranek se ubican entre:

$$\begin{aligned} -4 \leq C80 \leq 0dB & \text{ Para salas vacías (según Beranek)} \\ -2 \leq C80 \leq 2dB & \text{ Para salas ocupadas (según L.G Marshall)} \end{aligned}$$

2.1.1.8 Ancho Aparente de la fuente (ASW)

En la audición musical, la amplitud aparente de la fuente sonora se asocia con la sensación de que el sonido que llega del escenario proviene de una fuente de mayor amplitud que la correspondiente a la orquesta real. El parámetro ASW (*Apparent Source Width*) constituye uno de los componentes básicos de la denominada *espacialidad o impresión espacial del sonido*. Cuanto mayor sea ASW; mayor será la impresión espacial del sonido y mejor resultará la valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala.

Según A. H. Marshall y Barron, ASW aumenta con el número de primeras reflexiones que inciden lateralmente sobre el oyente. Ello es debido a que el oído las suma con el sonido directo, con lo cual la localización de la fuente tiende a ser ambigua. Por otra parte, la existencia de primeras reflexiones laterales importantes hace que aumente el grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a los dos oídos, tanto por la diferencia entre los caminos recorridos como por el obstáculo que representa la presencia de la cabeza del oyente. Cuanto mayor sea la diferencia entre ambos sonidos, mayor será ASW.

Los dos parámetros que permiten cuantificar el grado de ASW son la Eficiencia Lateral (LF) y la Correlación Cruzada Interaural (IACC_E).

2.1.1.9 Eficiencia Lateral (LF)

Según A. H. Marshall, la Eficiencia Lateral LF ('Lateral energy Fraction') se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo (excluyendo el sonido directo) y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo:

Habitualmente se utiliza el valor medio de los LF correspondientes a las bandas de frecuencias de octava comprendidas entre 125Hz y 1KHz. Se representa por LF_{E4} :

$$LF_{E4} = \frac{LF(125Hz) + LF(250Hz) + LF(500Hz) + LF(1KHz)}{4}$$

El valor de LF_{E4} para una sala vacía debe cumplir:

$$LF_{E4} \geq 0.19$$

Cuanto más elevado sea el valor de LF_{E4} , mayor será ASW, y por consiguiente, el grado de espacialidad del sonido.

2.1.1.10 Correlación cruzada interaural (IACC)

En general, la correlación cruzada interaural se define como la correlación entre los sonidos que llegan a ambos oídos, y es indicativa del grado de similitud existente entre las dos señales. Si Son iguales, el IACC valdrá 1, mientras que si son señales aleatorias independientes, el IACC será 0.

Cuando se trata de una sala existente, la medida asociada al cálculo del parámetro IACC es binaural y se lleva a cabo a partir del registro de las señales captadas por dos micrófonos colocados en las orejas de una cabeza artificial ('dummy head').

Hidaka define dos IACC: el $IACC_E$ ('Early'), correspondiente a los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo, y el $IACC_L$ (Late) que se calcula a partir de los 80ms hasta 1s. Okano comprobó las bandas de frecuencias más representativas son las centradas en 500Hz, 1KHz y 2KHz. De aquí surgen las definiciones de $IACC_{E3}$ e $IACC_{L3}$, como los promedios de los valores de $IACC_E$ a $IACC_L$ en dichas tres bandas. Desde el punto de vista del ASW, el parámetro relevante es el $IACC_{E3}$.

El $IACC_{E3}$ permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos, dentro de los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo. Cuanto más diferentes sean, menor será el valor de $IACC_{E3}$. Habitualmente se suele utilizar el valor $(1 - IACC_{E3})$, puesto que un aumento del

mismo significa una mayor disimilitud entre ambas señales, y una mayor amplitud aparente de la fuente sonora.

En la Tabla 2 se indican los valores medios de $(1 - IACC_{E3})$ y su correspondencia con tres categorías acústicas de salas evaluadas estadísticamente por Beranek.

Tabla 2. Valores medios de $1-IACC_{E3}$ correspondientes con categorías de salas desde punto de vista acústico [1]

$(1 - IACC_{E3})$	Categoría acústica
0.66	Excelente
0.55	Muy buena
0.41	Aceptable/Buena

En consecuencia, si bien no existe un valor óptimo para $(1-IACC_{E3})$, Beranek propone para la sala vacía el siguiente valor aproximado:

$$(1 - IACC_{E3}) \approx 0.70$$

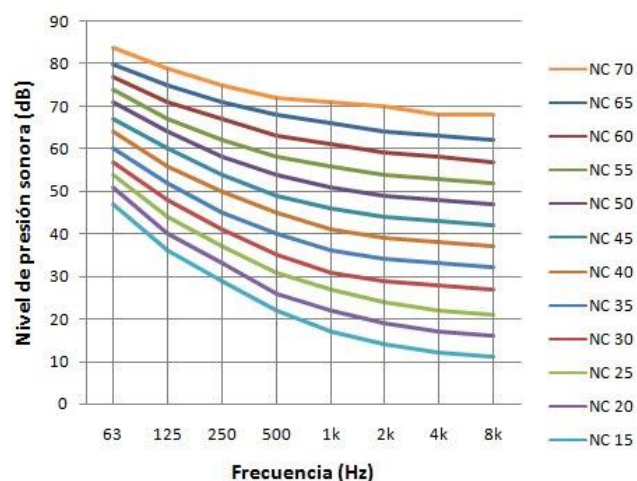
El parámetro $(1 - IACC_{E3})$ se corresponde, incluso de forma más precisa que el LF_{E4} , con ASW. A medida que el valor de $(1 - IACC_{E3})$ aumenta, también lo hace ASW, es decir, el grado de impresión espacial de la sala.

2.1.1.11 Nivel de Ruido: Curvas NC

Las *Noise Criterion Curves* (Curvas NC) nacen a partir de la necesidad de tener una medición objetiva con respecto al ruido de fondo presente en cualquier recinto. Para esto se utilizaron encuestas, en las cuales se les pedía a los encuestados valorar el ruido de fondo de forma general y en el instante mismo en el que se les preguntaba. Se les entregó una escala con seis niveles, desde ‘muy silencioso’ hasta ‘insoportablemente ruidoso’. Fruto de este estudio se hicieron 12 curvas; desde la NC 15 hasta la NC 70 con pasos de 5 entre cada curva. Dichas curvas consideran la respuesta en frecuencia del oído humano, pues son más permisivas en cuanto a niveles de presión sonora para bajas frecuencias, y en contraparte, menos permisivas a medida que la frecuencia aumenta [3].

La Figura 4 muestra el diagrama de las curvas NC, descritas en un diagrama de nivel de presión sonora (SPL) en función de la frecuencia.

Figura 4. Diagrama de Curvas NC



LEÓN, A. *Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía*. Universidad de Sevilla. 2007

Así mismo, existen recomendaciones acerca de los niveles óptimos de ruido de fondo presentes en distintos tipos de recintos, teniendo en cuenta su uso. La siguiente tabla muestra algunas de las curvas recomendadas para los distintos tipos de recintos:

Tabla 3. Valores recomendados de nivel de ruido según Curva NC

Tipo de recinto	Curva NC recomendada	Nivel Total en dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de concierto y teatros	15 – 25	28 – 38
Salas de conferencias	20 – 30	33 – 42
Polideportivos	40 – 50	50 – 60
Talleres (maquinaria ligera)	45 – 55	55 – 65
Talleres (maquinaria pesada)	50 – 65	60 - 75

El cumplimiento de la especificación NC-15 garantiza unos niveles de ruido de fondo suficientemente bajos como para no perjudicar la audición de un '*pianissimo*' (ppp en nomenclatura musical), pasaje de la composición musical con el nivel más débil. Por lo tanto, dicho cumplimiento permite aumentar el margen dinámico de la orquesta en la sala, entendiéndose por tal la diferencia entre el nivel de presión sonora correspondiente al pasaje más fuerte y el asociado al pasaje más débil interpretado por la misma.

2.1.2 Análisis y procesamiento de señales

2.1.2.1 Señal

Oppenheim define una *señal* como una función de una o más variables independientes, y contienen información acerca del comportamiento un fenómeno [4]. Las aplicaciones del concepto de *señal* se dan desde la Sismología hasta la Ingeniería Biomédica, y por supuesto en el campo de la acústica. En la naturaleza y en la ciencia existe un sinnúmero de ejemplos de señales: los voltajes y corrientes de un circuito eléctrico, o bien la acción de aceleración de un automóvil.

Otra definición del concepto de señal, dada por Bertran, describe una *señal* como una magnitud cuya variación en el tiempo, la cual es por convención la variable independiente, representa una información acerca de un fenómeno [5]. Dichas magnitudes pueden ser cuantificables mediante diversos instrumentos.

2.1.2.2 Representación de señales

Las señales son capaces de describir un gran número de fenómenos. Y a pesar de poder representarse de diversas formas, la información en una señal está contenida en un patrón de variaciones que presenta alguna forma determinada.

Las señales se representan matemáticamente como funciones con una o más variables independientes. Por conveniencia nos referimos por lo general a la variable independiente como el *tiempo* [4].

2.1.2.3 Clasificación de señales

Generalmente, se han considerado dos grandes grupos de señales: *señales continuas* y *señales discretas*. En las *señales continuas*; la variable independiente es continua, por lo que estas señales se definen para una sucesión continua de valores de la variable independiente. Por otra parte, las *señales discretas* solo están definidas en tiempos discretos y, en consecuencia, para estas señales la variable independiente toma solamente un conjunto discreto de valores [4]. Las principales clasificaciones de señales utilizadas son:

- **Según su duración:**
 - Causales: Son 0 para $t < 0$. Se definen sólo para el eje positivo de t .
 - Anti causales: Son 0 para $t > 0$. Se definen sólo para el eje negativo de t .
 - No causales: Se definen para ambos ejes de t .
 - Continuas: Se definen para todo tiempo t .
 - Periódicas: $x_p(t) = x_p(t \pm nT)$, donde T es el periodo y n es un entero.

- **Según su simetría:**

- Simetría Par: $x(t) = x(-t)$
- Simetría Impar: $x(t) = -x(-t)$ Una señal no simétrica puede siempre expresarse como la suma de una función par $x_e(t)$ y una función impar $x_o(t)$
: $x_e(t) = (x(t)+x(-t))/2$ $x_o(t) = (x(t)-x(-t))/2$

Algunas señales básicas comúnmente utilizadas en el procesamiento digital de señales, y también en el campo de la acústica son:

- Escalón unitario : $u(t)$
- Rampa : $r(t)=t u(t)$
- Pulso : $u(t+1/2)-u(t-1/2)$
- Triangular : $tri(t)=r(t+1)-2r(t)+r(t-1)$
- Sin c : $\sin c(t) = \sin(\pi t)/\pi t$
- Impulso: También llamada función delta o función de Dirac; los cuales puede definirse mediante: $\delta(t) = 0, t \neq 0$ o bien $\int \delta(\tau) d\tau = 1$; $[-\infty, \infty]$

2.1.2.4 Sistema

Bertran define un *sistema* es cualquier elemento capaz de procesar una señal, compuesto por dos elementos básicos: *entrada* y *salida*. Más específicamente, cuando se posee un conjunto de dispositivos (subsistemas), que bien pueden ser circuitos electrónicos, que actúan en conjunto para obtener un parámetro, estamos hablando de un *sistema* [5]. El análisis de un sistema se centra en la respuesta del mismo respecto a las señales de *entrada*. El comportamiento de un sistema respecto dicha señal permitirá predecir cuál será su salida, que bien pueden ser otras señales.

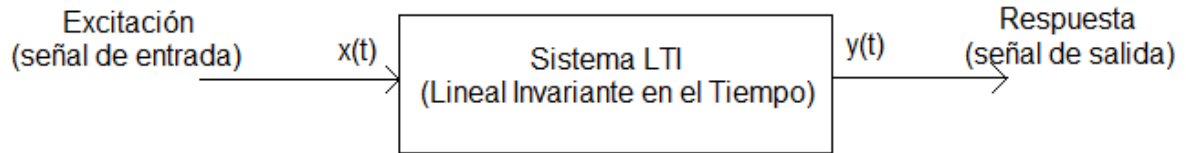
Según Oppenheim, un *sistema* puede considerarse como un proceso en el cual las señales de entrada son transformadas, o provocan que el mismo responda de alguna forma, lo que da como resultado otras señales como salidas [4].

Al igual que las señales, los sistemas pueden clasificarse en: *sistemas continuos*; donde las señales continuas de entrada son transformadas en señales continuas de salida, y *sistemas discretos*, donde las señales discretas de entrada son transformadas en señales discretas de salida.

Dentro de las propiedades de los sistemas encontramos: *causalidad*, *estabilidad*, *invariancia en el tiempo* y *linealidad*. Generalmente, la metodología ideal de trabajo se basa en sistemas que poseen las dos últimas propiedades. Dichos sistemas son llamados *Sistemas Lineales Invariantes en el Tiempo* (LTI), y pueden ser tanto *continuos* como *discretos*.

2.1.2.5 Sistemas Lineales e Invariantes en el tiempo

Puede considerarse un sistema continuo, lineal e invariante en el tiempo donde la entrada, que se conoce comúnmente como *excitación*, está representada por la señal $x(t)$ y la salida, conocida como *respuesta*, está representada por $y(t)$.



Si a un sistema se le aplica una excitación $x_1(t)$, la respuesta que se obtiene se denominará $y_1(t)$. Si se le aplica otra excitación $x_2(t)$, se obtiene otra respuesta que se denominará $y_2(t)$. Si el sistema es lineal, debe satisfacer lo siguiente:

Excitación	Respuesta
$x_1(t)$	$y_1(t)$
$x_2(t)$	$y_2(t)$
$ax_1(t)+bx_2(t)$	$ay_1(t)+by_2(t)$

Lo anterior significa que, si la excitación se multiplica por una constante, la respuesta también se multiplicará por la misma constante. Además, si se le aplica la suma de dos excitaciones diferentes, la respuesta será la suma de las respuestas a cada una de las excitaciones aplicadas en forma independiente.

Un sistema es invariante en el tiempo si satisface lo siguiente:

Excitación	Respuesta
$x_1(t)$	$y_1(t)$
$x_1(t-t_0)$	$y_1(t-t_0)$

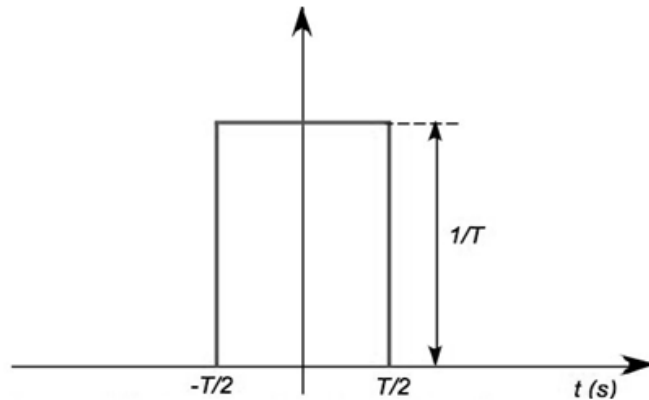
Esto significa que, si se aplica al sistema una excitación $x_1(t)$ y se obtiene la respuesta $y_1(t)$; entonces, si se aplica la misma excitación, un tiempo después, se obtiene la misma respuesta, desplazada el mismo tiempo que se desplazó la señal de excitación. Lo anterior implica físicamente que las características del sistema no cambian en el tiempo. Su respuesta cambia dependiendo de la excitación que se le aplique y la dinámica interna del sistema mismo, pero la forma en que responde a una excitación particular será siempre la misma, independiente del instante de tiempo en que se aplique dicha excitación.

Una forma de describir un Sistema Lineal Continuo e Invariante en el Tiempo es especificar su *Respuesta al impulso* [4].

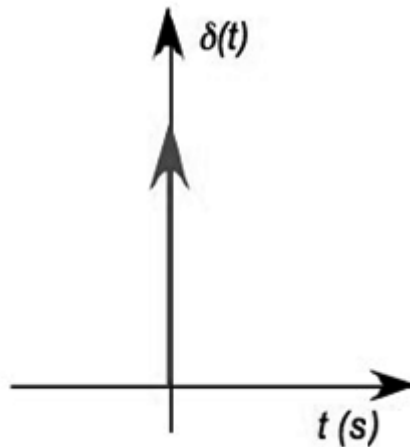
2.1.2.6 Función 'Delta de Dirac' o función 'impulso unitario'

Esta función es una abstracción matemática creada por el físico inglés Paul Dirac. Se aplica en muchas disciplinas científicas en las cuales se describen procesos mediante modelos matemáticos.

Cuando T tiende a cero se tiene un pulso rectangular con las siguientes características: su duración tiende a cero, su amplitud tiende a infinito, su área permanece constante y es igual a 1:



La representación matemática para esta función es $\delta(t)$ y se dibuja como una flecha vertical donde su altura es proporcional al área bajo el impulso.



La función *delta Dirac* no existe físicamente, pero es de gran utilidad en las disciplinas como la ingeniería y en las ciencias en general [4].

2.1.3.7 Respuesta al Impulso

Suponga que un Sistema Lineal Continuo e Invariante en el Tiempo no tiene energía almacenada internamente y se le aplica la excitación $x(t) = \delta(t)$, es decir, se la aplica como excitación un Impulso Unitario en tiempo *cero* con condiciones iniciales *cero* para el sistema. La respuesta del sistema para este caso se conoce como *Respuesta al Impulso* y se denominará $h(t)$.

A continuación se muestran varias excitaciones y sus correspondientes respuestas, sabiendo que el sistema es lineal e invariante en el tiempo:

Excitación	Respuesta
$\delta(t)$	$h(t)$
a $\delta(t)$	a $h(t)$
$\delta(t-t_0)$	$h(t-t_0)$
a $\delta(t-t_0)$	a $h(t-t_0)$

2.1.3 Acústica Virtual

2.1.3.1 Respuesta impulsiva de un recinto (RIR)

La Respuesta Impulsiva de un Recinto, denotada como *RIR*, engloba todas las características de transmisión de las ondas sonoras entre una fuente y un receptor, asumiendo que el sistema es Lineal e Invariante en el Tiempo (LTI). Para un recinto en particular, la respuesta impulsiva es diferente para cada ubicación de la dupla fuente-receptor y varía según la geometría y materiales, entre otros (Kuttruff, 1997). Desde entonces, un gran número de investigaciones se han llevado a cabo con el fin de relacionar la RIR con aspectos perceptuales concernientes con la calidad acústica de dichos espacios.

- **Parámetros Acústicos Relacionados con la RIR**

Los parámetros acústicos objetivos definidos por Beranek para salas de concierto, los cuales están a su vez con apreciaciones subjetivas, pueden ser calculados a partir de la Respuesta Impulsiva del Recinto. La Norma ISO 3382 describe los métodos relacionados con la medición del *Tiempo de Reverberación* (T_{60}) en recintos, y sugiere otra serie de parámetros que pueden ser calculados a partir de la medición de la RIR. A pesar de no existir un completo consenso acerca de los valores óptimos de dichos parámetros (en lo cual también interfiere el tipo de recinto), su conocimiento es importante para controlar el campo sonoro en el interior de los recintos y por lo tanto para la optimización del confort acústico. Dentro de tales parámetros, cabe resaltar algunos parámetros acústicos

perceptuales tales como *Claridad* (C_X), *Ancho Aparente de la Fuente* (ASW), y *Envolvimiento del Oyente* (LEV), de vital importancia en las salas de concierto.

La ISO 3382 clasifica los parámetros acústicos obtenidos a partir del *Tiempo de Reverberación* en dos grandes grupos: *Parámetros Monoaurales* y *Parámetros Binaurales*. Los *Parámetros Monoaurales* pueden evaluar la calidad y confiabilidad de la medición de la RIR del recinto y del *Tiempo de Reverberación*, así como evaluar las relaciones energéticas presentes en distintas porciones de la RIR. Algunos de los parámetros monoaurales más importantes son el *Tiempo de Reverberación*, *Early Decay Time* (EDT), T_{20} , T_{30} , *Claridad Musical* (C_{80}) y, *Strength Factor* (G) [6].

2.1.3.2 Respuesta Impulsiva Binaural

El comportamiento del ser humano respecto al sonido dentro de un recinto se da de forma *binaural*, ambos oídos, que cumplen el papel de receptores, transmiten información al cerebro, que mediante las diferencias de amplitud y tiempo presentadas en las señales que llegan a cada uno de ellos, permiten localizar con precisión una fuente sonora en el espacio. Debido a esto, es necesario, para analizar dicho comportamiento en el recinto, obtener una *Respuesta Impulsiva Binaural* (BRIR). De igual forma, factores como las protuberancias del pabellón auricular, la difracción dada por la cabeza y las reflexiones producidas por el torso y hombros del oyente, producen modificaciones espectrales en la percepción del sonido.

Schröder et. al. lograron diseñar, en 1974, lo que fueron denominadas *Mediciones Binaurales*, las cuales consistieron en obtener, a partir de la BRIR, una evaluación de la calidad acústica de salas de concierto. La *Función de Correlación Cruzada Inter-Aural* normalizada, la cual tiene en cuenta las respuestas impulsivas en las entradas de conducto auditivo del oído derecho e izquierdo, fue definida como:

$$IACF_{t_1,t_2}(\tau) = \left[\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) \cdot p_R(t + \tau) dt \right] / \left[\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt \right]$$

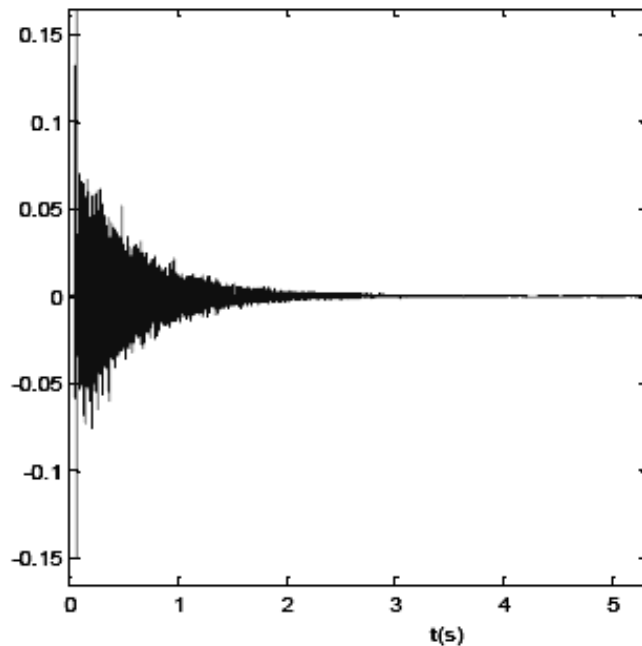
Posteriormente, fue definido el *Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural* [6].

- **Medición de Respuesta Impulsiva Binaural**

Para la medida de una Respuesta Impulsiva se pueden utilizar diversas técnicas, tales como MLS (*Maximum Length Sequence*) o IRS (*Inverse Repeated Sequence*), basadas en la excitación del espacio acústico por señales pseudo-

aleatorias cuya propiedad estocástica común es el uso de ruido blanco. Por otro lado, también se hace uso de técnicas de *barridos logarítmicos de frecuencias* (*Sine Sweep*) como señales de excitación. Mediante dichos barridos, obtenemos una señal sin distorsión armónica en la deconvolución de la Respuesta Impulsiva, ya que es posible realizar la deconvolución simultánea de la respuesta impulsiva lineal y separar selectivamente cada respuesta impulsiva correspondiente a los órdenes de distorsión armónica considerados. De esta forma, es posible obtener la RIR de la sala mediante la *convolución* de la salida medida en la sala con la señal de entrada invertida en el dominio de la frecuencia. La RIR resultante es combinación de $h(t)$ debido a las primeras reflexiones en la sala y la *cola reverberante* debido a las reflexiones tardías [7].

Figura 5. Dominios de la RIR [7]



2.1.3.3 Simuladores Cabeza-Torso (Dummy-Head) para Mediciones Binaurales

En acústica, un dummy-head, conocido también como *cabeza artificial de Kunstkopf*, es un instrumento de grabación binaural que permite capturar un campo sonoro simulando las condiciones reales en las que los seres humanos escuchamos. Se elaboran figuras humanas artificiales (*manikins*) teniendo en cuenta el estándar mundial promedio de dimensiones del cuerpo humano. Dichas figuras simulan el efecto del cuerpo humano en la transmisión y percepción sonora, por lo cual los canales auditivos de ambos oídos y se ubican transductores

de entrada en cada uno de ellos. De esta forma, las diferencias de tiempo y amplitud en la llegada de ondas sonoras a ambos oídos también son simuladas.

Los *dummy-heads* simulan la forma, tamaño y propiedades acústicas promedio de la cabeza y el cuerpo humano (pabellón auditivo, impedancia del tímpano, etc.). Este equipamiento es utilizado para mediciones acústicas y de ruido, reemplazando los micrófonos omnidireccionales. Una de las aplicaciones más comunes dadas para este equipo, es la medición de funciones HTRF (*Head-Related Transfer Functions*), empleadas en investigación de acústica espacial, donde el modelado de la escucha humana y el efecto del sistema cabeza-torso es relevante [8]. En la Figura 6 se ilustra un simulador cabeza-torso (*dummy-head*) Type 4128 de la compañía Brüel & Kjaer

Figura 6. *Dummy-head* Brüel & Kjaer Type 4128. Tomado de: <http://www.bksv.com>



2.1.3.4 Auralización

Según M. Kleiner, la auralización es un proceso de presentación audible, por modelización física o matemática del campo sonoro de una fuente en un espacio, de tal forma que se simula la experiencia sonora en una determinada posición en el espacio modelado. En principio, el objetivo no es simular la sensación del discurso o incluso la música, sino de recrear la impresión auditiva de las características acústicas de un espacio. Una auralización puede llevarse a cabo utilizando modelado acústico a escala, o bien utilizando modelado computarizado obteniendo respuestas impulsivas binaurales o funciones de transferencia de la sala. El material fuente, bien sea discurso o música, son filtrados por dichas funciones de transferencia por medio de procesamiento digital de señales [9].

Además, la presentación de la señal acústica en entorno virtual puede realizarse mediante técnicas de procesamiento de señal y reproducción sonora. Entre las técnicas más conocidas de representación sonora encontramos: técnicas binaurales mediante el uso de los HRTF (Head-Related Transfer Function), técnicas estéreo con cancelación cross-talk, técnicas de 'panning', otras técnicas multicanal (ambisonics, WFS, multicanal 5.1, etc). Estas técnicas permiten analizar, entre otras aplicaciones, la localización del sonido en salas [10].

La auralización da la oportunidad de simular la experiencia acústica en cualquier punto de una sala, incluso es una herramienta fundamental para evaluar la calidad del ambiente acústico de la sala antes de ser construida [11].

- **Técnicas de Auralización**

Hoy en día, se cuenta con cuatro técnicas básicas de auralización [9]:

- **Auralización enteramente computarizada:** a partir del modelo de la sala, se determina la respuesta impulsiva (RIR) y de ella su correspondiente binaural (BRIR). A partir de ella y mediante procesamiento de la señal ésta puede ser convolucionada (por medio de filtros digitales) con muestras de audio anecoicas.
- **Auralización computarizada utilizando múltiples altavoces:** en este tipo de auralización, el sistema de convolución debe contar con varios canales de conversión digital-análogo (D/A), los cuales reemplazan el retraso y la reverberación en el simulador básico mediante arreglos de múltiples altavoces.
- **Auralización directa a partir de un modelo a escala:** mediante el modelo físico a escala y usando técnicas ultrasónicas, se realizan un escalado directo permitiendo una convolución en tiempo real.
- **Auralización indirecta a partir de un modelo a escala:** con el modelo físico a escala y usando también técnicas ultrasónicas, se obtiene, en primer lugar, la respuesta impulsiva binaural de la sala. La convolución, en este caso, es realizada tal y como en la *Auralización Enteramente Computarizada*.

2.1.3.5 Efecto Cross-talk y Sistema de Reproducción 'Stereo Dipole'

Bajo ciertas circunstancias, es posible dar al oyente la impresión de que hay una fuente sonora en una posición dada en el espacio ('fuente virtual') cuando no

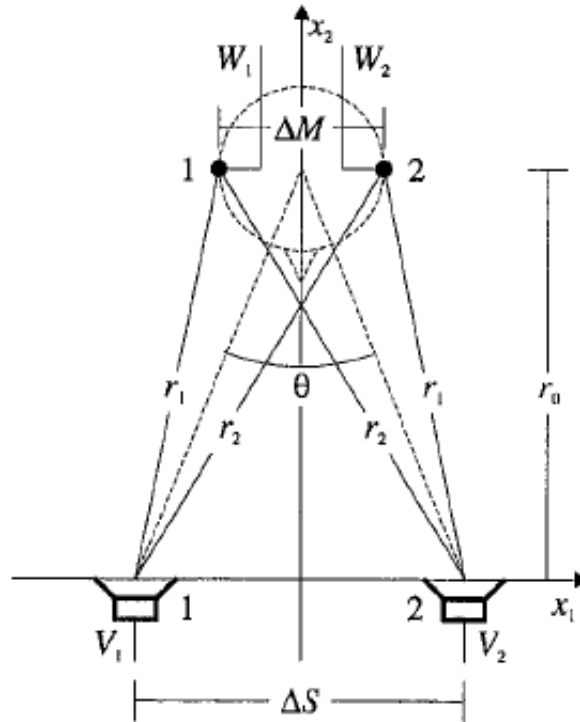
existe una fuente real en tal punto. Una forma de conseguirlo es garantizando que las presiones sonoras que son reproducidas en los oídos del oyente sean las mismas que las presiones sonoras que habrían sido producidas por una fuente real en la misma posición de la fuente virtual. Cuando dos altavoces son utilizados para la reproducción, esto puede lograrse con el uso de técnicas de procesamiento digital de señales con el fin de compensar el *Efecto Cross-talk*.

Cross-talk, en el contexto de la reproducción sonora, es tradicionalmente interpretado como un sonido reproducido en una locación donde no se pretende que sea escuchado. Por ejemplo, cuando una grabación realizada con un dummy head es reproducida a través de dos altavoces, el sonido emitido desde el altavoz derecho, y escuchado en el oído izquierdo, es cross-talk, y viceversa. Sin embargo, esta definición de cross-talk no toma en cuenta la influencia de la cabeza del oyente en el campo sonoro incidente. Como consecuencia, la palabra *generalizado* es agregada para caracterizar sistemas que permiten la inclusión de funciones HRTF reales. Así, el propósito de un *sistema generalizado de cancelación de cross-talk* es ser capaz de producir, con la mayor precisión, una señal específica en uno de los oídos del oyente mientras no haya señal alguna reproducida en el otro. Una vez que este objetivo se cumple, cualquier par de señales binaurales puede ser producido en los oídos del oyente. Uno de los tipos básicos de señales binaurales utilizados en el proceso son señales capturadas por un dummy-head.

El primer método de cancelación del efecto *cross-talk* fue patentado por Atal en 1966, el cual estaba basado en un modelo de campo libre que no tenía en cuenta la presencia del oyente en el campo sonoro. Desde entonces, se han desarrollado métodos más sofisticados basados en procesamiento digital de señales, dentro de los cuales se encuentran los sistemas *generalizados de cancelación de cross-talk* más avanzados.

En la Figura 7 se describe geométricamente la configuración de un sistema de reproducción de dos altavoces. Dos altavoces, separados por una distancia ΔS , se posicionan en el eje x_1 simétricamente con el x_2 . Se asume que el oyente se ubica a una distancia r_0 directamente en frente de los altavoces. Los oídos del oyente son representados por dos micrófonos, separados por una distancia ΔM , y que también se posicionan simétricamente sobre el eje x_2 . Los altavoces abarcan un ángulo θ respecto a la posición del oyente. Sólo dos de las cuatro distancias entre los altavoces y los micrófonos son diferentes; r_1 es la más corta (el camino 'directo'), y r_2 es la más larga (la trayectoria *cross-talk*). Las entradas de los altavoces izquierdo y derecho son definidas como V_1 y V_2 respectivamente, y las salidas de los mismos son denotadas como W_1 y W_2 respectivamente.

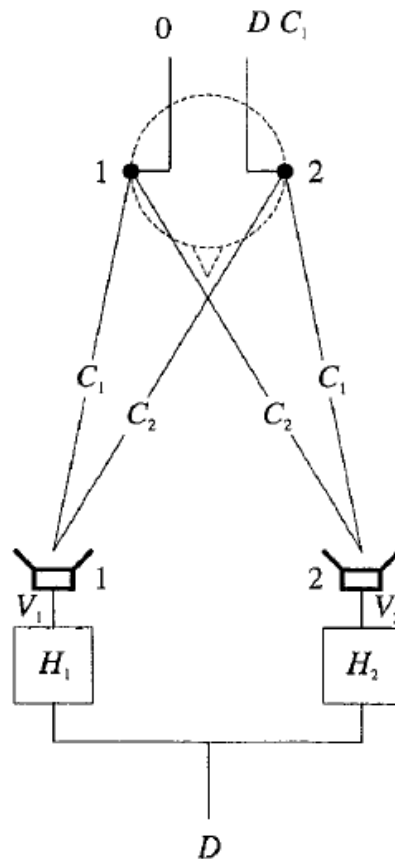
Figura 7. Diagrama geométrico de arreglo de reproducción altavoz/micrófono [12]



El objetivo del sistema de reproducción es obtener una perfecta cancelación del efecto *cross-talk*. Esto implica, que si se quiere reproducir un par de señales W_2 (que pueden denotarse como D_1 y D_2) a través de los altavoces V_1 y V_2 en los puntos W_1 y W_2 de forma efectiva creando una imagen virtual óptima, la trayectoria *cross-talk* de dichas señales debe ser cancelada.

Una perfecta cancelación *cross-talk* requerirá que mientras una señal sea reproducida perfectamente en un oído del sujeto, nada sea percibido en el otro. Por lo cual, si queremos reproducir la señal D_2 en el oído izquierdo del sujeto, la señal D_1 debe ser igual a cero. Para que estas condiciones ocurran, es necesario realizar un proceso que permita obtener una cancelación efectiva del efecto *cross-talk*, el cual es denotado como H (Figura 8). Esto es posible por medio de Filtros Digitales, los cuales pueden ser diseñados a través del dominio del tiempo o de la frecuencia. Kirkeby demostró, a través del diseño de un filtro de este tipo, el cual involucra funciones de transferencia HTRF (*Head-related Transfer Functions*) y FFT (*Fast Fourier Transform*), que la optimización de dicha cancelación se logra con un ángulo de 10° entre los altavoces [12].

Figura 8. Diagrama de arreglo de reproducción altavoz/micrófono aplicando proceso de filtrado [12]



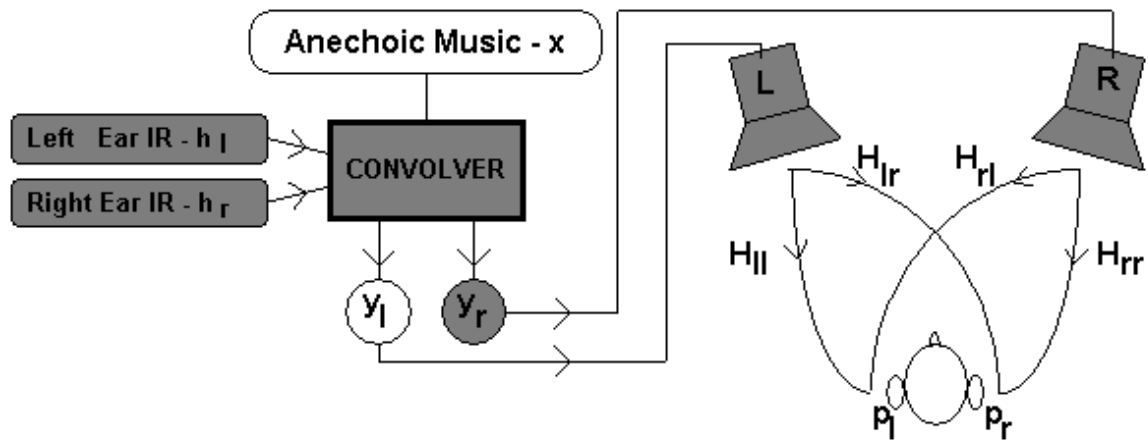
Éste sistema de reproducción brinda un ancho de banda útil y una cancelación *cross-talk* efectiva, además de brindar una ilusión de fuente virtual de alta eficiencia, y un mayor *sweet spot* menos sensible al movimiento de la cabeza del oyente. Otra característica importante del sistema es que genera una diferencia de tiempo correcta y precisa entre los dos oídos, lo cual es un punto fundamental relacionado con el mecanismo humano de localización [10].

2.1.3.6 Auralización con Aurora Plugins

La suite de plugins de Aurora, diseñada por Angelo Farina, permite realizar un gran número de procesos digitales enfocados a investigación en el campo de la acústica virtual. Los procesos de *cross-talk cancellation* y *convolución*, son de vital relevancia en el proceso de auralización utilizado para la simulación de campos sonoros de la Sala de Conciertos de la Biblioteca Luis Ángel Arango, objeto de estudio de esta investigación, y posteriormente para la reproducción de estos campos sonoros en el Test de Preferencia Subjetiva.

En la Figura 9 se ilustra un diagrama de los procesos realizados por los plugins Aurora para la reproducción de campos sonoros en Auralización.

Figura 9. Diagrama de procesos de Aurora Plugins. Tomado de: <http://www.aurora-plugins.com/>



2.1.3.7 Teoría de Preferencia Subjetiva: Proceso y Aplicación

La teoría y conceptos de acerca de la aplicación de la Teoría de Preferencia Subjetiva puede encontrarse en *Theory of subjective preference for sound fields in concert halls: Process and application*, publicación de Shin-ichi Sato [13].

La teoría de preferencia subjetiva describe un método de cálculo para distintos parámetros acústicos que afectan el nivel de preferencia respecto a un campo sonoro en una sala de conciertos. Investigaciones sistemáticas de juicio subjetivo (pruebas de comparación por pares) en campos sonoros simulados presentan los cuatro factores ortogonales que determinan los valores en escala lineal de preferencia subjetiva. En teoría, el tipo de fuente sonora que puede ser caracterizado por la *Función de Autocorrelación* afecta la condición preferida de campos sonoros.

Es importante identificar la evaluación de la influencia subjetiva de los factores ortogonales que crean un excelente campo sonoro en una sala de concierto. Ando realizó investigaciones sistemáticas para encontrar los factores ortogonales en la preferencia subjetiva para campos sonoros y describe cuatro factores ortogonales físicos (el nivel de sonoridad LL, el espacio de tiempo del retardo inicial ITDG o Δt_1 , el tiempo de reverberación subsecuente T_{sub} , y la correlación cruzada interaural IACC), los cuales determinan los valores en escala lineal de preferencia

subjetiva para campos sonoros. La teoría establecida en los campos sonoros simulados ha sido confirmada en salas actuales.

La teoría ha sido aplicada para diseño acústico de conciertos para determinar la forma del techo, el ángulo de las paredes, y el arreglo de las columnas circulares como difusores. Estos campos diseñados por la teoría han sido confirmados por las mediciones acústicas luego de la medición. Los valores de preferencia en escala lineal que han sido obtenidos de los juicios subjetivos con un número de sujetos pueden ser aplicados a la preferencia de cada individuo. Para aumentar la satisfacción individual, fue implementado un sistema de selección de silla basado en la preferencia subjetiva individual de campos sonoros [13] [14].

- **Proceso**

Considerando la transmisión del sonido desde una fuente puntual en campo libre a canales de entrada binaural, las señales de sonido entrantes están expresadas por:

$$f_{l,r}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} p(t) * A_n w_n (t - \Delta t_n) * h_{nl,r}(t) \quad (1)$$

Donde $p(t)$ es la señal de entrada como una función del tiempo, A_n es la amplitud de presión de la n -ésima reflexión; w_n es la respuesta al impulso de las paredes por cada línea de reflexiones que llegan al oyente. Δt_n es el tiempo de retardo de las reflexiones relativas al sonido directo; y $h_{nl,r}(t)$ son respuestas impulsivas por difracción de la cabeza y el pabellón auricular de la dirección del sonido por cada reflexión.

Todos los factores que afectan en cualquier atributo subjetivo a la sala deben ser incluidos dentro de los niveles de presión sonora entrantes al oído (expresadas en la ecuación (1)). El primer ítem importante que depende del programa de la fuente sonora es la señal sonora $p(t)$. Ésta es representada por la función de auto-correlación (ACF). El segundo ítem es el paquete de respuestas impulsivas de las paredes reflejantes. Dos paquetes de respuestas al impulso relacionadas a la cabeza para los dos oídos $h_{nl,r}(t)$ constituyen el ítem objetivo restante.

Cuatro factores físicos ortogonales han sido identificados desde la investigación sistemática de campos sonoros simulados por computador y pruebas de escucha (pruebas por comparación por pares). Música anecoica fue usada para simular campos sonoros de los cuales los parámetros físicos independientes pueden ser determinados. Los campos sonoros con varias combinaciones de niveles de escucha, retardos de múltiples reflexiones tempranas, tiempo de reverberación subsecuente y la magnitud de la correlación cruzada interaural fueron simulados por medio de la ayuda de una computadora. La Ley de Juicio Comparativo permite establecer los valores de preferencia subjetiva en escala lineal. Los principales

objetivos de diseño pueden ser descritos en términos de la preferencia subjetiva de la calidad sonora, la cual está relacionada al criterio de comprensión que consiste en parámetros temporales y espaciales que describen las señales sonoras de los dos oídos.

Un campo sonoro con una única reflexión fue investigada basada en el tiempo de retardo y en la dirección de la reflexión [15]. Se encontró que el tiempo de retardo preferido de una reflexión depende fuertemente de la señal musical, la cual puede ser caracterizada por la duración efectiva de la función de auto-correlación τ_e . La preferencia subjetiva en escala lineal de la dirección de una reflexión corresponde al IACC. La preferencia subjetiva de campos sonoros con múltiples reflexiones fueron también investigadas. La preferencia subjetiva del tiempo de retardo de múltiples reflexiones puede ser descrita por el tiempo de retardo de la reflexión más significativa y la amplitud total de las reflexiones. Entonces, la preferencia subjetiva de campos sonoros con reflexiones y las reverberaciones han sido investigadas [16]. La relación entre el tiempo de retardo preferido de las reflexiones y de la función de auto-correlación de las señales musicales fue también confirmada en campos sonoros con reverberación. El tiempo de reverberación preferido puede ser descrito por el τ_e de la señal de la fuente.

- **Valores de preferencia en escala lineal**

La teoría de preferencia subjetiva para cada silla en una sala de concierto es descrita basada en los valores de preferencia en escala lineal, los cuales han sido obtenidos usando la Ley de Juicio Comparativo. Además, las unidades derivadas de estos experimentos con diferentes fuentes sonoras y diferentes sujetos fueron casi iguales, así que los valores en escala lineal deben ser sumados bajo

$$S \approx s_1 + s_2 + s_3 + s_4 \quad (2)$$

Donde S_i ($i = 1, 2, 3, 4$) es el valor lineal obtenido en relación a cada parámetro objetivo, el cual está descrito en la Ecuación (2). Si el valor escalar es relativo, es conveniente igualar a cero para las condiciones preferidas.

De acuerdo al comportamiento de los valores en escala lineal respecto a los parámetros objetivos, la expresión resultante está dada por

$$s_i \approx -\alpha_i |x_i|^{3/2} \quad (3)$$

Donde el parámetro x_i y los coeficientes α_i (obtenidos con un número de sujetos).

Tabla 4. Cuatro factores ortogonales de un campo sonoro, y sus respectivos coeficientes α_i descrito con la Ecuación (3)

		α_i	
	x_i	$x_i > 0$	$x_i > 0$
1	$LL - [LL]_p$ [dB]	0.07	0.04
2	$\text{Log}_{10}(\Delta t_1 / [\Delta t_1]_p)$	1.42	1.11
3	$\text{Log}_{10}(T_{\text{sub}} / [T_{\text{sub}}]_p)$	$0.45 + 0.75A$	$2.360.42A$
4	IACC	1.45	-

LL es la presión sonora en la silla y $[LL]_p$ es la presión sonora preferida asumida en una silla en particular, por ejemplo, una posición frontal en el eje central. La aproximación para el tiempo de retardo preferido ha sido expresada en términos de τ_e y la amplitud total de las reflexiones A.

$$[\Delta t_1]_p \approx (1 - \log_{10} A) \tau_e \quad (4)$$

El tiempo de reverberación preferido, es expresado aproximadamente por

$$[T_{\text{sub}}]_p \approx 23 \tau_e \quad (5)$$

Los valores de preferencia en escala lineal han sido formulados aproximadamente en términos de 3/2 de potencia de los factores normalizados.

- **Diferencia individual y sistema de selección de silla**

Los valores en escala lineal de preferencia subjetiva pueden ser aplicados también a la preferencia de cada individuo. La preferencia subjetiva individual es identificada por dos factores desde las curvas de preferencia subjetiva obtenidas de las pruebas de comparación por pares. Un factor es el valor al valor mayormente preferido, el cual coincide con el pico de las curvas de preferencia. El otro es la agudeza de la curva, α , el cual es un indicativo del grado de preferencia. Los resultados de las pruebas de preferencia para cada individuo han sido

discutidos en términos de diferencias inter-individuales para el SPL y el tiempo de reverberación. La investigación demuestra que el sujeto con pequeña diferencia inter-individual tiene un valor crítico de preferencia indicando un valor significativo de α_i en la Ecuación (3). Por otra parte, el valor preferido para el sujeto con un pequeño valor de α_i es apenas determinado.

Un sistema de selección de silla es introducido para maximizar la preferencia de cada individuo respecto al campo sonoro descrito por los cuatro factores ortogonales. Las pruebas de preferencia se realizaron en un cuarto de escucha simulando el campo sonoro con múltiples altavoces. La prueba de comparación por pares puede usarse para obtener los parámetros más preferidos. Las pruebas de preferencia se realizan con varias muestras musicales.

Un área de sillas donde la preferencia individual es máxima puede encontrarse. Las grandes diferencias individuales en el mayor LL preferido son relacionadas con el nivel de escucha individual. El retardo de tiempo inicial y el tiempo de reverberación preferidos están asociados con una preferencia individual de viveza. Generalmente, los valores preferidos de LL, Δt_1 y T_{sub} para cada individuo son diferentes, pero para todos es preferible un valor pequeño de IACC.

2.1.3.8 Ley de Juicio Comparativo: Análisis por Escalamiento Lineal de Thurstone

Según Thurstone [17], es posible realizar un ordenamiento de objetos a lo largo de un continuo psicológico. El sistema sensorial humano emite reacciones a diversos estímulos, que son llamados objetos psicológicos. Una explicación del método de ordenamiento propuesto por Thurstone, aplicada por Vicent González i Romà, investigador en psicometría de la Universitat de Valencia [18], se expone en el ANEXO A. El documento presenta el *método de comparación por pares (Caso V)* el cual permite hallar las distancias entre estímulos en una escala, el cual parte de las elecciones derivadas de una lista de comparaciones entre estímulos. En este caso, los estímulos corresponderán a los campos sonoros simulados mediante auralización, los cuales son comparados por los sujetos en el Test de Preferencia Subjetiva realizada en la sala de pruebas de escucha. El análisis matricial expuesto por González permite definir los valores de preferencia para cada campo sonoro.

2.2 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

2.2.1 Norma ISO 3382: Acústica – Medición del tiempo de reverberación de salas con referencia a otros parámetros acústicos.

Es la norma internacional que describe los métodos de medición del tiempo de reverberación en recintos. Se describen dos métodos de medición: método de

ruido interrumpido y método de la respuesta impulsiva integrada. Para cada método son descritas las características de la fuente y señal de excitación del recinto, así como el número de mediciones por punto. Son estipuladas previamente las condiciones del ambiente de medición óptimas para la aplicación de los métodos, de igual forma se describe el equipamiento necesario para las mediciones y sus características técnicas. La norma incluye una descripción de los métodos de evaluación de los datos obtenidos, y la forma de presentación de los mismos en tablas y curvas. Una lista de ítems que debe contener el informe del ensayo de las mediciones también es descrita en la norma. Los anexos incluyen definiciones de parámetros acústicos relacionados con el tiempo de reverberación, así como la descripción de métodos de medición para los mismos, entre ellos la medición de parámetros binaurales en auditorios derivados de respuestas impulsivas.

2.2.2 Norma IRAM 4070: Ruidos – Procedimiento para su evaluación utilizando los perfiles ‘NC’ y ‘RC’

Norma argentina que describe el proceso de evaluación del ruido de fondo presente en un recinto de acuerdo a las curvas NC y RC, las cuales estipulan los niveles máximos permisibles de ruido en los recintos según su uso. Los niveles de ruido a evaluar, por bandas de octava, deben ser obtenidos previamente con una medición realizada en el recinto, donde se entran a evaluar también los ruidos provenientes del exterior. Los ruidos que se excluyen de dicha evaluación son los ruidos originados por actividades realizadas en el interior del recinto, y los ruidos externos atípicos. Analizar el nivel de ruido de fondo de un recinto brinda información importante acerca de las condiciones acústicas del recinto, además de ser la base de un ambiente de medición óptimo para la obtención de los parámetros acústicos.

2.2.3 Norma NTC 1486: Documentación – Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación

Norma colombiana que describe los requisitos de presentación de trabajos de grado y otros proyectos de investigación. Se brindan todas las condiciones y especificaciones técnicas de un documento de este tipo; las partes, indicaciones para la redacción, cuerpo del documento, etc.

3. METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es **Empírico-Analítico**, ya que ésta se centra específicamente en la información que brindarán mediciones acústicas realizadas de forma *in situ* en un recinto, y de pruebas psicológicas hechas con una muestra poblacional determinada. A toda esta información se le dará un uso netamente técnico y una interpretación desde el punto de vista de la acústica arquitectónica y la psicoacústica.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN USB/SUB-LÍNEA DE FACULTAD/CAMPO TEMÁTICO

3.1.1 Línea de Investigación

La línea de investigación del proyecto es **Tecnologías Actuales y Sociedad**, ya que se utilizarán conocimientos y herramientas en materia de acústica arquitectónica y psicoacústica para su desarrollo, todo con un impacto social y cultural.

3.1.2 Línea de Investigación de Facultad

La sub-línea de facultad será **Análisis y Procesamiento de Señales**, debido a que se hará uso de software y lenguaje de programación que permita la manipulación de señales sonoras obtenidas en las respectivas mediciones acústicas.

3.1.3 Núcleos Problémicos

Los núcleos problemáticos del proyecto son: **Acústica y Audio** teniendo en cuenta que se realizarán mediciones de tipo acústico en recintos, las cuales tendrán en cuenta para su desarrollo procedimientos de reproducción, captura y almacenamiento de señales de audio. **Análisis y procesamiento de señales**, debido a que para el análisis de parámetros acústicos y la auralización de los recintos objeto de estudio, será necesario el procesamiento por software de las respuestas impulsivas obtenidas en los mismos.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

TÉCNICA	DESCRIPCIÓN
Levantamiento arquitectónico de recintos	Se obtendrán datos de longitudes correspondientes a las distintas características de la infraestructura del recinto, con el fin de poder elaborar sus respectivos planos arquitectónicos
Mediciones acústicas	Se realizan registros sonoros con un Medidor de Nivel Sonoro tipo 2 para obtener datos de nivel de presión sonora SPL. A su vez se utilizará un simulador cabeza-torso para capturas binaurales.
Encuestas en pruebas de preferencia	Se recopilarán datos de preferencia de las personas respecto a su juicio aplicado en Pruebas de Comparación de Pares, donde se realizará la comparación de campos sonoros simulados por un proceso de auralización
Programación de software	Según los resultados de las mediciones acústicas y pruebas de preferencia, será posible la creación de un software para la aplicación de dichas pruebas de manera virtual.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

El proyecto está dirigido a la comunidad académica de Ingeniería de Sonido en la Universidad de San Buenaventura en general, y a todo estudiante o profesional que se desempeñe en el área de la Psicoacústica y Acústica Arquitectónica. Personas con experiencia musical y personas encargadas de gestar eventos culturales en salas de concierto también pueden estar interesadas en la metodología y aplicabilidad del proyecto.

3.5 HIPÓTESIS

Es posible demostrar la importancia del juicio subjetivo de la audiencia en la evaluación de la calidad acústica de salas de concierto a través de la

implementación la Teoría de Preferencia Subjetiva bajo métodos alternativos de medición.

3.6 VARIABLES

3.6.1 Variables Independientes

- Los métodos de medición aplicados para la obtención de parámetros acústicos monoaurales y binaurales en las salas de concierto estudiadas.
- Los métodos de aplicación de las pruebas de preferencia, los cuales incluyen la implementación del sistema de reproducción y simulación de campos sonoros.
- El estado actual de las salas analizadas respecto a factores como tamaño, forma, geometría y acondicionamiento acústico interior.

3.6.2 Variables Dependientes

- El nivel de preferencia de las personas respecto a los distintos campos sonoros presentes en las salas de concierto que constituyen el objeto de estudio del proyecto.
- Los valores de parámetros acústicos monoaurales y binaurales obtenidos para las salas estudiadas.

3.7 DESCRIPCIÓN DE LA SALA DE ESTUDIOS: SALA DE CONCIERTOS DE LA BIBLIOTECA LUIS ÁNGEL ARANGO

La Sala de Conciertos de la Biblioteca Luis Ángel Arango de Bogotá es uno de los escenarios insignia para la música de cámara en Colombia. Fue fundada en 1966, año en el cual fue galardonada con el Premio Nacional de Arquitectura. Actualmente, recibe artistas nacionales e internacionales, y su cronograma anual se conforma por aproximadamente cien eventos, los cuales hacen parte de cinco ciclos: Músicas del mundo, Música antigua para nuestro tiempo, Recorridos por la música de cámara, Música y músicos de Colombia, Música y músicos de Latinoamérica, La música de nuestra época, Grandes intérpretes y Tiempos de Jazz.

3.7.1 Características del diseño arquitectónico

El diseño arquitectónico de la sala fue pensado con el fin de obtener una independencia del volumen acústico de la misma respecto al volumen arquitectónico exterior, así como un alto nivel de aislamiento; teniendo en cuenta que la sala está ubicada al interior de un edificio utilizado como biblioteca. Las

paredes y techo fueron tratadas como elementos reflejantes y absorbentes según las necesidades de reducción de la energía acústica y orientación de las ondas reflejadas. Un volumen acoplado, ubicado en la parte superior de la tarima principal (Figura 10), fue construido para la instalación del órgano tubular que hace parte del equipamiento de la sala. De esta forma, los tubos de dicho órgano, se encuentran orientados hacia el área de audiencia. Su escenario (el cual se ilustra en la fotografía de la Figura 11) es ideal para albergar interpretaciones de grupos musicales de hasta 15 integrantes, y su capacidad es de 367 sillas.

Figura 10. Vistas de la Sala de Conciertos. Tomado de: Revista *Escala*. Edición 18/19

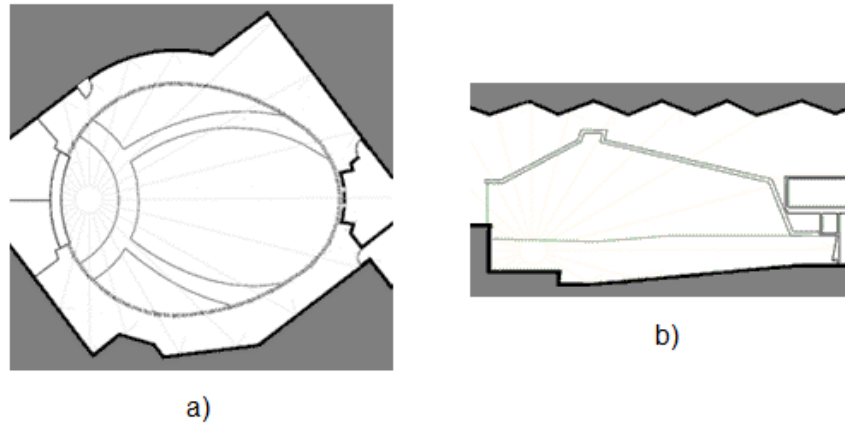
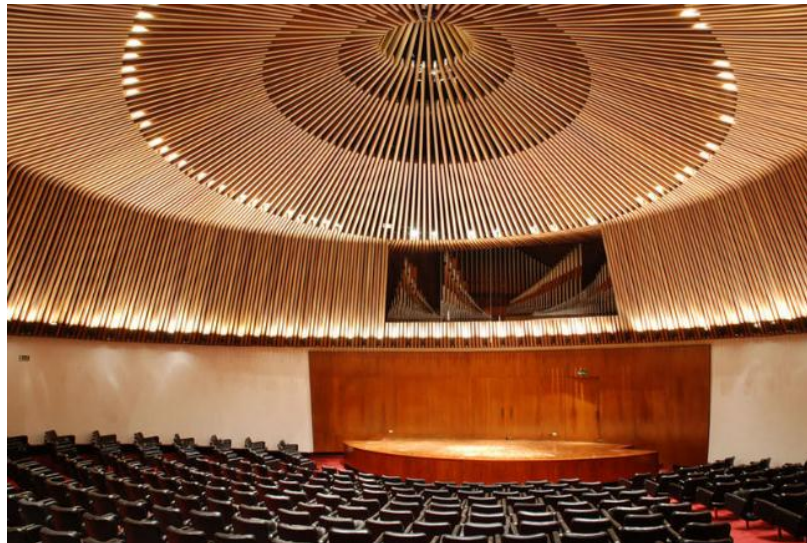


Figura 11. Fotografía del escenario central



3.8 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS

Para la sala objeto de estudio, es necesario realizar, previo a las mediciones orientadas a Preferencia Subjetiva, un análisis arquitectónico y acústico clásico, consistente en la medición de los parámetros acústicos relacionados con su acondicionamiento (volumen y superficies).

3.8.1 Levantamiento arquitectónico

Previamente a las mediciones, debe realizarse un levantamiento arquitectónico de la sala, con el fin de obtener información acerca de su volumen y todas las superficies que hacen parte de su acondicionamiento. De igual forma, los planos arquitectónicos permiten realizar una óptima planeación de las mediciones, respecto a la información requerida sobre puntos eléctricos, posiciones de medición de ruido de fondo, posiciones de fuente y posiciones de micrófono.

Mediante el levantamiento también se obtendrán los planos arquitectónicos que serán la base para la elaboración de los *Mapas de Preferencia*, los cuales indicarán los niveles de Preferencia Subjetiva para las distintas ubicaciones de la audiencia. Los planos arquitectónicos serán elaborados en versión digital (CAD).

3.8.2 Instrumental de medición

Para las mediciones de parámetros acústicos se requiere el siguiente instrumental:

- Medidor de nivel sonoro tipo 2 Svantek 943A
- Interfaz de grabación M-Audio Fast Track Pro
- Micrófono de medición Gold Line Tef 04
- Computador portátil con software de captura Adobe Audition 3.0
- Fuentes impulsivas normalizadas (Globos de aire genéricos)
- Cables y conexiones
- Flexómetro
- Medidor de distancias láser Leica Disto D2

3.8.3 Metodología de medición

La metodología de medición se realiza de acuerdo con la norma ISO 3382. El método de medición convencional, utilizado para este tipo de recintos, es el *Método de la respuesta impulsiva integrada*. A continuación se describe el protocolo de medición:

- Medición de nivel ruido de fondo, realizada en diversos puntos de la sala. Con los datos de todos los puntos medidos, se realizará un promedio de los niveles de presión sonora obtenidos para obtener el nivel total, al igual que

un análisis de nivel de ruido por banda de 1/3 de octava para analizar el recinto mediante el criterio de Curvas NC.

- Calibración de nivel de salida de la fuente sonora, teniendo en cuenta el nivel de ruido de fondo obtenido, el cual debe superarse en 45dB. Sin embargo, la norma estipula que dicho valor puede disminuir gracias a la señal de excitación escogida para las mediciones.
- La excitación del recinto será realizada a través de la explosión de los globos de aire en diversas posiciones dentro de la sala, donde cada explosión provocará un impulso de alto contenido energético. Cada impulso será capturado con el micrófono de medición Tef 04 en cada posición, y registrado en el software Adobe Audition a través de la interfaz de audio M-Audio Fast Track Pro.

La Figura 12 muestra el diagrama del diseño experimental para las mediciones de *tiempo de reverberación* de la sala, de acuerdo con el protocolo mencionado:

Figura 12. Diagrama. Medición de *tiempo de reverberación*



La señal de excitación y las capturas realizadas permitirán hallar la *respuesta impulsiva* del recinto en todas las posiciones de fuente y micrófono. La respuesta impulsiva permitirá obtener el *tiempo de reverberación* de la Sala, junto con todos los parámetros acústicos asociados con el mismo.

3.9 MEDICIÓN BINAURAL ORIENTADA A IMPLEMENTACIÓN DE PREFERENCIA SUBJETIVA

En cada silla de la sala es necesaria la medición de una respuesta impulsiva binaural, con el fin de obtener los parámetros acústicos necesarios para la

auralización y análisis de Preferencia Subjetiva, los cuales son únicos para cada ubicación.

3.9.1 Instrumental de medición

Para las mediciones de parámetros acústicos binaurales se requiere el siguiente instrumental:

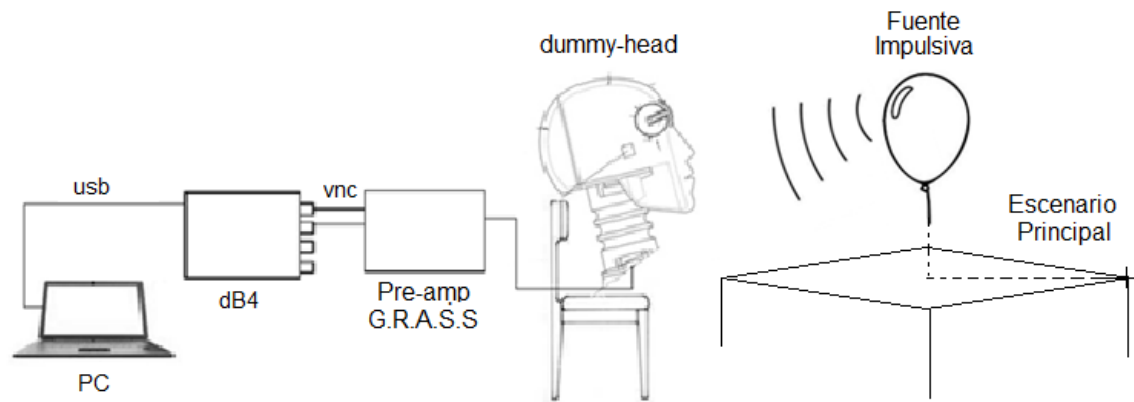
- Globos de aire (Fuente sonora)
- Medidor de Nivel Sonoro Tipo 2 Svantek 943A
- Micrófono Binaural (simulador cabeza-torso) 01dB
- Preamplificador G.R.A.S.S
- Interfaz 01dB dB4
- Computador portátil con software de medición EASERA y Adobe Audition
- Flexómetro
- Medidor láser Leica Disto D2
- Cables y conexiones

3.9.2 Metodología de medición

El método adoptado de medición de parámetros binaurales orientados al análisis de Preferencia Subjetiva es el método implementado por Fujii y Ando [19]; en el cual, para la captura de las *respuestas impulsivas binaurales* es utilizado un método de Barrido Logarítmico (*sine sweep*). Una fuente sonora omnidireccional debe ser la encargada de realizar la excitación de la sala, ubicada en el centro del escenario (como se muestra en la Figura 13). El barrido abarca el espectro audible entre 40Hz y 20KHz, con una duración de 10s. En las ubicaciones de la audiencia se utiliza un Simulador Cabeza-Torso (*dummy-head*) como micrófono binaural, con el fin de simular la posición de escucha real. La altura de los micrófonos es calibrada a 1.1m. La configuración de grabación para las mediciones utiliza una frecuencia de muestreo de 48 KHz y una resolución de 32 bits.

El método fue implementado con variantes en su aplicación. Debido a la falta de una fuente omnidireccional (dodecaedro), se utilizarán globos de aire como señal impulsiva de excitación. La configuración de captura para el sistema de grabación del *dummy-head* (dBFA Suite) utiliza una frecuencia de muestreo de 51200 Hz, y una resolución de 32 bits. De igual forma, la señal capturada posee, previo a la captura en la interfaz de audio (analizador en tiempo real), una etapa de pre amplificación.

Figura 13. Diagrama. Medición de parámetros binaurales



3.10 SOFTWARE

3.10.1 EASERA 1.0

El software utilizado para el procesamiento de señales será EASERA (Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis), desarrollado por la compañía alemana Anhert Feistel Media Group en colaboración con SDA Software Design Anhert, y el cual posee herramientas de análisis de señales, medición y análisis electro-acústico.

EASERA permite realizar calibraciones de un sistema de medición acústico, con un sistema interno de compensación de respuesta en frecuencias de los sistemas de transducción utilizados (micrófonos y altoparlantes), permite generar señales de excitación tales como *sine sweeps*, MLS, ruido (blanco y rosa) y tonos puros. A su vez, permite realizar un análisis de señal en tiempo real, en modos de visualización tales como *respuesta en frecuencia* y *espectrograma*, permitiendo también aplicar filtros de ponderación A, B y C.

La evaluación o análisis en EASERA puede realizarse para cálculo de respuestas impulsivas, visualización Schroeder, tiempo de reverberación, respuesta en frecuencia, diagrama en cascada, respuesta de fase, espectro de distorsión armónica, inteligibilidad de la palabra, entre otros.

Todas las operaciones de post-procesamiento de señales son proporcionadas por EASERA tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

3.10.2 dBFA Suite

Es la plataforma de software utilizada como soporte para cualquier equipo de medición 01dB-Metravib. Ejecuta análisis en tiempo real de señales de ruido y vibraciones. Cuenta con una etapa de grabación/análisis en tiempo real, así como una herramienta de post-procesamiento avanzado. El software, junto con la interfaz dB4, conforma la estación digital de medición binaural del *dummy-head* 01dB.

3.10.3 Adobe Audition - Versión 3.0

Audition, de Adobe Corporation, proporciona las herramientas profesionales necesarias para dotar del mejor sonido a todo tipo de producciones de vídeo y audio. Permite gestionar de forma eficaz una amplia gama de tareas de producción de audio, incluidas la grabación, mezcla y restauración de sonido. Es uno de las aplicaciones de edición de audio más utilizadas en la industria. El software permite, desde el sitio web de Adobe, descargar el programa en modo de prueba, el cual no posee limitaciones para el uso de sus herramientas durante dicho período.

3.10.4 Aurora Plugins - Versión 4.0

Aurora es una suite de plugins diseñados para el software Adobe Audition, los cuales permiten medir y manipular respuestas impulsivas de recintos para la recreación de simulaciones audibles tridimensionales de espacios acústicos.

La combinación Audition + Aurora convierte un computador de bajo costo con una buena tarjeta de sonido en un completo y versátil sistema de medición y reproducción, lo cual es ideal para una estación de trabajo de análisis acústico de recintos.

Las principales herramientas de Aurora incluyen: Convolución de muestras anecoicas con respuestas impulsivas binaurales, Generador de señales de excitación sine sweep y MLS, Deconvolución de respuestas impulsivas, Filtros de cancelación del efecto *Cross-talk* para reproducción de señales binaurales, Filtro Inverso de Kirkeby, Análisis de respuestas impulsivas según ISO 3382, Cálculo de *tiempo de reverberación* y parámetros acústicos relacionados, entre otros. Las herramientas mencionadas son ideales para el desarrollo de la auralización de salas de concierto del proyecto.

3.10.5 Muestras de Música Anecoica

Las muestras de música anecoica utilizadas para la auralización de la Sala fueron proporcionadas por un grupo de investigación dirigido por Tapio Lokki, profesor del

Aalto University School of Science and Technology de la ciudad de Espoo, Finlandia. El desarrollo del proyecto '*Anechoic recording system for symphony orchestra*' (Sistema de grabación anecoica para orquestas sinfónicas) permitió obtener muestras de audio de distintos instrumentos sinfónicos interpretando piezas de música clásica de autores como Beethoven, Bruckner, Mahler y Mozart. Las muestras mencionadas han sido utilizadas en numerosos proyectos de auralización de salas de conciertos y modelado acústico.

Las muestras se encuentran, para descarga directa desde la red, en formato comprimido MP3. Para un procesamiento y una reproducción óptima de las mismas es necesario poseer audio en formato sin pérdida WAV PCM. La viabilidad del uso de estas muestras radica en que han sido codificadas en formato sin pérdida de calidad, con el objetivo de poder ser distribuidas fácilmente en archivos de tamaño reducido (ahorro de espacio de almacenamiento en disco duro).

Para el desarrollo del Test de Preferencia Subjetiva, será utilizada una muestra de Violín Acústico, el cual es un instrumento clave de la interpretación en orquestas sinfónicas, capaz de abarcar un amplio espectro de frecuencias, así como numerosos tipos de dinámica musical. La muestra utilizada para la auralización será la correspondiente a un pasaje de la obra *Symphony no, 1, IV movement* de Gustav Mahler. La duración de la muestra es de 7 segundos. Las grabaciones anecoicas son recomendadas por el equipo de investigación desarrollador del software Odeon.

3.10.6 Mathworks MATLAB

MATLAB es considerada una de las herramientas de programación y cálculo más poderosas en la ingeniería mundial. Posee un ambiente interactivo para desarrollo de algoritmos, visualización y análisis de datos. Todo esto es posible gracias a lenguajes de programación tradicionales, tales como C y C++. Las aplicaciones del software MATLAB son diversas y amplias para un gran número de disciplinas, a pesar de eso, se destaca por desarrollarse en el Procesamiento de Señales e Imagen, Comunicaciones, Modelado y Análisis Financiero, Biología Computacional, etc. El software además permite integrar el lenguaje desarrollado con otros programas y aplicaciones, proporcionando facilidades de documentación y esparcimiento del trabajo realizado. MATLAB permitirá desarrollar el Software de Selección de Sillas, el cual aplicará el Test de Preferencia Subjetiva de forma automática.

3.11 SALA DE PRUEBAS DE ESCUCHA

La Sala de Escucha seleccionada para el Test de Preferencia Subjetiva es el *control room* del Estudio de Grabación C de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, D.C., Colombia. El estudio posee equipamiento destinado a la

reproducción de audio en sistemas Stereo y Surround 5.1. El *control room* del estudio es ilustrado en la Figura 15.

Figura 15. Fotografía *control room* Estudio C USB



3.11.1 Diseño Experimental: Medición de Parámetros Acústicos

La Sala de Escucha será estudiada según la Norma ISO 3382, para lo cual serán obtenidos sus parámetros acústicos, siendo de vital importancia analizar el comportamiento sonoro en el *sweet spot*, es decir, el punto donde es ubicado el Ingeniero de Mezcla en la reproducción de audio. Este punto será donde cada sujeto se ubicará para el Test de Preferencia Subjetiva.

El primer paso será realizar una medición de *ruido de fondo*, la cual permitirá conocer el nivel general de ruido presente en la sala y las condiciones que permitirán obtener la *relación señal a ruido (SNR)* necesaria para realizar una medición confiable. Dicha medición debe realizarse en varios puntos de la sala, con el fin de cubrir, en su totalidad, el espacio útil del mismo. El medidor de nivel sonoro Svantek 943A será utilizado para las mediciones.

Globos de aire serán utilizados como fuentes impulsivas. En diversos puntos, se realizarán explosiones de globos para la excitación del recinto. Las posiciones de fuente impulsiva serán dispuestas con el fin de abarcar toda el área útil del recinto. Cada impulso generado será capturado por un micrófono de medición dispuesto en diversos puntos del recinto, y registrado en un software de captura mediante

una interfaz de audio para su posterior análisis. El diagrama de esta metodología de medición es ilustrado en la Figura 16.

Figura 16. Diagrama. Medición de *tiempo de reverberación* en control room



3.11.2 Configuración ‘Stereo Dipole’: Sistema de Reproducción

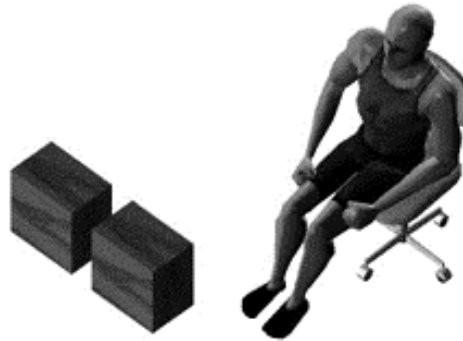
El sistema de reproducción utilizado para las pruebas de escucha será diseñado para trabajar según la configuración ‘Stereo Dipole’. Según fue demostrado por Kirkeby [12], dos altavoces espaciados a una corta distancia son suficientes para poder producir en el oyente la sensación de una ‘fuente virtual’. Para poder lograrlo, las señales que van a ser reproducidas (como bien son las grabaciones binaurales realizadas por un *dummy-head*) deben ser procesadas previamente con algoritmos que permitan al sistema de reproducción compensar el efecto *cross-talk*. El ángulo formado por los altavoces respecto al centro de la cabeza del oyente es de 10° . Las ventajas de la utilización de este tipo de sistemas de reproducción, respecto a los sistemas de reproducción convencionales que utilizan distancias y ángulos considerables entre los altavoces (tal como la configuración clásica de 60°), es que el sistema ‘Stereo Dipole’ no proporciona ningún tipo de ‘coloración’ a las señales reproducidas, además de ser un sistema más robusto y menos sensible a fallos dados por el movimiento de la cabeza del oyente. Los plugins Aurora, utilizados para procesamiento de señal y auralización, han sido diseñados para trabajar de forma óptima en este tipo de sistema de reproducción.

El sistema de reproducción utilizado consistirá de dos altavoces activos de estudio ADAM A8X, y la calibración del sistema debe ser realizada para obtener un nivel de presión sonora de 83dBA en el punto de escucha.

La reproducción de las muestras de audio para el Test estará a cargo de un sistema Pro Tools HD, equipado con una superficie de control Digidesign Control 24. El software Pro Tools permite configurar sesiones multipista, donde es posible

ubicar y mover a placer las muestras de audio (también llamadas *regiones de audio*) en el tiempo, esto con el fin de organizar la sesión de escucha en el Test de Preferencia Subjetiva. Un esquema del sistema de reproducción Stereo Dipole con un sujeto real se ilustra en la Figura 17.

Figura 17. Reproducción sonora con sistema Stereo Dipole. Tomado de 'Overview of the Stereo Dipole System'. <http://www.sound.sie.dendai.ac.jp/soundlib.html>



3.12 TEST DE PREFERENCIA SUBJETIVA

Los conceptos y definiciones acerca de la técnica de muestro utilizada para el Test de Preferencia, y todos los cálculos correspondientes, fueron tomados de *Introducción a las técnicas de muestreo*, publicación de Carlos Rodríguez Contreras, Cranfield University.

3.12.1 Muestreo

El cálculo del número de sujetos necesarios para una óptima implementación de la prueba subjetiva, teniendo en cuenta las condiciones y la muestra poblacional seleccionada, se realizó mediante:

$$n_0 = \left(\frac{Z}{\epsilon}\right)^2 * p * q$$

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}}$$

Donde:

n_0 : Cantidad teórica de elementos de la muestra.

n: Cantidad real de elementos de la muestra a partir de la población asumida o de los estratos asumidos en la población.

N: Número total de elementos que conforman la población, o número de estratos totales de la población.

z: Valor estandarizado en función del grado de confiabilidad de la muestra calculada. Por ejemplo, si se considera trabajar con un 95 % de confiabilidad la muestra seleccionada, el valor estandarizado debe ser igual a **1.96**. Algunos valores estandarizados (**z**), en función de grado de confiabilidad asumido, son:

- 99% ; **z** = 2.58
- 95% ; **z** = 1.96
- 90% ; **z** = 1.64

€: Error asumido en el cálculo. Toda expresión que se calcula contiene un error de cálculo debido a las aproximaciones decimales que surgen en la división por decimales, error en la selección de la muestra, entre otras, por lo que este error se puede asumir entre un 1 hasta un 10 %.

$$0.01 \leq \epsilon \leq 0.1$$

q: Probabilidad de la población que no presenta las características, mediante el cual se asume qué proporción de la muestra no puede presentar las mismas características de la población, debido a diversos factores subjetivos y objetivos de los individuos u objetos que conforman la población. De acuerdo a investigaciones anteriores, pueden asumirse valores óptimos para **q** según el número total de sujetos en la población (**N**):

- Para $3 \leq N \leq 19$; **q** = 0,01 (1 %).
- Para $20 \leq N \leq 29$; $0.01 \leq q \leq 0.02$ (del 1 al 2 %).
- Para $30 \leq N \leq 79$; $0.02 \leq q \leq 0.05$ (del 2 al 5 %).
- Para $80 \leq N \leq 159$; $0.05 \leq q \leq 0.10$ (del 5 al 10 %).
- Para $N \geq 160$; $0.05 \leq q \leq 0.20$ (del 5 al 20 %).

p: Probabilidad que tiene la muestra en poseer las mismas cualidades de la población (homogeneidad). Siendo $p + q = 1$ (Probabilidad máxima), entonces el valor de **p** estará dado por

$$p = 1 - q$$

La muestra seleccionada para el Test de Preferencia Subjetiva son los Estudiantes de la Facultad de Ingeniería de Sonido de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, D.C., que estén cursando entre Octavo y Décimo Semestre. El total de sujetos que cumplen con esta descripción son 175. Por lo cual $N = 175$.

Se asume un valor de $z = 1.96$ para obtener un 95% de confiabilidad de la muestra calculada, y un ϵ (margen de error de cálculo) = 0.05. Se asumió un valor bajo para q (0.5), debido al control sobre la selección de sujetos asumido para el experimento. El valor de p será 0.95.

Según los datos, se obtienen los siguientes resultados:

$$n_0 = 18.24$$
$$n = 16.51$$

Por lo cual, será necesario realizar el Test con un número mínimo aproximado de 17 personas, para obtener condiciones y resultados confiables.

3.12.2 Metodología del Test

El Test consiste en una serie de 15 pares de muestras, en los cuales cada individuo deberá elegir su muestra preferida para cada par. Los pares de muestras se reproducen consecutivamente, dando un espacio de tiempo al final de cada uno para llenar el cuestionario, o si el usuario lo desea, repetir la reproducción del par. El *sweet spot* del Control Room será el punto de ubicación del sujeto para la aplicación del Test. El test incluirá también información sobre la Edad, Sexo y Experiencia Musical.

4. DESARROLLO INGENIERIL

4.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN SALA DE CONCIERTOS BIBLIOTECA LUIS ÁNGEL ARANGO

4.1.1 Levantamiento arquitectónico y análisis de materiales

La primera fase del análisis acústico de la sala fue el Levantamiento Arquitectónico. Un medidor láser fue utilizado para la toma de distancias, las cuales se utilizaron para la elaboración de los planos arquitectónicos de la sala en formato CAD. Un análisis de todos los tipos de materiales y superficies presentes en la sala también fue realizado en esta fase del proyecto.

La Figura 18 muestra una toma de la sala durante el levantamiento, enfocado al escenario principal de la sala, el cual posee forma. Tanto el escenario como el muro posterior están elaborados en madera tipo parquet. En la zona central del escenario están ubicadas dos puertas, las cuales comunican la sala con dos cuartos utilizados para el almacenamiento de equipos y el cuarto de órganos, respectivamente (Figura 19).

Figura 18. Vista general del escenario principal.



Figura 19. Vista general del escenario principal



El escenario posee una altura de 0.95m, cuya superficie frontal está elaborada en madera tipo *parquet*. El piso de la sala está cubierto en su totalidad de alfombra, La Figura 20 muestra la elevación del escenario principal y la composición del piso de la sala. El acceso al escenario principal se da por dos escaleras laterales ubicadas en los extremos, las cuales están conformadas por el mismo material de cubrimiento del piso de la sala (Figura 21).

Figura 20. Alfombra instalada en piso de la Sala

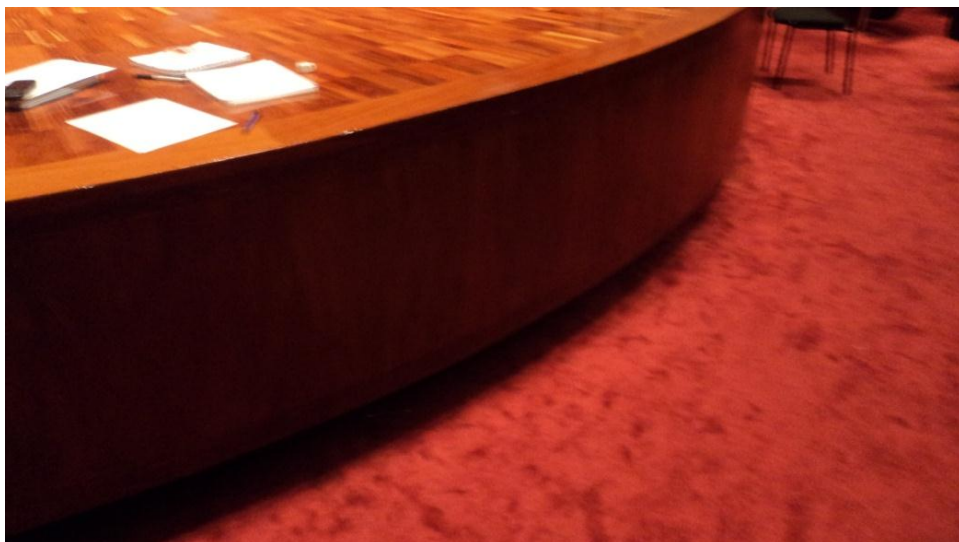


Figura 21. Escaleras laterales de escenario principal



Los muros laterales de la sala están hechos de concreto, y rodean la sala con una trayectoria ovalada. El acabado de la superficie de los muros laterales es de tipo rústico. En la Figura 22 se ilustra una vista de uno de los muros laterales de la sala. .

Figura 22. Muro lateral de Sala de Conciertos



El piso de la sala fue construido en forma ascendente, con el fin de brindar uniformidad y confort visual al público. De igual forma, la disposición y la forma de dichas áreas de audiencia concuerdan con el diseño general de la sala (forma de óvalo). Las sillas están hechas de un material acolchado recubierto de cuero sintético.

La Figura 23 muestra el área de audiencia central de la sala, donde puede observarse el diseño ascendente descrito previamente.

Figura 23. Área de audiencia central



El techo de la sala es hecho de madera. El diseño está compuesto por tres niveles, formando una cúpula que cubre el total del volumen de la sala. En la base de cada uno de los tres niveles está ubicada la iluminación de la sala, como se ilustra en la Figura 24.

Figura 24. Vista general techo de Sala de Conciertos



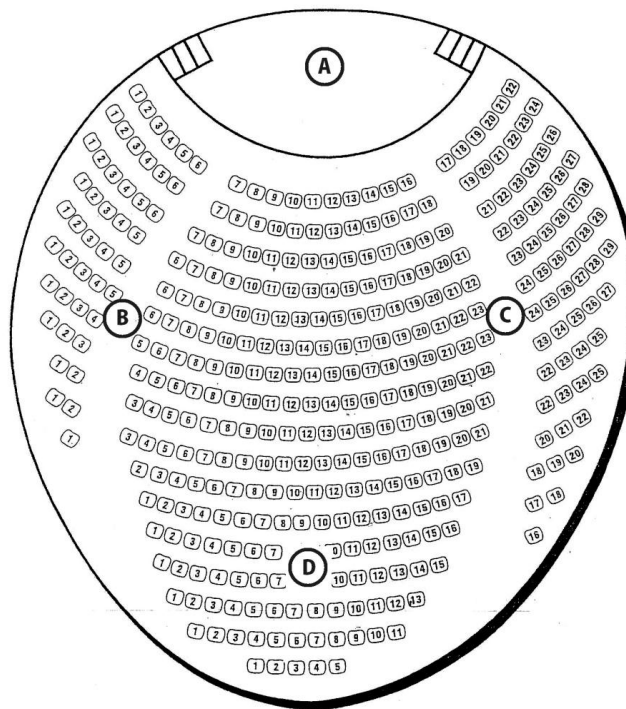
Los planos arquitectónicos elaborados en versión CAD a partir del levantamiento arquitectónico se exponen en el ANEXO B.

4.1.2 Medición de *tiempo de reverberación*

Las mediciones de tiempo de reverberación fueron realizadas de acuerdo a la norma ISO 3382.

Previamente, se realizó una medición del ruido de fondo de la sala. Dicha medición utilizó cuatro posiciones de micrófono, donde fue ubicado el medidor de nivel sonoro, tal como se ilustra en la Figura 25, con el fin de cubrir en su totalidad el área útil de la sala. Los puntos son denotados con las letras A, B, C y D.

Figura 25. Puntos de medición de ruido de fondo



La Figura 26 ilustra la medición de ruido de fondo en el Punto A. En cada posición de micrófono se realizó una medición de 30 segundos, con la siguiente configuración para el medidor de nivel sonoro:

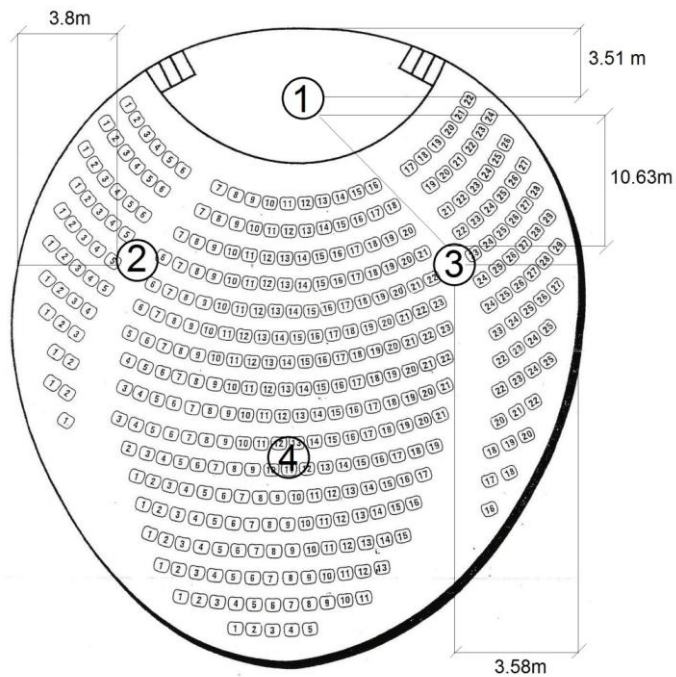
- Tiempo de integración: 30s
- Filtro de ponderación: A
- Respuesta: *Slow* (lenta)
- Medición por 1/3 Octava
- Buffer: 2ms

Figura 26. Medición de ruido de fondo



El método de medición utilizado fue el método *de la respuesta impulsiva integrada*. La fuente impulsiva seleccionada para las mediciones fueron globos de aire. El volumen de los globos fue normalizado, al medir sus dimensiones para cada excitación del recinto. Fueron ubicadas cuatro posiciones de fuente, las cuales se ilustran en la Figura 27. Estas posiciones fueron ubicadas con el fin de cubrir la totalidad del espacio útil de la sala.

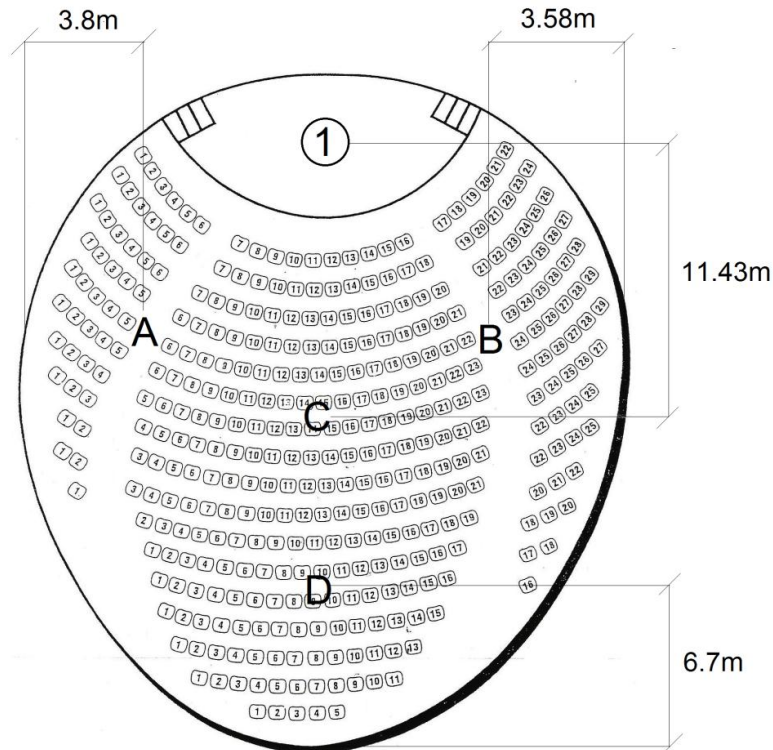
Figura 27. Posiciones de fuente para medición de RT60



Para cada posición de fuente, se realizaron capturas impulsivas en cinco posiciones de micrófono, el cual fue ubicado a una altura de 1.5m.

La Figura 28 muestra un diagrama de las posiciones de micrófono utilizadas para la Posición de Fuente 1, denotadas con letras.

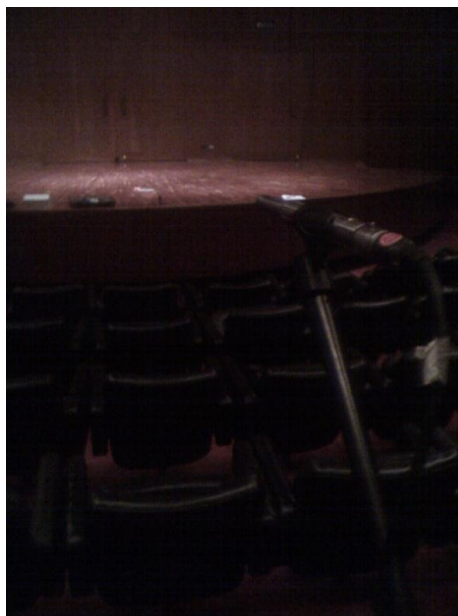
Figura 28. Posiciones de fuente para medición de RT60



Las distancias entre Puntos de Fuente sonora y las superficies límite del recinto fueron dispuestas con el fin de cumplir los requisitos de la norma 3382. De igual forma, las distancias entre Puntos de Fuente y entre Puntos de Micrófono fueron dispuestas para cumplir las especificaciones de la norma.

Para cada posición de micrófono se realizaron tres repeticiones. La altura utilizada para la fuente fue 1.5m. La ubicación del micrófono en la Posición C es ilustrada en la Figura 29.

Figura 29. Captura de impulsos en Posición C



En la Figura 30 se ilustra el posicionamiento de la fuente sonora en el Punto 2.

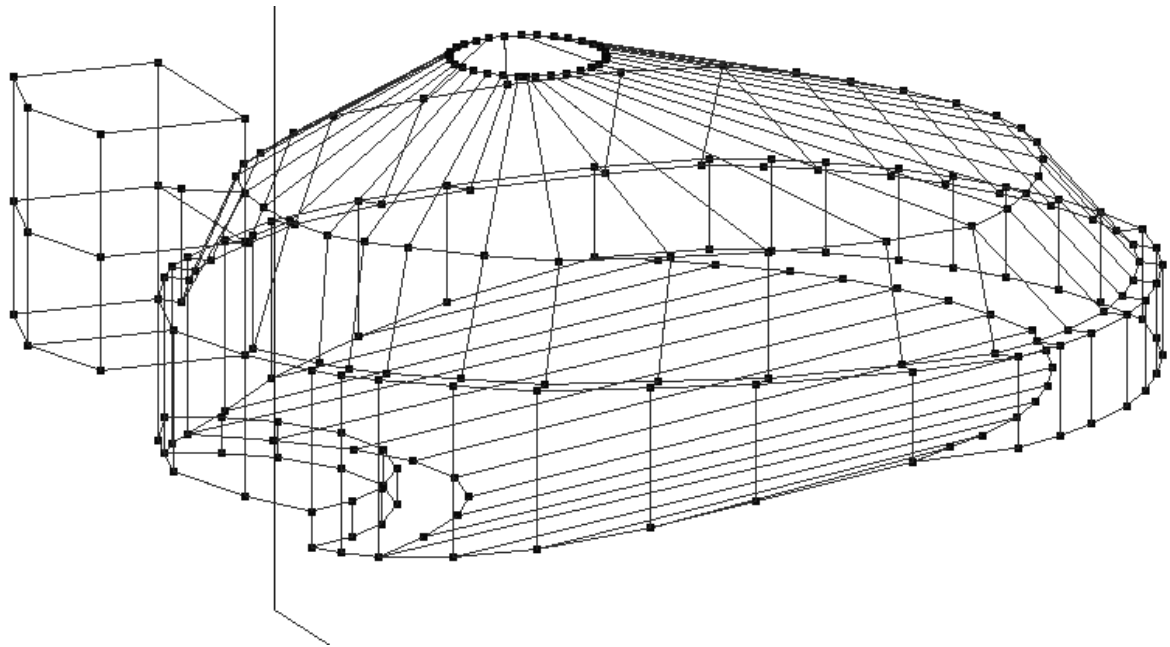
Figura 30. Posición de Fuente 2



4.1.3 Simulación acústica de la sala

El cálculo de tiempo de reverberación de la sala fue realizado mediante el software EASE. Utilizando las dimensiones de la sala obtenidas en el levantamiento arquitectónico, se realizó una simulación de la sala y de su volumen acústico, tal como se ilustra en la vista 3D de la Figura 31. De igual manera, se incluyó en la simulación el volumen acoplado correspondiente al órgano tubular.

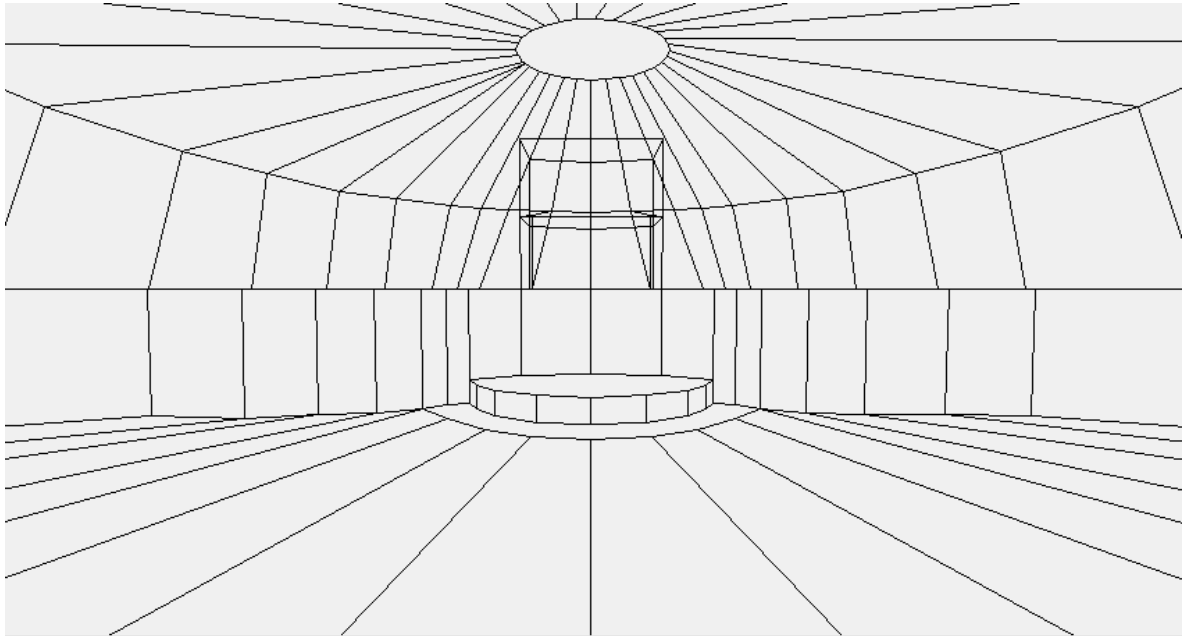
Figura 31. Vista 3D de la sala en software EASE



Cada superficie de la sala fue reconstruida en el software. Teniendo en cuenta que al interior de la sala existen varios tipos de superficies, éstas fueron creadas como superficies independientes. EASE permitió mediante sus herramientas de simulación acústica, determinar las propiedades de absorción en cada una de las superficies de la sala en la reconstrucción virtual.

En la Figura 32 se ilustra una vista frontal del escenario de la sala obtenida en la simulación. Los muros límite ubicados en el área del escenario están cubiertos con madera tipo parquet, y por otro lado, el piso está cubierto con alfombra, por lo cual el tratamiento acústico manejado en la simulación para cada superficie fue acorde con el tipo de material.

Figura 32. Vista de escenario principal en software EASE



Las curvas de absorción ingresadas a la base de datos para los materiales *madera parquet* (Figura 33) y *alfombra* (Figura 34) hicieron parte de la descripción del comportamiento acústico dentro de EASE.

El índice de absorción de la *madera parquet* puede considerarse mínimo, ya que no supera el 10% en ninguna banda de frecuencias. En las frecuencias altas, el comportamiento de absorción tiende a estabilizarse, logrando valores cercanos al 5%, lo cual es considerado un valor casi despreciable.

Por otra parte, la *alfombra* posee un comportamiento más fuerte respecto a la absorción sonora. A partir de los 1000Hz, los valores de absorción son cercanos al 70%, lo cual se considera un valor considerable de absorción. Un 55% es el valor obtenido en la banda de 500Hz, vital para definir el *tiempo de reverberación medio* de la sala.

Figura 33. Comportamiento de absorción para *Madera Parquet*

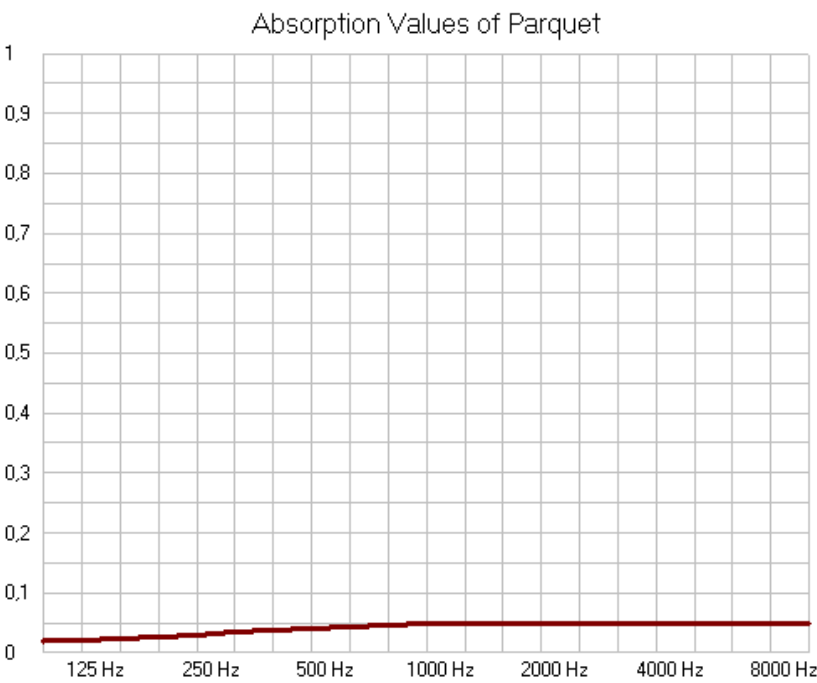
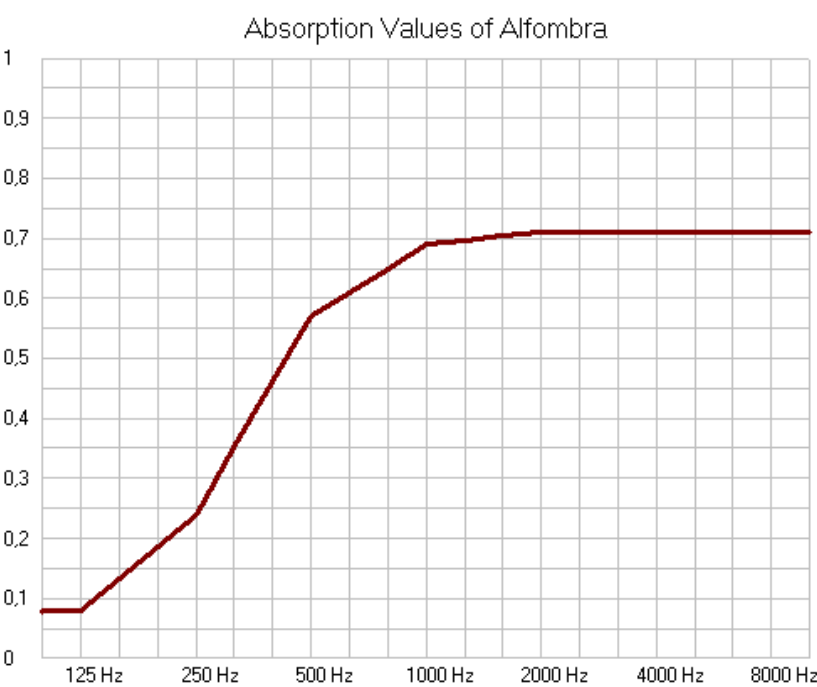


Figura 34. Comportamiento de absorción para *Madera Parquet*



Para cada superficie de la sala fueron ingresados los datos de su comportamiento acústico, con el fin de realizar el cálculo de tiempo de reverberación de la sala en la simulación por medio del software EASE.

De igual forma, fue realizado un cálculo de parámetros acústicos derivados del tiempo de reverberación, relacionados con el nivel de presión sonora e inteligibilidad de la palabra.

Los cálculos de *tiempo de reverberación* realizados en simulación mediante EASE son basados en las ecuaciones de Sabine y Eyring, definidas como:

$$RT = \frac{0.161V}{\sum S_i \alpha_i} \text{ (Sabine)}$$

$$RT = \frac{0.161V}{-S \ln(1 - \frac{\sum_i (S_i \alpha_i)}{S})} \text{ (Eyring)}$$

Es importante considerar que la simulación realizada en el software EASE corresponde únicamente al espacio útil de la sala, no al volumen acústico real, el cual incluye otro volumen acoplado, perteneciente a la infraestructura del edificio.

El *tiempo de reverberación* obtenido mediante la simulación, utilizando la fórmula de Eyring (que tiene en cuenta variaciones de coeficientes de absorción en las distintas superficies de la sala), fue **1.02s**.

4.2 MEDICIONES BINAURALES ÁREAS DE AUDIENCIA

El método de medición utilizado se realizó de acuerdo al descrito por Fujii y Ando [19]. Dicho método es orientado a capturas de respuestas impulsivas binaurales en salas de concierto para auralización y análisis de Preferencia Subjetiva.

Una sola posición de fuente fue utilizada para las mediciones, la cual fue ubicada en el escenario. La fuente impulsiva utilizada para las mediciones fueron globos de aire.

El *dummy-head*, ilustrado en la Figura 35, fue ubicado en las distintas ubicaciones de audiencia, a una altura de 1.1 m. La ubicación del mismo fue realizada

orientando los transductores y el torso hacia el escenario, con el fin de simular un oyente real dentro de la sala.

Figura 35. *Dummy-head* 01dB-Metravib



La Figura 36 ilustra el posicionamiento del *dummy-head* en una de las ubicaciones de audiencia de la sala para las mediciones.

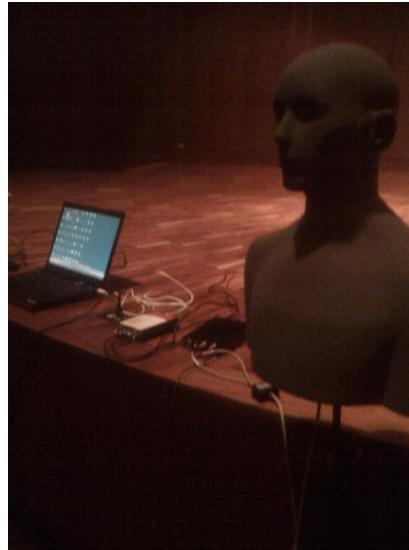
Figura 36. Medición binaural con *dummy-head* 01dB-Metravib



La Figura 37 muestra el montaje para la medición binaural. Las señales capturadas por los transductores del *dummy-head*, los cuales corresponden a los oídos izquierdo (L) y derecho (R), son enviadas a una etapa de pre-amplificador

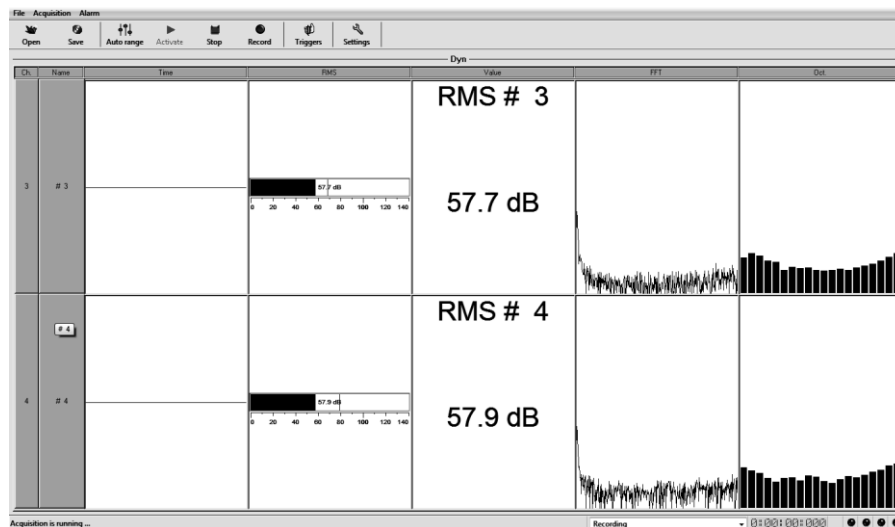
G.R.A.S.S. Posteriormente, las señales son capturadas en el software dBfa Suite mediante una tarjeta 01dB-Metravib dB4. En la Figura 38 se ilustra el montaje del sistema de medición binaural utilizado.

Figura 37. Equipamiento de medición binaural



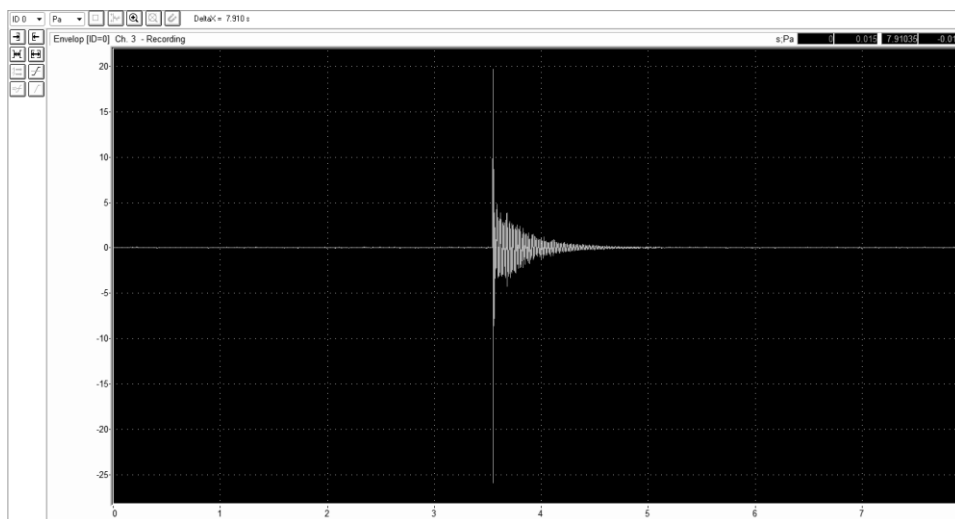
El software dBfa capturó cada respuesta impulsiva en dos canales independientes (uno para cada transductor en L y R). Dichas capturas de presión fueron realizadas a una frecuencia de muestreo de 51200 Hz. Estas condiciones de grabación fueron adoptadas debido a la configuración del software, el cual permite realizar un avanzado análisis y post-procesamiento de señal en mediciones de ruido y vibraciones.

Figura 38. Medición en tiempo real en software dBfa



Para cada ubicación de audiencia se obtuvieron dos capturas de respuesta impulsiva, correspondientes a los transductores izquierdo (L) y derecho (R). Mediante el software dBfa, por medio de la herramienta de post-procesamiento, se exportaron las capturas de presión a archivos de audio en formato WAV sin pérdida. En el software Adobe Audition se realizó la conversión del tipo de muestra para cada captura, con el fin de obtener muestras de audio con una frecuencia de muestreo de 44100 Hz, frecuencia a la cual trabaja la suite de plugins de análisis acústico Aurora. En la Figura 39 se muestra una captura realizada en la medición binaural, para uno de los transductores del *dummy-head*, de la respuesta impulsiva de la sala.

Figura 39. Captura de respuesta impulsiva en dBfa



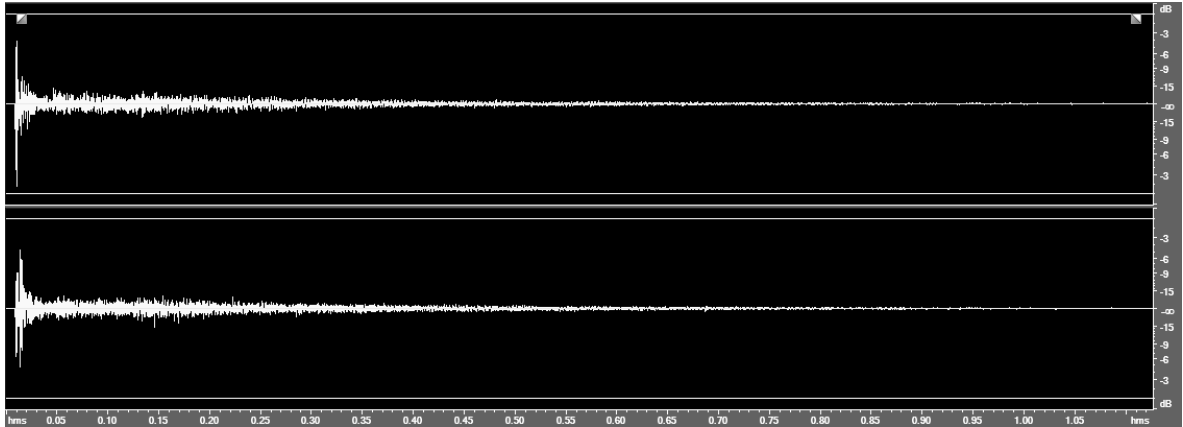
La Figura 40 muestra una imagen de la base de datos de algunas capturas de presión binaurales en el software dBfa.

Figura 40. Base de datos de medición en software dBfa

ID	Family	Data type	Date	Duration	Period	Y axis	Chan...	Infor...
0	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:33:30	7,926	1/51200	Pa	3	Recor...
1	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:33:30	7,926	1/51200	Pa	4	Recor...
2	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:34:06	8,657	1/51200	Pa	3	Recor...
3	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:34:06	8,657	1/51200	Pa	4	Recor...
4	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:34:50	11,525	1/51200	Pa	3	Recor...
5	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:34:50	11,525	1/51200	Pa	4	Recor...
6	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:35:31	7,376	1/51200	Pa	3	Recor...
7	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:35:31	7,376	1/51200	Pa	4	Recor...
8	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:36:23	12,559	1/51200	Pa	3	Recor...
9	Signal	Instantaneous	05/09/11 15:36:23	12,559	1/51200	Pa	4	Recor...

Con el fin de obtener un único archivo de audio stereo para cada respuesta impulsiva binaural, fue utilizado el software Pro Tools para unificar los archivos de audio mono, correspondientes a L y R, en un sólo archivo de audio. Tal como se ilustra en la Figura 41, cada respuesta impulsiva binaural fue formada en un *track stereo* (pista stereo), desde el cual se exportaron cada una de las respuestas impulsivas en archivos WAV sin pérdida.

Figura 41. Archivo de audio final de respuesta impulsiva binaural



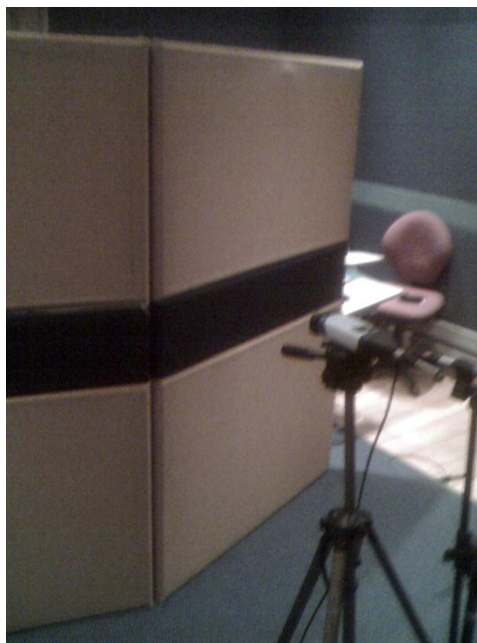
4.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN SALA DE ESCUCHA

Con el fin de cumplir con la recomendación de Farina, respecto a las condiciones acústicas de salas destinadas a pruebas de escucha basadas en auralización [20], se realizó un acondicionamiento acústico del *control room* Estudio C de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, D.C.

Se utilizó refuerzo de absorción sonora utilizando paneles móviles, los cuales fueron ubicados estratégicamente en puntos de la sala donde había ubicadas superficies altamente reflejantes. Por ejemplo, la superficie de vidrio que divide el control room de la suite de grabación, la cual es comúnmente una de las superficies con mayor índice de reflexión dentro de este tipo de recintos, fue cubierta con material absorbente.

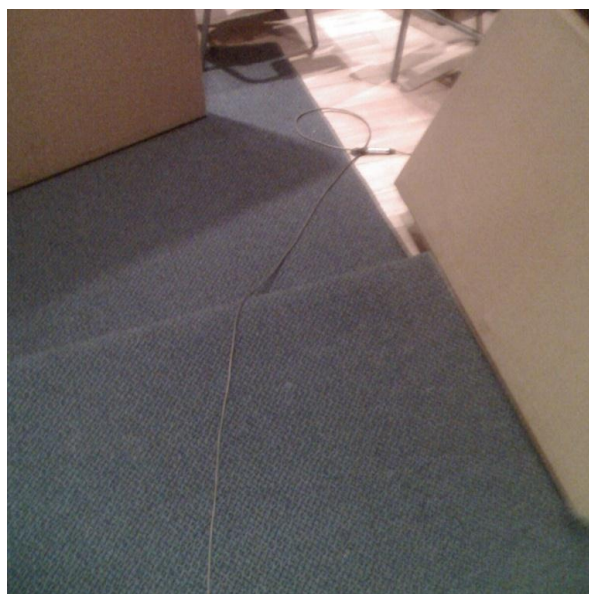
La mesa de control donde se encuentra instalado el equipamiento del estudio fue también cubierta con refuerzo de absorción, ya que dichos equipos (superficies de control, interfaces de grabación, procesadores de señal) se encuentran elaborados en chasis metálico, lo cual puede provocar fenómenos de reflexión. La instalación de los paneles para evitar dicho fenómeno se ilustra en la Figura 42.

Figura 42. Instalación de paneles absorbentes



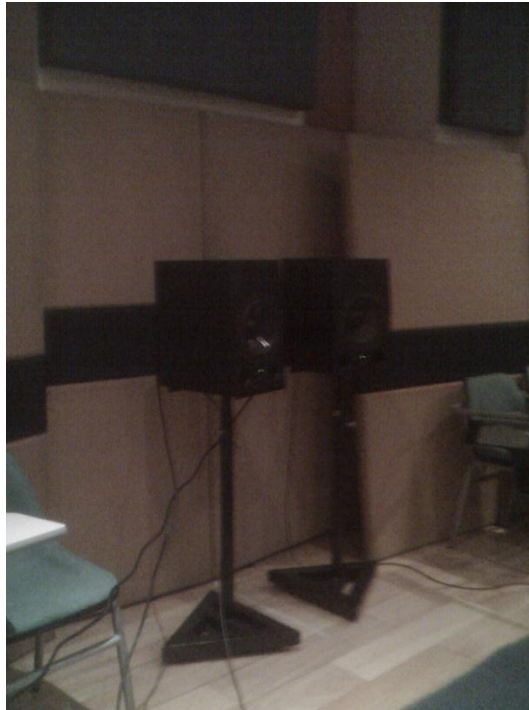
En la Figura 43 se ilustra la instalación de una alfombra en el piso del *control room*, con el fin de reforzar el índice de absorción sonora en el suelo del mismo, y la cual cubre la totalidad del área efectiva de la zona de ubicación de los sujetos para la aplicación del Test de Preferencia.

Figura 43. Instalación de alfombra en Estudio C



En las superficies límite del control room fueron colocados, de igual manera, paneles absorbentes. En la Figura 44 se ilustra el refuerzo instalado en la zona posterior al sistema de reproducción *Stereo Dipole* utilizado para las pruebas de escucha.

Figura 44. Paneles absorbentes en sistema Stereo Dipole



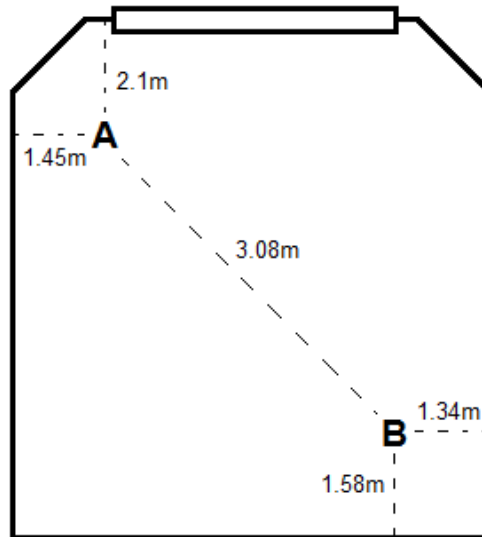
Con el refuerzo de absorción instalado, se procedió a realizar la medición de tiempo de reverberación de la sala, de acuerdo con los métodos descritos en la norma ISO 3382. El método de medición utilizado fue el *método de la respuesta impulsiva integrada*, donde la fuente sonora fueron globos de aire.

Previo a la excitación del recinto con la fuente sonora, se realizó la medición de ruido de fondo, en dos posiciones de micrófono en las cuales fue ubicado el medidor de nivel sonoro con la siguiente configuración:

- Tiempo de integración: 30s
- Filtro de ponderación: A
- Respuesta: *Slow* (lenta)
- Medición por 1/3 Octava
- Buffer: 2ms

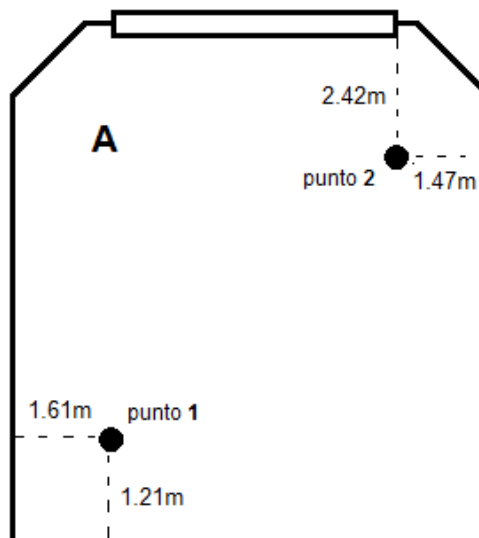
Se utilizaron dos posiciones de fuente, cada una con dos posiciones de micrófono. En la Figura 45 se ilustran las posiciones de fuente utilizadas para la medición, mostrando las distancias existentes entre dichas posiciones y las superficies límite de la sala.

Figura 45. Posiciones de fuente para medición de RT60 en *control room*



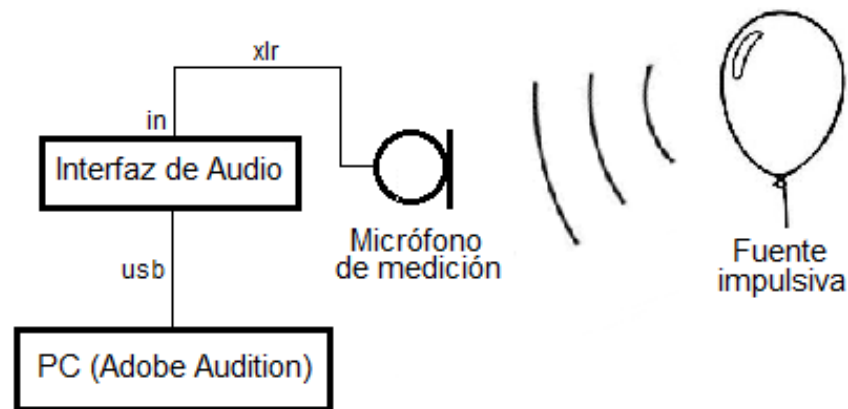
Las dos posiciones de micrófono utilizadas, que se muestran en la Figura 46, fueron las mismas para las mediciones en ambas posiciones de fuente, y fueron dispuestas con el fin de abarcar la totalidad del espacio útil del recinto, teniendo en cuenta el acondicionamiento acústico reforzado y el equipamiento presente. Como ejemplo, se ilustran las posiciones para la Posición de Fuente A.

Figura 46. Posiciones de micrófono en Punto A



En cada punto de medición se realizaron tres repeticiones. La Figura 47 muestra el diagrama de conexiones para las mediciones de tiempo de reverberación. La excitación del recinto se realizó mediante la explosión de globos de aire. La señal de excitación es capturada por el micrófono de medición Gold-Line Tef 04 en cada punto. La señal impulsiva capturada fue registrada en el software Adobe Audition mediante una interfaz de audio M-Audio Fast Track Pro.

Figura 47. Diagrama de medición de RT60



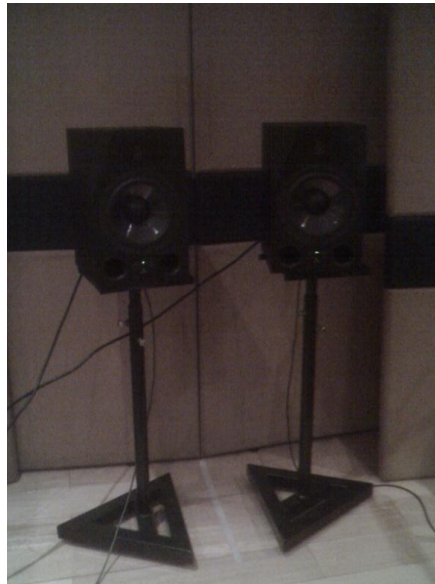
4.4 CALIBRACIÓN DE SISTEMA DE REPRODUCCIÓN STEREO DIPOLE

Con el fin de cumplir con las condiciones acústicas de salas destinadas a pruebas de escucha basadas en auralización, se realizó un acondicionamiento acústico del *control room* Estudio C de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, D.C.

Según Farina [20], es recomendable en toda sala destinada a pruebas de escucha realizadas a partir de procesos de auralización, deben cumplirse con ciertas condiciones acústicas y de reproducción específicas. La respuesta en frecuencia del sistema de reproducción en el punto donde se ubican los sujetos en el la prueba debe ser lo más plana posible. La primera parte del acondicionamiento del control room del estudio C, descrito en la sección 5.3, fue orientada hacia el control de la reverberación dentro de la sala. Para poder cumplir con las condiciones de reproducción recomendadas para la prueba, se realizó una calibración de sistema que permitió obtener dicha respuesta en el punto de escucha.

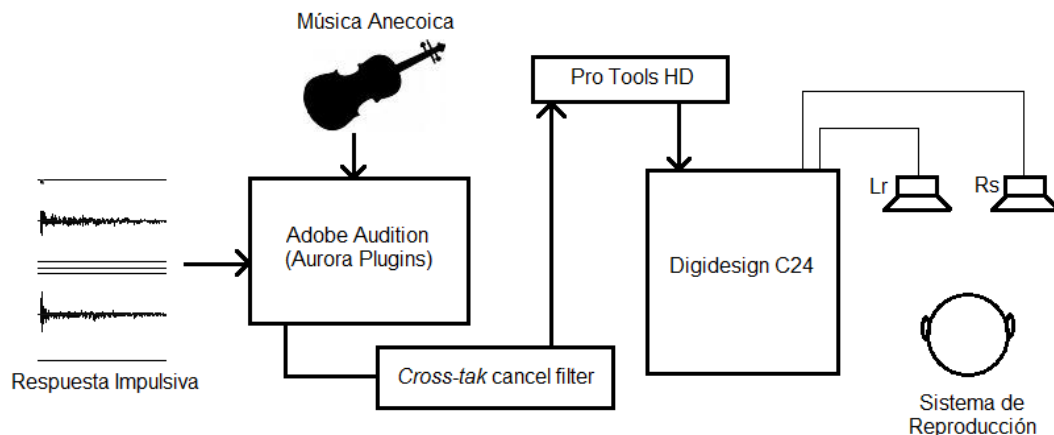
Los dos altavoces ADAM de la serie A8X fueron ubicados según la especificación de sistemas Stereo Dipole, formando un ángulo de 10° entre sí, tal como se ilustra en la Figura 48.

Figura 48. Sistema Stereo Dipole



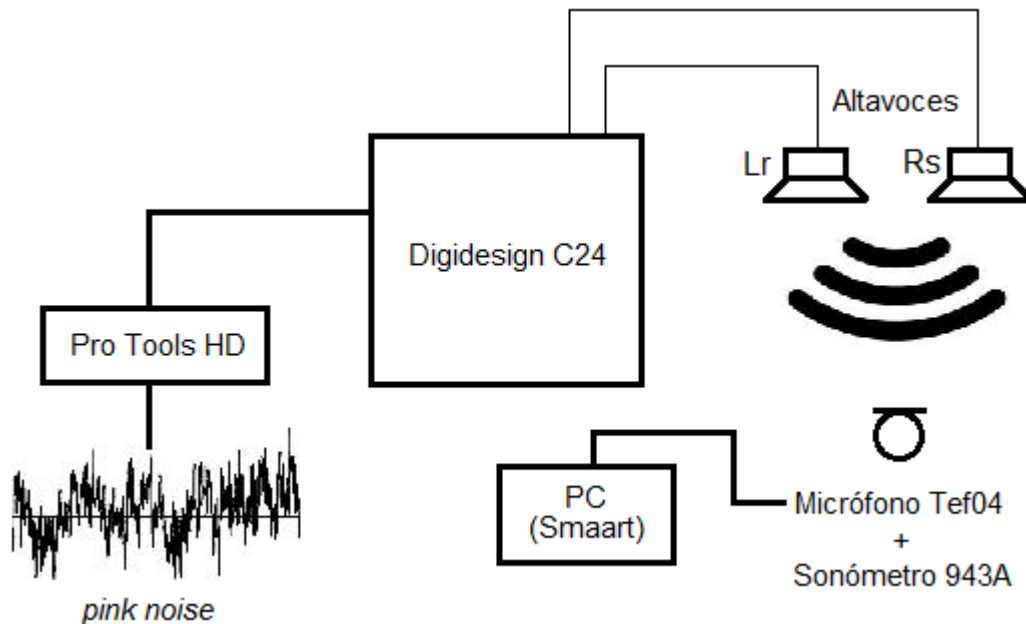
En la Figura 49 se muestra el diagrama de conexiones para la reproducción de muestras de audio en la sala. Un sistema Pro Tools HD será utilizado para el manejo de flujo de señal. Los dos altavoces seleccionados hacen parte de un sistema de reproducción Surround 5.1, y según la configuración estándar del sistema, corresponden a las salidas posteriores Ls y Rs. Las muestras de audio stereo correspondientes a las simulaciones sonoras obtenidas en la auralización serán enviadas a estos altavoces por estas rutas.

Figura 49. Diagrama de reproducción de campos sonoros



Para la calibración de respuesta en frecuencia, fue necesario aplicar un proceso de ecualización a la señal de salida en los dos altavoces, lo cual fue posible utilizando el plugin *7-band EQ*, contenido en la suite estándar de plugins de Pro Tools. El plugin fue insertado en el track de salida maestra (*master*) del sistema. Una señal de ruido rosa fue enviada a través de los dos altavoces. En el punto de escucha, ubicado a 1.5m de los altavoces, fue ubicado un micrófono de medición Gold-Line Tef 04, de respuesta plana. Este micrófono capturó la señal de ruido rosa en dicho punto de la sala, donde fue necesario realizar un monitoreo de señal mediante FFT, para observar su comportamiento en función de la frecuencia. El software Smaart 6.0, de la casa matriz EAW, en su versión de prueba, fue utilizado para el monitoreo de señal. El diagrama de conexiones de la calibración es ilustrado en la Figura 50. Un medidor de nivel sonoro Svantek 943A también fue colocado en el punto de escucha, con el objetivo de obtener un nivel sonoro de 83dBA.

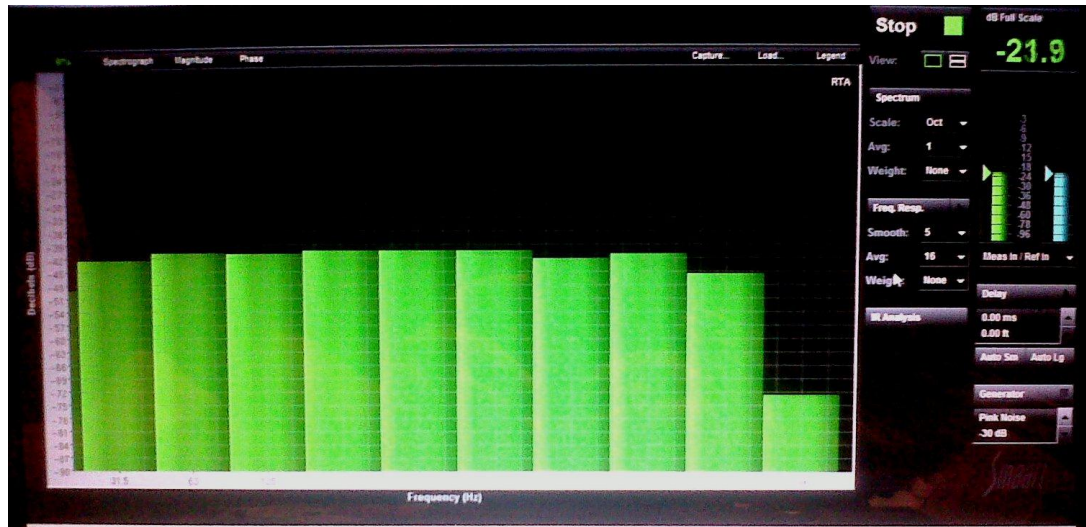
Figura 50. Diagrama de calibración



La ganancia de salida de los altavoces controlada mediante la superficie de control del sistema Digidesign Control 24, la cual fue calibrada, por medio de su control maestro de salida, hasta obtener el nivel recomendado. Posteriormente, tomando como referencia el nivel sonoro dado en 1000Hz, se modificó, por bandas de octava, el nivel sonoro en las bandas de frecuencia restantes, hasta obtener una respuesta lo más plana posible. En el plugin *7-band EQ* se ubicaron las bandas a modificar, y por medio de los controles *Q* (ancho de banda) y *Gain* (ganancia), se

igualó en nivel en todas las bandas del espectro. La Figura 51 muestra la visualización en el software Smaart del comportamiento en frecuencia de la sala en el punto de escucha después de la calibración del sistema.

Figura 51. Interfaz gráfica de Smaart en calibración de sistema



4.5 SIMULACIÓN DE CAMPOS SONOROS

Cada una de las respuestas impulsivas binaurales obtenidas fue analizada mediante el plugin *Acoustical Parameters*, de la suite de Aurora. Los valores de los cuatro parámetros acústicos analizados en Preferencia Subjetiva para cada respuesta impulsiva binaural fueron almacenados en una base de datos. Para obtener las muestras de audio a utilizar en el Test de Preferencia Subjetiva, fue necesario realizar un proceso de discriminación, donde todas las respuestas impulsivas binaurales fueron comparadas respecto a su análisis de parámetros acústicos.

4.5.1 Discriminación de respuestas impulsivas

Según Bork [21], los parámetros acústicos analizados en una sala de conciertos pueden diferenciarse subjetivamente mediante JDN (*Just-Noticeable Difference*), el cual es el valor mínimo en el cual deben diferir los valores de los parámetros acústicos para poder realizar una comparación subjetiva entre dos muestras. En el proceso de discriminación, las muestras a utilizar en el Test de Preferencia Subjetiva deben diferenciarse en sus valores de parámetros acústicos de acuerdo a los valores mínimos descritos en la Tabla 5.

El parámetro JND define la diferencia más pequeña detectable entre dos niveles (inicial y final) de un estímulo sensorial. Para el caso del Test de Preferencia Subjetiva, será la diferencia mínima detectable entre dos campos sonoros reproducidos en el sistema Stereo Dipole, que harán parte de una prueba de Comparación Pareada.

Tabla 5. Valores de Subjective Limen (JND) de parámetros acústicos

Parameter	Definition (ISO 3382)	Subj. limen
T_{30}/s	Tiempo de reverberación, derivado de -5 a -35dB de la curva de caída.	5%
EDT/s	Early decay time, derivado de 0 to -10 dB de la curva de caída.	5%
$D_{50}/\%$	Definición. Relación entre energía temprana (0-50ms) y energía total	5%
C_{80}/dB	Claridad. Relación entre energía temprana (0-80ms) y tardía (80-ms- ∞)	1 dB
G/dB	Nivel sonoro relacionado con fuente omnidireccional en campo libre	1dB
LF/%	Relación de energía lateral temprana (5-80ms)	5%
IACC	Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural	0.2

Según Bork, parámetros acústicos tales como el *tiempo de reverberación*, no presentan una variación significativa a medida que se realizan comparaciones de muestras entre ubicaciones cercanas dentro del recinto. En la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos para diez respuestas impulsivas binaurales, de los parámetros acústicos *tiempo de reverberación (RT)* y *sonoridad (G)*.

Tabla 6. Valores de *RT* y *G* para respuestas binaurales

SEAT	RT [s]	G [dB]
0	2.14	0.4
2	2.15	-2.7
4	2.21	-5.8
6	2.24	-0.2
8	2.27	-2.2
10	2.19	0.1
12	2.20	0.2
14	2.28	-0.1
16	2.22	2.9
18	2.09	-0.2

El *tiempo de reverberación medio* de la sala, obtenido en mediciones, fue **2.25s**. De acuerdo con los valores establecidos de JND para *tiempo de reverberación*, la diferencia mínima notable para una comparación de dos muestras de acuerdo con este parámetro puede definirse mediante:

$$JND_{RT} = RT_{mid} * 0.05$$

Siendo $RT_{mid} = 2.25$, se obtiene:

$$JND_{RT} = 0.112$$

El valor 0.112s equivale al 5% del *tiempo de reverberación medio* de la sala, y es el valor mínimo necesario para que poder percibir una diferencia entre los estímulos utilizados en el Test de Preferencia (campos sonoros simulados).

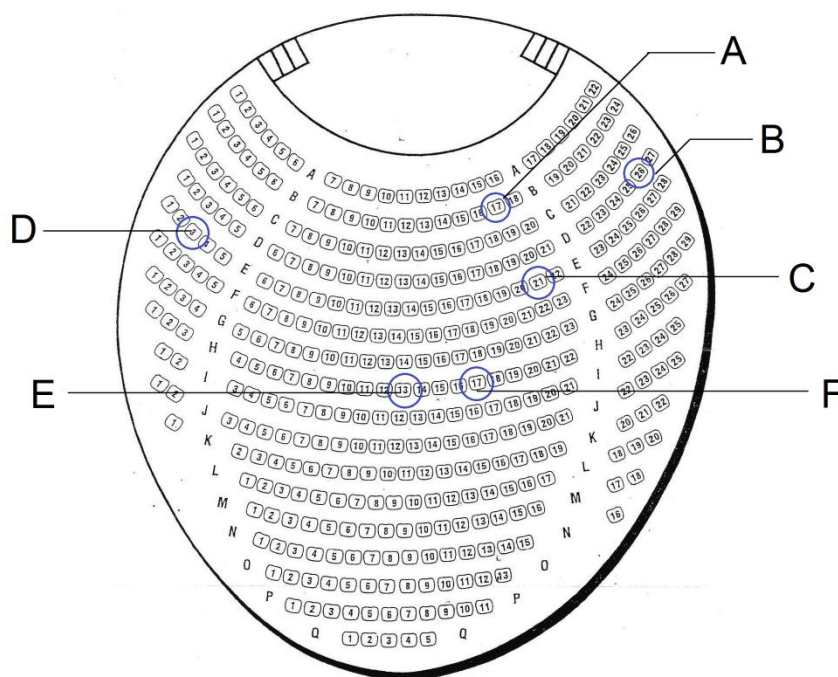
De igual forma, por medio de la comparación de datos de todas las respuestas impulsivas obtenidas, se obtuvieron seis las respuestas que cumplen con los valores recomendados de diferencia mínima, las cuales se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Respuestas impulsivas seleccionadas para auralización

REP. IMP.	RT	G	ITDG	IACC _E
A	2.33	2.2	14	0.59
B	2.13	-6.4	15	0.42
C	2.20	-2.0	11	0.66
D	1.94	0.3	7	0.3
E	2.35	-0.5	12	0.38
F	2.01	2.5	6	0.15

Las respuestas impulsivas binaurales utilizadas para la comparación en el Test de Preferencia corresponden a las ubicaciones ubicadas en el mapa de la Figura 52.

Figura 52. Mapa de ubicaciones de respuestas impulsivas



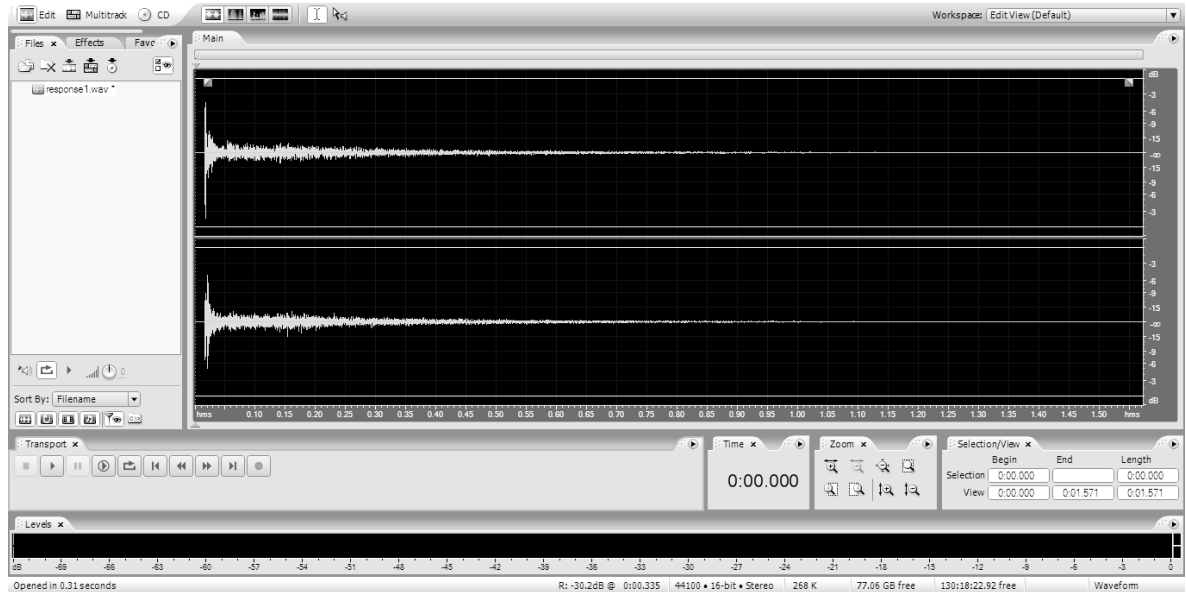
4.5.1 Procesos de Convolución y Cancelación Cross-talk

Las seis respuestas impulsivas obtenidas fueron utilizadas como herramienta de auralización de la sala. Mediante el software Adobe Audition y la suite de plugins

Aurora, se realizó la simulación de campos sonoros obtenidos en las distintas ubicaciones dentro del área de audiencia.

Cada respuesta impulsiva fue cargada en la ventana de *edición* Adobe Audition, tal como se ilustra en la Figura 53. Esta ventana permite tener una visualización completa de la región de audio, así como la aplicación de procesos.

Figura 53. Ventana de edición Adobe Audition



La respuesta impulsiva, como región de audio, fue guardada en el portapapeles del sistema operativo (*clipboard*). El proceso de convolución fue utilizado para simular un campo sonoro por medio de la respuesta impulsiva.

Expresando la Convolución como:

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

Donde $x(t)$ es una señal arbitraria, y $h(t)$ la respuesta al impulso.

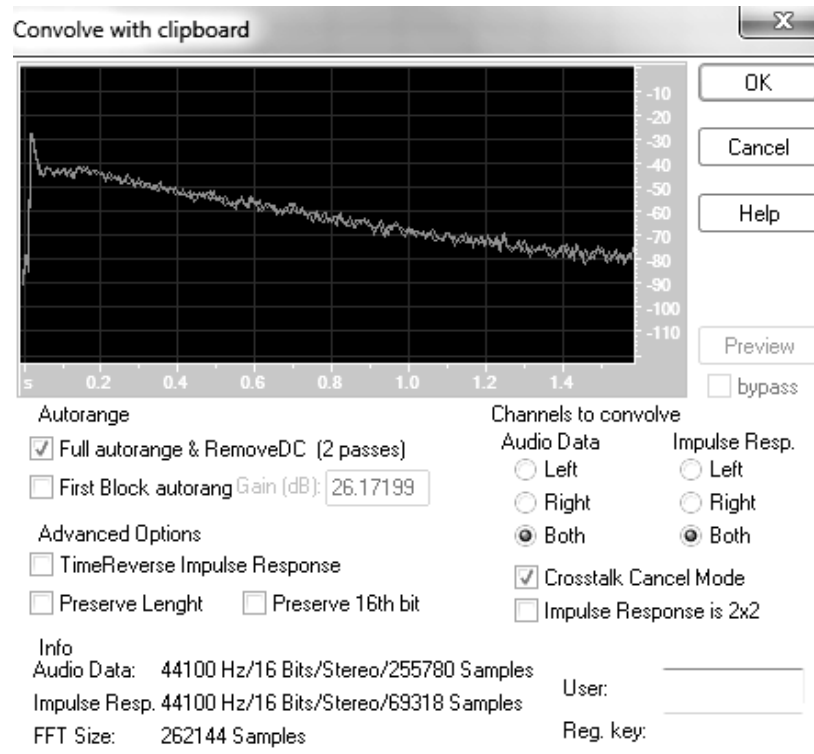
La señal ingresada al sistema como $x(t)$ es la muestra de música anecoica, ilustrada en la Figura 54. Esta muestra de audio fue importada en la *ventana de edición* de Adobe Audition. El proceso de convolución fue realizado mediante los plugins de la suite de Aurora. El plugin *Convolve with Clipboard* permite realizar dicho proceso entre la muestra presente en la ventana de edición y la muestra de audio guardada en el portapapeles.

Figura 54. Muestra de música anecoica en Audition



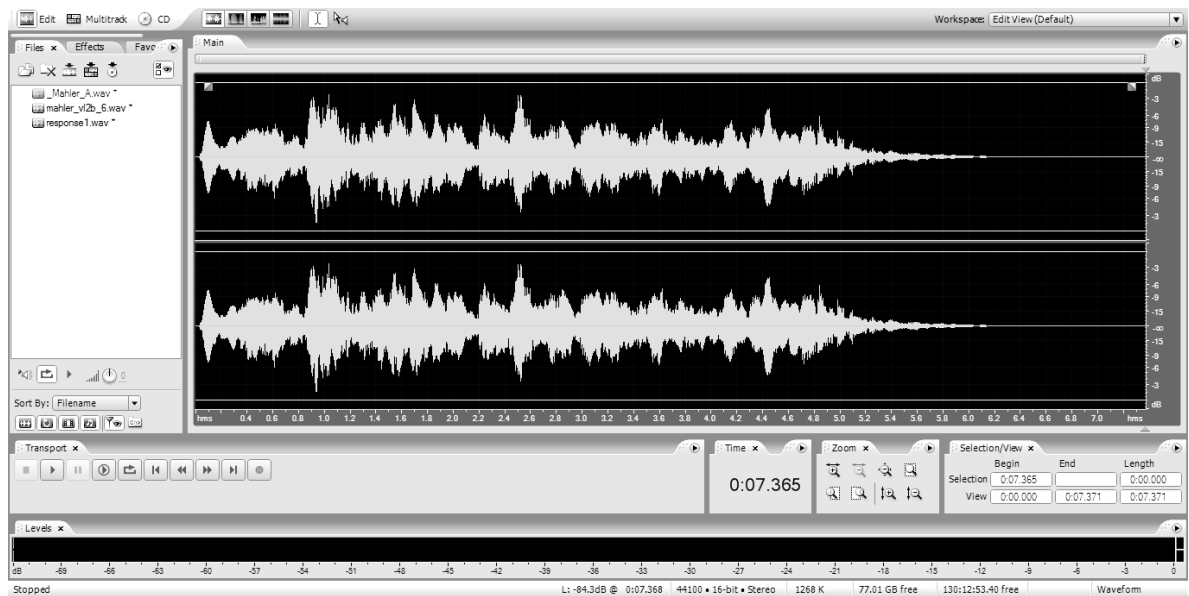
La ventana del plugin *Convolve with Clipboard* se muestra en la Figura 55. Se establecieron las características del proceso de convolución de acuerdo a las muestras utilizadas. La opción *Audio Data* se seleccionó en el modo *Both*, debido a que fue utilizada una señal stereo, de dos canales (L y R), de igual manera para definir el tipo de respuesta impulsiva (*Impulsive response*).

Figura 55. Ventana del plugin *Convolve with Clipboard*



La opción *Crosstalk Cancel Mode* activa la aplicación del filtro digital para la cancelación del efecto *Cross-talk*. Por lo cual la señal resultante podrá ser implementada en un sistema de reproducción de campos sonoros para imágenes virtuales de fuentes acústicas, como lo es sistema Stereo Dipole. La Figura 56 ilustra la muestra de audio resultante a partir del proceso de convolución, la cual simula la presencia de una fuente sonora (interpretando la pieza musical seleccionada) dentro de la Sala de Conciertos de la Biblioteca Luis Ángel Arango.

Figura 56. Simulación de campo sonoro en sala de conciertos mediante Aurora



El proceso fue aplicado a cada una de las respuestas impulsivas binaurales obtenidas en la sala, con el fin de simular cada campo sonoro y analizar su comportamiento acústico. Las seis simulaciones principales fueron implementadas en el Test de Preferencia Subjetiva.

4.6 TEST DE PREFERENCIA SUBJETIVA

4.6.1 Diseño del test

Con las seis simulaciones de campo sonoro obtenidas en la auralización, se diseñó el Test de Preferencia (ANEXO C). Con el fin de obtener una respuesta confiable del instrumento, la Prueba de Comparación por Pares fue diseñada con todos los pares posibles de muestras. La Figura 57 muestra una matriz con los pares formados por las seis muestras principales, asignando, a manera de ejemplo, una convención a cada una de ellas (A, B, C, D, E y F).

Figura 57. Pares de comparación para Test de Preferencia

Par \ Muestra	A	B	C	D	E	F
1	A	B				
2	A		C			
3	A			D		
4	A				E	
5	A					F
6		B	C			
7		B		D		
8		B			E	
9		B				F
10			C	D		
11			C		E	
12			C			F
13				D	E	
14				D		F
15					E	F

El test fue diseñado con el fin de que cada usuario seleccione la prueba de su preferencia para cada par muestras de campos sonoros. Como ejemplo, se muestra la sección del cuestionario correspondiente al primer par:

- Par 1

A ☐ B ☐

De esta forma para cada uno de los quince pares de muestras, cada usuario seleccionó un campo sonoro preferido.

4.6.2 Aspectos éticos y procedimentales

Previo al cuestionario, se incluyó en el test un *consentimiento informado*, en el cual se clarifica el objetivo del test, el cual es netamente investigativo. Cada sujeto fue informado acerca del uso que le será dado a los datos proporcionados en la Prueba de Escucha, de igual forma garantizando su confidencialidad.

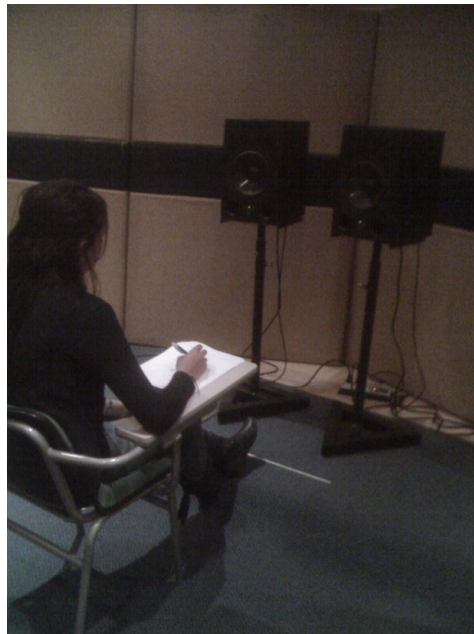
Otro aspecto considerado para el diseño del Test, fue el factor de *fatiga*. Todos los sujetos fueron sometidos a campos sonoros, lo cual implica la exposición a niveles de presión sonora moderados, de acuerdo a la calibración del sistema. La

duración promedio de la Prueba de Escucha para cada sujeto fue de 3:45 (tres minutos con cuarenta y cinco segundos). Tanto la duración de la muestra de música anecoica seleccionada para la auralización (7 segundos), como los valores de diferencia mínima (JND) para la discriminación de muestras según sus parámetros acústicos, fueron estipulados de acuerdo a este factor.

4.6.1 Aplicación del test

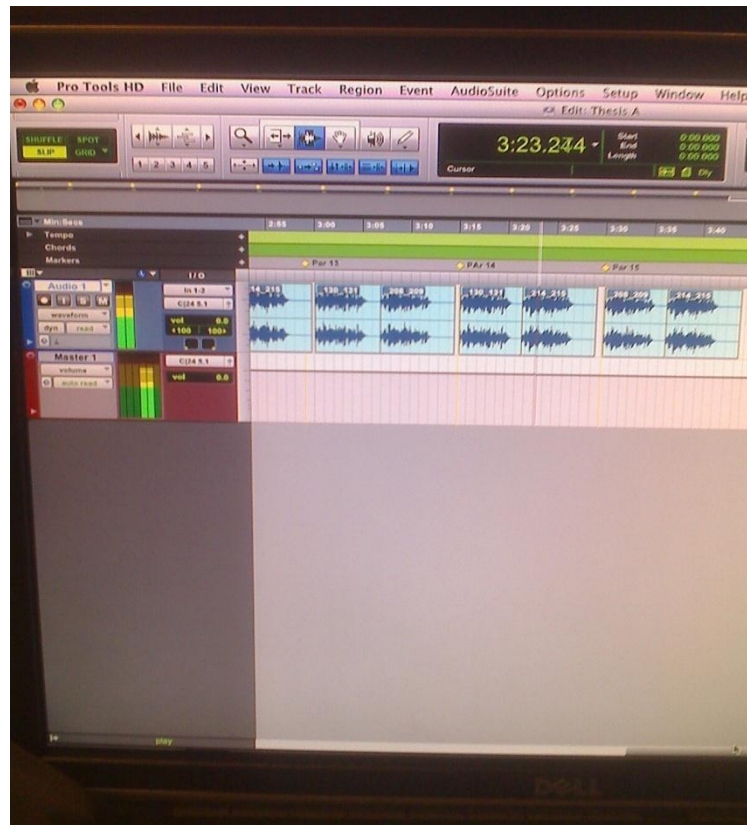
Un total de 32 personas fueron encuestadas, realizando la Prueba de Escucha, en el Test de Preferencia Subjetiva. La prueba fue aplicada de forma individual. Cada sujeto se ubicó en el punto de escucha, a 1.5m del sistema de reproducción Stereo Dipole, como se ilustra en la Figura 58.

Figura 58. Aplicación de Prueba de Escucha



En la Figura 59 se muestra la pantalla del sistema Pro Tools HD durante la aplicación del test. En una sesión multipista fueron ubicados los pares de muestras stereo, correspondientes a la simulación de la sala, todos de forma consecutiva, con un espacio de 5 segundos para seleccionar la muestra preferida para cada par el cuestionario.

Figura 59. Software Pro Tools HD en Prueba de Escucha



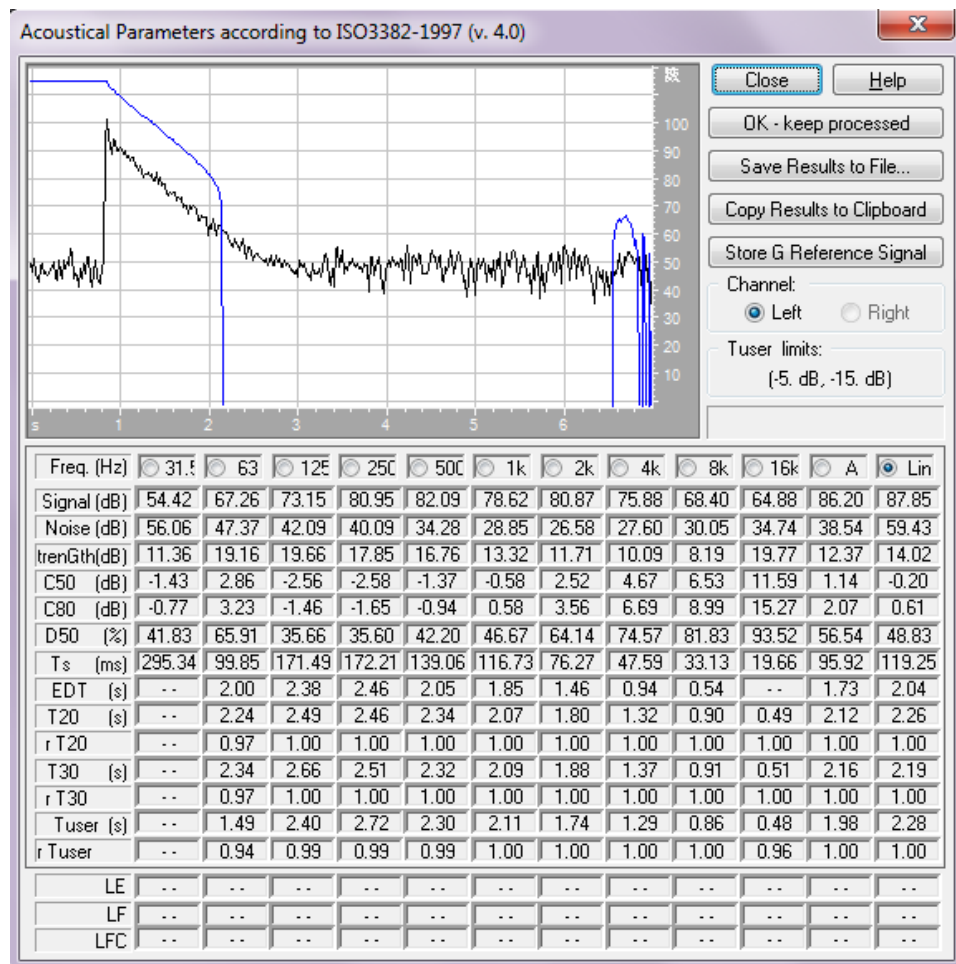
La sesión multipista fue creada con dos *tracks* de audio, uno para la ubicación de las muestras de simulación, y el *master track*, el cual contiene el proceso de ecualización configurado en el proceso de calibración para la reproducción de los campos sonoros. El Test de Preferencia subjetiva fue aplicado en dos sesiones, en las cuales se utilizaron las mismas condiciones acústicas y configuración del sistema de reproducción.

5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN SALA DE CONCIERTOS BIBLIOTECA LUIS ANGEL ARANGO

Para obtener el tiempo de reverberación medido de la sala, se realizó un análisis de parámetros acústicos mediante el plugin *Acoustical Parameters 3382*, de la suite de Aurora. Cada una de las respuestas impulsivas capturadas en la medición fue importada en el software Adobe Audition, y posteriormente analizada con el plugin. Como se ilustra en la Figura 60, la ventana de resultados de análisis del plugin permite obtener datos del tiempo de reverberación de la sala (definido como T_{user}), además de sus parámetros derivados, tales como EDT, T20 y T30, y parámetros de claridad o relaciones energéticas como C50 y C80. Todos los datos son obtenidos en bandas de octava. Si ilustra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos en el primer punto de medición para la posición de fuente **A**.

Figura 60. Resultados de *parámetros acústicos* para punto **A**



Una base de datos de resultados de análisis de parámetros acústicos en cada punto de medición fue creada con el fin de realizar los promedios aritméticos de los valores referentes al tiempo de reverberación, EDT, T20, T30 para cada banda de frecuencias. En la Tabla 8 se ilustran los resultados obtenidos para estos parámetros acústicos.

Tabla 8. Valores obtenidos de *parámetros acústicos*

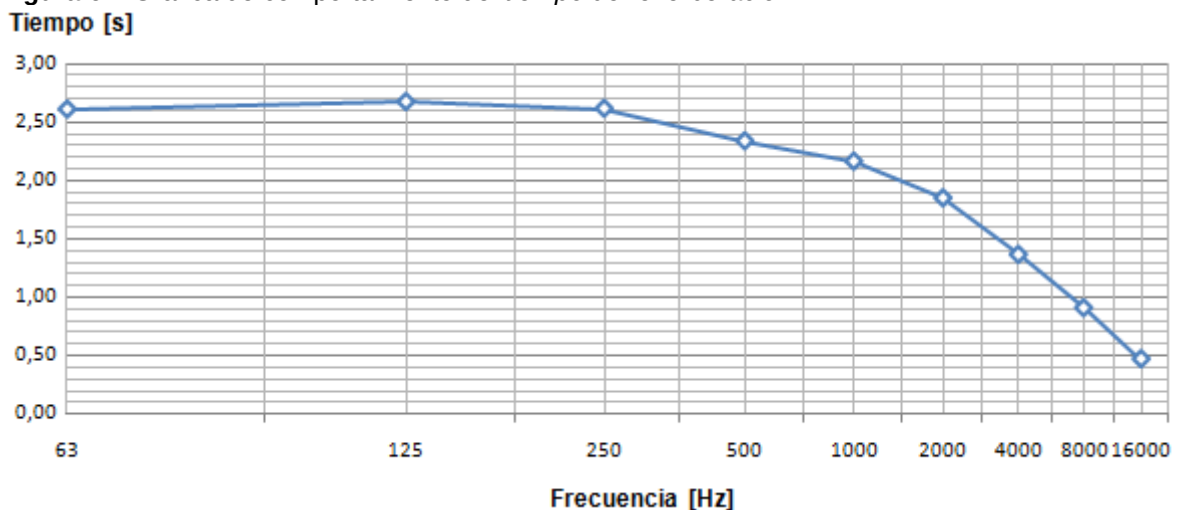
Freq [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
EDT [s]	2.12	2.21	2.63	2.20	2.07	1.73	1.25	0.82	0.50
T20 [s]	3.34	2.89	2.60	2.37	2.17	1.87	1.39	0.89	0.46
T30 [s]	3.08	3.16	2.65	2.36	2.16	1.88	1.41	0.90	0.47
Tuser [s]	2.61	2.67	2.61	2.34	2.16	1.85	1.36	0.90	0.47

El valor de *tiempo de reverberación* general de la sala, tomado para la evaluación de su calidad acústica fue el RT_{mid} ; definido como el promedio de los valores de tiempo de reverberación obtenidos en las bandas de 500Hz y 1000Hz. Según los resultados de la Tabla 8 fue posible obtener dicho valor mediante:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}{2}$$

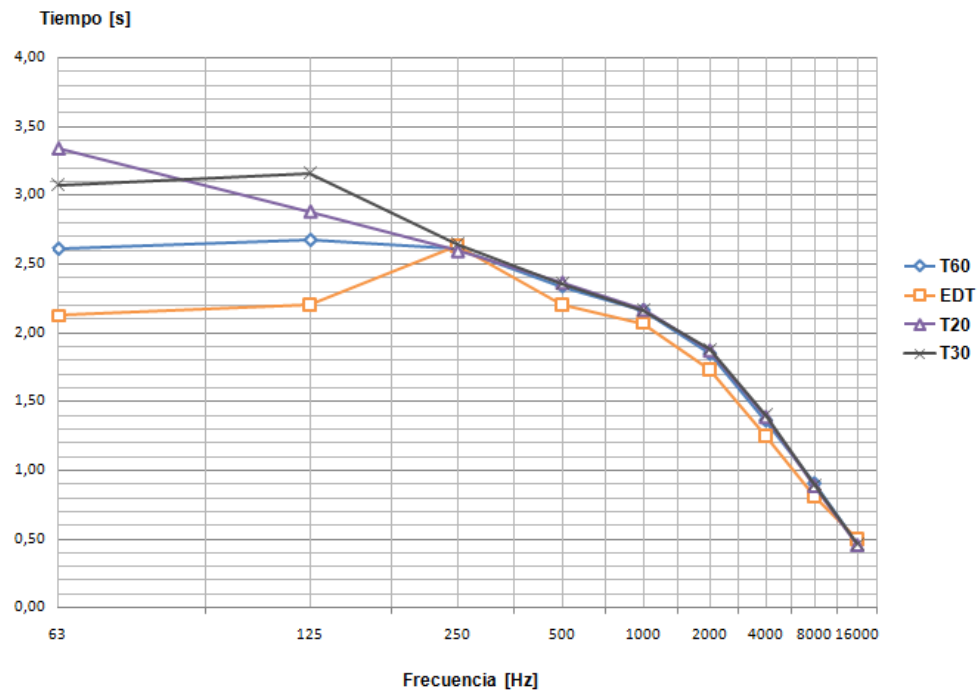
Siendo 2.34s el valor de *tiempo de reverberación* obtenido en 500Hz y 2.16s el *tiempo de reverberación* obtenido en 1000Hz, *tiempo de reverberación* obtenido mediante medición de parámetros acústicos es **2.25s**. La Figura 61 muestra el comportamiento del *tiempo de reverberación medio* de la sala en función de la frecuencia, el cual es producto del proceso de promediación realizado por banda de octava para los parámetros acústicos. (Tabla 8).

Figura 61. Gráfica de comportamiento del *tiempo de reverberación*



Un análisis de parámetros derivados del *tiempo de reverberación de la sala* también fue realizado mediante los datos obtenidos en las mediciones. Dichos parámetros temporales, EDT (Early Decay Time), T20 y T30, fueron obtenidos mediante *Acoustical Parameters* de Aurora. Las gráficas de comparación entre los parámetros acústicos promedio temporales de la sala se muestran en la Figura 62.

Figura 62. Gráfica de *tiempo de reverberación, EDT, T20 y T30*



5.1.1 Comparación de tiempo de reverberación medido con valores óptimos recomendados

El uso de la Sala de Conciertos de la Biblioteca Luis Ángel Arango es destinado, principalmente, a la interpretación de *música de cámara*. Un tiempo de reverberación óptimo para una sala de este tipo debe estar entre 1.3 y 1.7s. El *tiempo de reverberación medio* obtenido en la sala fue 2.25s, el cual es un valor que excede la recomendación dada por Carrión (expuesta en la sección 4.1.2.1). De hecho, el tiempo de reverberación medio obtenido en la sala mediante mediciones de parámetros acústicos, no cumple con los requisitos para ningún tipo de música, como se expone en la Tabla 9.

Tabla 9. Comparación de RT_{mid} obtenido con valores recomendados

Tipo de música	RT_{mid} óptimo (s)	RT_{mid} obtenido
Música sinfónica	1.8 – 2.0	2.25
Música barroca y clásica	1.6 – 1.8	2.25
Música de cámara	1.3 – 1.7	2.25
Ópera	1.2 – 1.5	2.25

El exceso de reverberación está dado por un acondicionamiento acústico inapropiado. La sala carece de tratamiento enfocado a la absorción sonora, y el comportamiento acústico de los materiales presentes en su interior no permite obtener un control sobre este fenómeno.

El índice de *Calidez* (*BR*) de la sala, fue analizado según los datos obtenidos en las mediciones de parámetros acústicos, al igual que el índice de *Brillo* (*Br*). De acuerdo con las ecuaciones definidas en la sección 4.1.3, los valores obtenidos para estos parámetros subjetivos son expuestos en la Tabla 10, donde se realiza una comparación entre los dichos valores obtenidos, y los valores recomendados.

Tabla 10. Valores de parámetros subjetivos

Br	Br óptimo	BR	BR óptimo
0.74	< 0.87	1.18	$1.10 < BR < 1.45$

El valor obtenido para el índice de *Brillo* de la sala cumple con lo estipulado por la recomendación consultada, por lo cual el comportamiento sonoro de la sala en altas frecuencias es considerado adecuado.

El índice de *Calidez* cumple con el rango de valores recomendados, por lo cual el comportamiento en bajas frecuencias de la sala puede considerarse apropiado. Sin embargo, es pertinente tener en cuenta que los valores recomendados consultados son propuestos para salas con un RT_{mid} máximo de 1.8s. El RT_{mid} obtenido para la sala excede el valor estipulado por la recomendación.

Es relevante considerar las condiciones del diseño arquitectónico de la sala que influyen en sus cualidades acústicas. De acuerdo al levantamiento realizado, se encontró que el volumen acústico real de la sala no se limita al espacio comprendido por el escenario y las áreas de audiencia. Existe una conexión entre

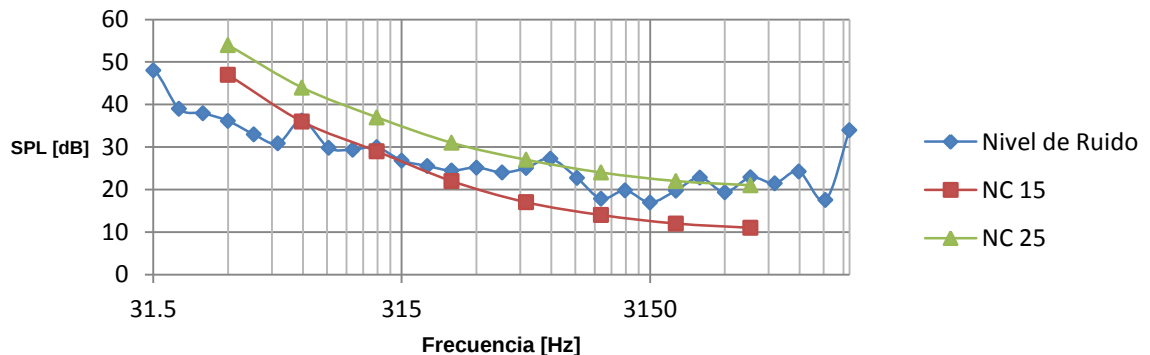
el volumen acoplado del órgano tubular de la sala con un volumen mayor, que hace parte del edificio en el cual está construida la sala.

Este volumen total no cuenta con un tratamiento acústico apropiado. El revestimiento interior de sus superficies límite está elaborado en concreto. Esto provoca que el volumen acústico efectivo de la sala sea considerable, lo cual incrementa el tiempo de reverberación total. Es necesario realizar un tratamiento acústico a este gran volumen acoplado, con el fin de reducir el volumen acústico total. Una instalación de material absorbente al exterior del acabado en madera que compone el techo de la sala podría controlar la reverberación de la sala, y por lo tanto optimizar su comportamiento acústico.

5.2 NIVEL DE RUIDO EN SALA DE CONCIERTOS BIBLIOTECA LUIS ANGEL ARANGO

La Figura 63 muestra los valores de nivel de ruido obtenidos en la sala por bandas de 1/3 de octava, los cuales son comparados con el rango de Curvas NC de nivel de ruido recomendado. Para salas de concierto, los valores recomendados de ruido de fondo, según Beranek, deben ajustarse a las curvas NC 15 y NC 25.

Figura 63. Resultados de medición de ruido de fondo



En general, la sala cumple con los valores recomendados de nivel de ruido dados por las Curvas NC. Los valores obtenidos en las bandas de 1250Hz y 5000Hz presentan un ligero incremento de nivel no acorde con la recomendación. A pesar de eso, dicho incremento no supera los 5dB, y no afecta significativamente el nivel de ruido general de la sala.

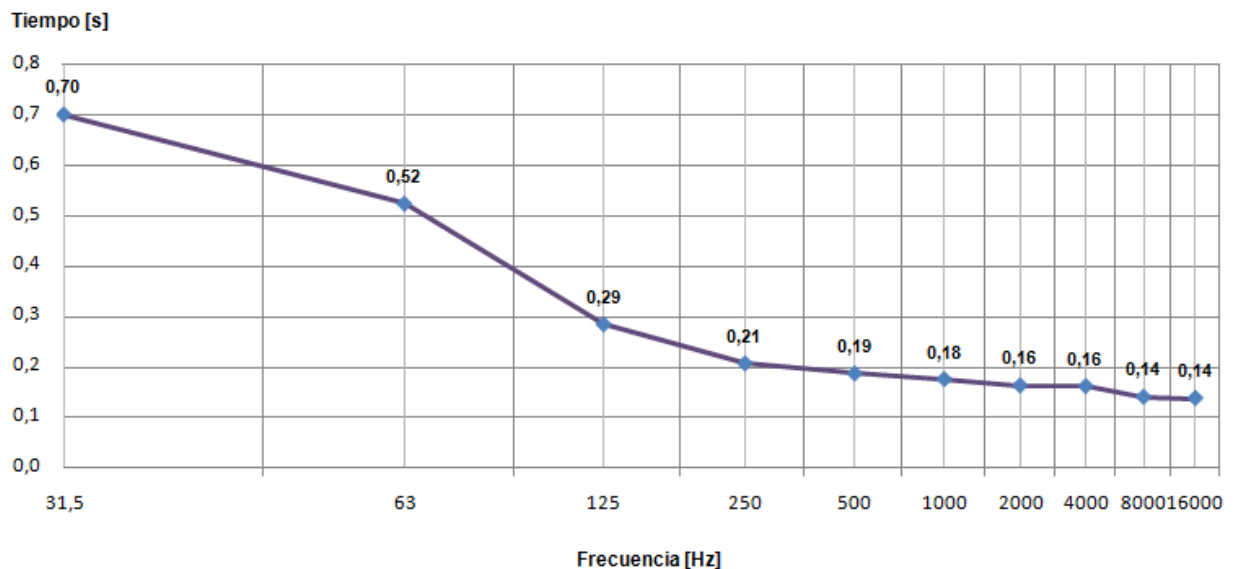
Dentro del protocolo de medición del *tiempo de reverberación* en la sala, el Nivel Sonoro Continuo Equivalente (L_{eq}) promedio obtenido fue 33dBA, lo cual es un valor apropiado para las condiciones de medición. El nivel producido por las fuentes impulsivas utilizadas en las mediciones fue siempre superior a 90dB, por lo cual se cumplen los requisitos dados por la norma ISO 3382.

5.3 TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN SALA DE PRUEBAS DE ESCUCHA

El tiempo de reverberación obtenido en el *control room* destinado a las Pruebas de Escucha del Test de Preferencia Subjetiva fue analizado mediante el plugin *Acoustical Parameters*, de la suite de Aurora.

En la Figura 64 se ilustra el comportamiento del *tiempo de reverberación* obtenido respecto a la frecuencia. Los valores utilizados fueron calculados a partir del promedio aritmético de los datos producto de la medición en los distintos puntos de la sala.

Figura 64. Gráfica de comportamiento del *tiempo de reverberación* en Control Room



El valor de *tiempo de reverberación medio*, definido como el promedio de los valores de tiempo de reverberación obtenidos en las bandas de 500Hz y 1000Hz, fue calculado mediante los datos ilustrados en la Figura 64, mediante:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}{2}$$

Siendo 0.19s el valor de *tiempo de reverberación* obtenido en 500Hz y 0.18s el *tiempo de reverberación* obtenido en 1000Hz, *tiempo de reverberación* obtenido mediante medición de parámetros acústicos es **0.185s**.

El valor obtenido es adecuado para una sala destinada a pruebas de escucha con auralización, de acuerdo a la recomendación consultada (Farina, 2004). Un ambiente completamente anecoico no es recomendable para una prueba de

escucha de este tipo, debido a la sensación producida en el oyente cuando se produce silencio en la sala [20].

Según un análisis perceptual, el *control room* utilizado como sala de pruebas de escucha, presenta un defecto acústico de reflexiones. En la zona posterior, se puede apreciar la presencia de ecos, lo cual puede ser atribuido a un tratamiento acústico no apropiado para las superficies paralelas presentes.

5.4 TEST DE PREFERENCIA SUBJETIVA

5.4.1 Aplicación de Ley de Juicio Comparativo (Escalamiento Lineal de Thurstone)

El Método de las Comparaciones Apareadas de Thurstone fue utilizado para analizar y hallar los valores en la escala lineal de los estímulos representados por los campos sonoros en el Test de Preferencia Subjetiva.

La Tabla 11 ilustra la Matriz de Frecuencias Acumuladas resultante de los datos obtenidos a través del Test de Preferencia, donde se denotan con las letras A, B, C, D, E y F a las seis muestras correspondientes a las simulaciones de campos sonoros. Los datos corresponden a las frecuencias de elección que tuvo cada campo sonoro dentro del test de preferencia, para cada par de comparación de muestras.

Tabla 11. Matriz de Frecuencias Acumuladas

	A	B	C	D	E	F
A	-	7	11	14	10	3
B	26	-	17	24	15	8
C	22	20	-	20	18	5
D	19	9	13	-	12	8
E	23	18	15	21	-	6
F	30	25	28	25	27	-
Σ	120	79	84	104	82	30

La Matriz anterior es formada teniendo en cuenta un $n=32$, es decir, el número total de sujetos. Y cada número en las celdas representa la frecuencia de elección de cada campo sonoro.

Las sumatorias de los valores de cada columna fueron calculados y ordenadas en forma ascendente, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Tabla Ordenada de Frecuencias Acumuladas

	F	B	E	C	D	A
A	3	7	10	11	14	-
B	8	-	15	17	24	26
C	5	20	18	-	20	22
D	8	9	12	13	-	19
E	6	18	-	15	21	23
F	-	25	27	28	25	30
Σ	30	79	82	84	104	120

Cada entrada de la matriz indica el número de veces que el campo sonoro de la columna es preferido sobre el campo sonoro de la fila.

La Tabla 13 muestra la matriz de Proporciones de Preferencia, teniendo en cuenta un $n=32$, donde se expresa el número de veces que se obtiene un juicio de preferencia de un estímulo (campo sonoro) sobre otro. Tomando como ejemplo la comparación entre la muestra A y la muestra B. La proporción de preferencia puede expresarse mediante:

$$P = \frac{26 \text{ (Frecuencia de elección)}}{32 \text{ (número de sujetos)}} = 0.813$$

Tabla 13. Matriz de Proporciones

	F	B	E	C	D	A
A	0.094	0.219	0.313	0.344	0.438	0.5
B	0.25	0.5	0.469	0.531	0.75	0.813
C	0.156	0.625	0.563	0.5	0.625	0.688
D	0.25	0.281	0.375	0.406	0.5	0.594
E	0.188	0.563	0.5	0.469	0.656	0.719
F	0.5	0.781	0.844	0.875	0.781	0.938

Según González [18], puede asumirse el supuesto de que cualquier objeto juzgado contra sí mismo recibirá un número azaroso de elecciones. Por lo tanto, existe una expectativa de que el 50% de las veces el sujeto prefiera el objeto de la columna, y 50% de que prefiera el objeto de la fila. Por lo tanto, en la Matriz de Proporciones, se utilizaron valores de 0.5 en las intersecciones de comparación entre campos sonoros idénticos.

Los valores obtenidos en la Matriz de Proporciones fueron transformadas a puntuaciones típicas (z), utilizando la *tabla de la distribución normal*. Estas puntuaciones se ilustran en la Tabla 14.

Tabla 14. Matriz de puntuaciones típicas (z)

	F	B	E	C	D	A
A	-1.32	-0.77	-0.49	-0.44	-0.16	0
B	-0.67	0	-0.08	0.08	0.68	0.89
C	-1.01	0.32	0.16	0	0.32	0.49
D	-0.67	-0.58	-0.32	-0.24	0	0.24
E	-0.88	0.16	0	-0.08	0.4	0.58
F	0	0.78	1.01	1.16	0.77	1.54

Posteriormente, se calcularon las diferencias entre las columnas correspondientes a cada estímulo, como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Matriz de diferencias

	B-F	E-B	C-E	D-C	A-D
	0.55	0.28	0.05	0.28	0.16
	0.67	0.08	0.16	0.6	0.21
	1.33	0.16	0.16	0.32	0.17
	0.09	0.26	0.08	0.24	0.24
	1.04	0.16	0.08	0.48	0.18
	0.78	0.23	0.15	0.39	0.77
Σ	4.46	1.17	0.68	2.31	1.73
n	6	6	6	6	6
Media	0.743	0.195	0.113	0.385	0.288

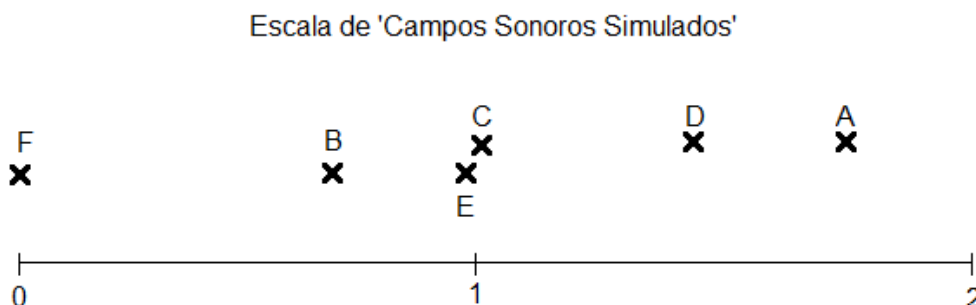
Finalmente, se asignaron valores de la escala a cada campo sonoro acumulando las distancias o diferencias que hay entre ellos, tomando como punto de partida la muestra con menor número de elecciones sobre los demás (muestra F). Los valores en la escala de 'Preferencia de Ubicaciones de Audiencia en Sala de Conciertos' se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores en escala lineal

F		0
B	0 + 0.743	0.743
E	0 + 0.743 + 0.195	0.938
C	0 + 0.743 + 0.195 + 0.113	1.051
D	0 + 0.743 + 0.195 + 0.113 + 0.385	1.436
A	0 + 0.743 + 0.195 + 0.113 + 0.385 + 0.288	1.724

Ubicando los valores de escala correspondientes a la Preferencia en el continuo, se obtiene la Figura 65, que es la escala de 'Preferencia de Campos Sonoros Simulados'.

Figura 65. Continuo lineal de Preferencia



Según los resultados obtenidos, la Muestra A es fue la muestra con mayor nivel de preferencia. El campo sonoro simulado a partir de esa respuesta impulsiva corresponde a la ubicación más cercana al escenario principal (segunda fila, zona central de audiencia), con un tiempo de reverberación de 2.33s. De acuerdo a esto, la preferencia de los sujetos respecto a los campos sonoros es altamente influenciada por la presencia del campo directo en la sala.

La muestra B, correspondiente a un campo sonoro ubicado en la zona lateral de audiencia, obtuvo un bajo nivel de preferencia. La simulación realizada, de acuerdo a un análisis perceptual, refleja un problema de tipo acústico en la sala. Las últimas sillas de las filas ubicadas en las zonas laterales de la sala están a una distancia considerablemente corta respecto a las paredes laterales, lo cual puede influir en la amplitud y tiempo de llegada de las reflexiones en el oyente. La simulación de campos sonoros realizada por medio de procesos de convolución permitió emular de manera fiel el comportamiento acústico en las distintas ubicaciones dentro de la sala. Mediante un análisis perceptual, fue posible

reconocer con claridad la ubicación de la fuente en el escenario, teniendo en cuenta la orientación del oyente. De esta forma, la reproducción sonora mediante el sistema Stereo Dipole permite distinguir la zona del área de audiencia desde la cual se emula el campo sonoro, ya sea la zona central o una de las zonas laterales.

El valor máximo de $IACC_E$ obtenido en las respuestas impulsivas seleccionadas para la auralización de la sala es 0.66, correspondiente a la muestra C. Este valor, según los valores recomendados [1], permite dar un buen juicio del comportamiento acústico de la sala. El campo sonoro de mayor preferencia, correspondiente a la muestra A, presenta un valor de $IACC_E$ de 0.59, el cual es un valor cercano al recomendado. La muestra de menor preferencia (F) presenta un valor de 0.15, el cual es considerablemente menor. De acuerdo a estos resultados, puede decirse que los sujetos presentan una mayor preferencia por valores altos de $IACC_E$, y un reducido nivel de preferencia para los valores bajos. Se hace evidente la fuerte influencia del alto campo reverberante presente en la sala. La Muestra F, la cual corresponde a la respuesta impulsiva más alejada del escenario, obtuvo el menor nivel de preferencia. Según la Tabla 11, la frecuencia de elección de esta muestra es exactamente cuatro veces menor respecto a la Muestra A (Muestra más preferida).

En general, el comportamiento del parámetro ITDG en la sala es adecuado. De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones, y específicamente de las seis respuestas impulsivas utilizadas en la auralización, los valores nunca fueron superiores a 20ms, el cual es el valor máximo recomendado por Carrión [1]. Bajo estas condiciones, se asume que la influencia de este parámetro en la simulación de dichos campos sonoros y en su diferenciación, es baja.

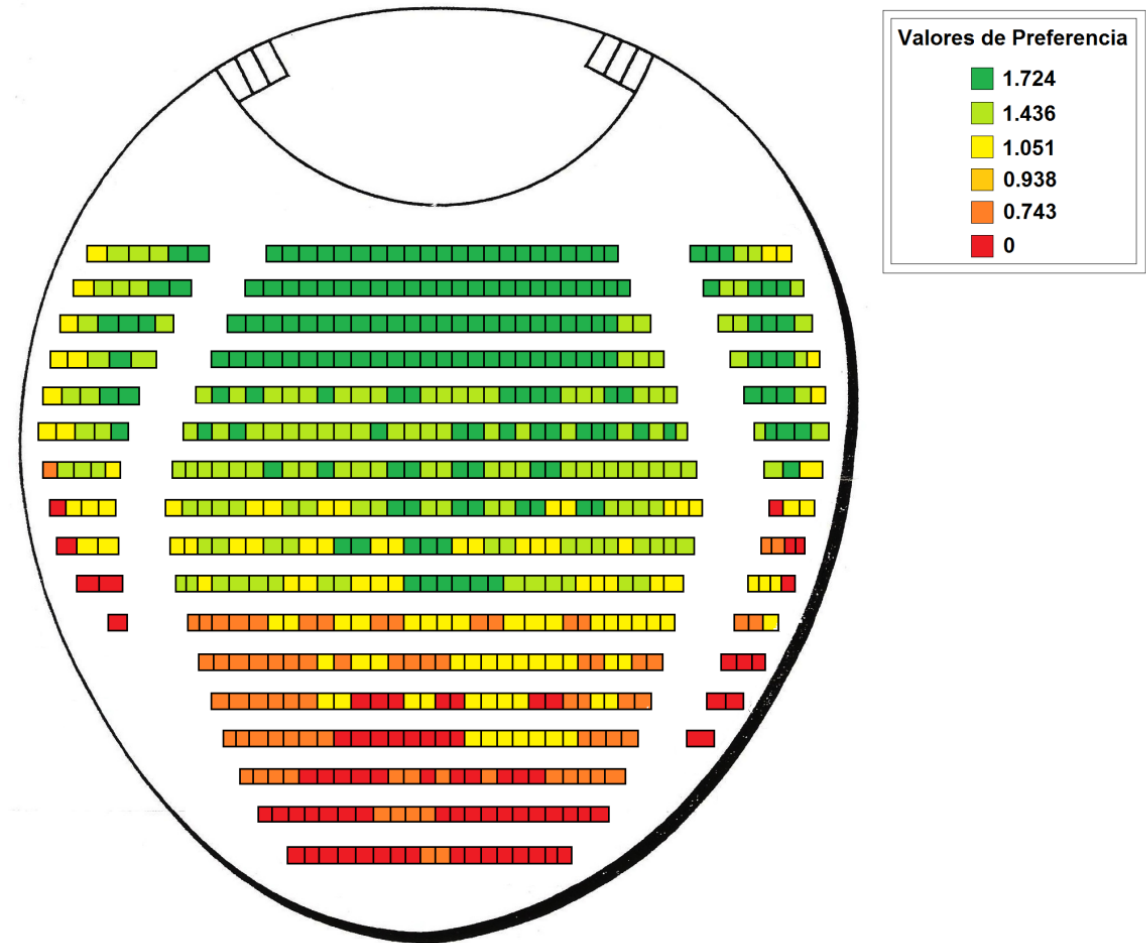
Es importante considerar que el parámetro acústico G (sonoridad) obtuvo un mayor nivel de dispersión en los datos obtenidos de acuerdo a el análisis de las respuestas impulsivas binaurales medidas en cada ubicación de audiencia. Esto puede ser atribuido al método de medición, ya que la fuente sonora utilizada (globos de aire) no produjo, en todas las excitaciones del recinto, el mismo nivel de presión sonora. Variables como el volumen del globo y la fuerza aplicada para producir la explosión pueden considerarse causas de este resultado.

5.4.2 Mapa de Preferencia Subjetiva

De acuerdo a los resultados obtenidos en el Test de Preferencia, y los valores de escala obtenidos en la aplicación de la Ley de Juicio Comparativo, fue posible elaborar el Mapa de Preferencia de la sala. El mapeo se hizo de acuerdo a las respuestas impulsivas de las seis muestras principales. Los valores de parámetros acústicos obtenidos, que fuesen similares a los valores en las ubicaciones restantes, permitieron agrupar dichas ubicaciones de acuerdo a los valores de escala, donde teóricamente, el comportamiento acústico es similar.

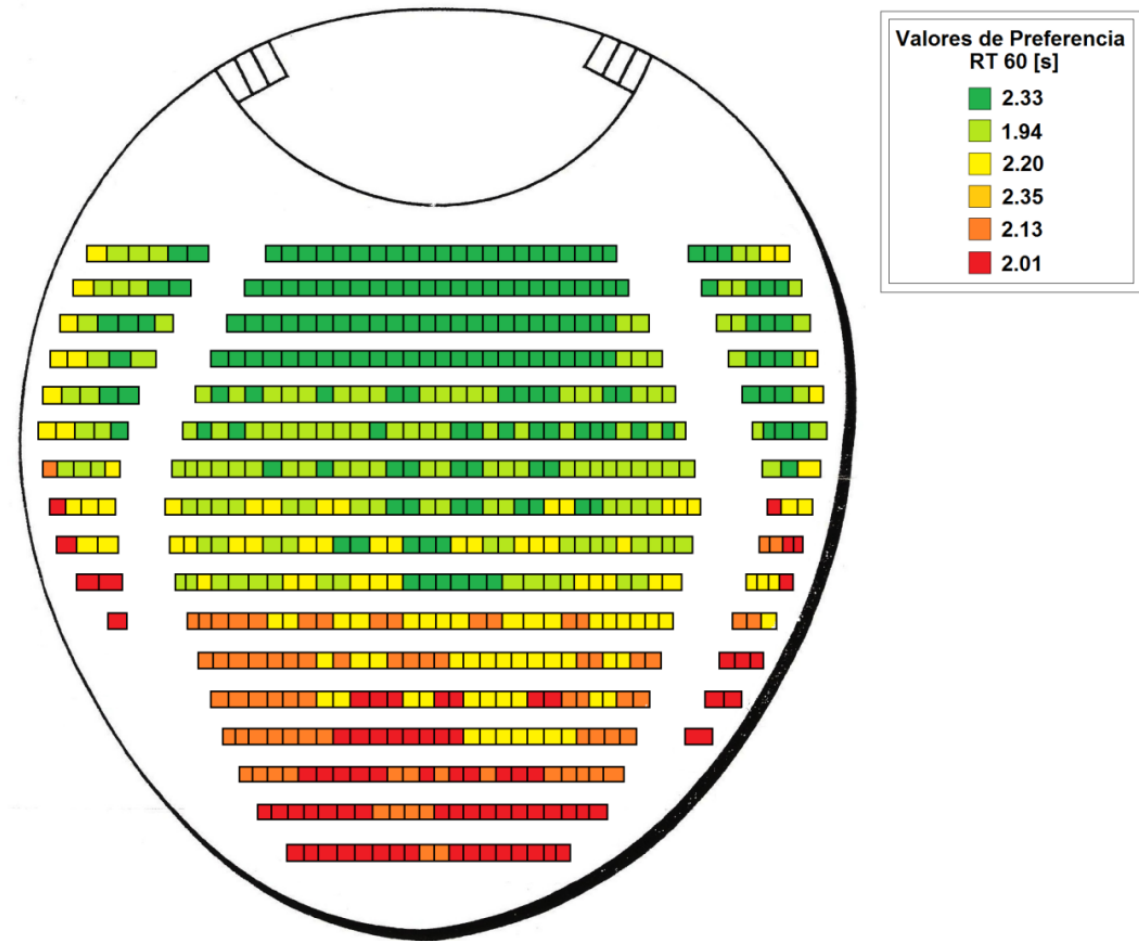
El Mapa de Preferencia se ilustra en la Figura 66, donde fueron analizados los datos obtenidos de parámetros acústicos para las ubicaciones de las áreas de audiencia relacionados con los niveles de preferencia dados por los resultados del Test, correspondientes a los campos sonoros simulados de las seis respuestas impulsivas principales.

Figura 66. Mapa de Preferencia



El comportamiento del *tiempo de reverberación* de acuerdo a la preferencia es ilustrado en la Figura 67.

Figura 67. Mapa de Preferencia de acuerdo a RT60



5.4.3 Software de Aplicación de Test de Preferencia

En el software Matlab fue programado un software que permite al usuario realizar el Test de Preferencia, escuchando todos los pares de muestras, y seleccionando para cada uno su simulación de preferencia. El software guarda los datos en una tabla para su posterior almacenamiento y análisis. La interfaz gráfica del software se muestra en la Figura 67.

Figura 67. Software de aplicación de Test de Preferencia

FINAL

MUESTRA 1

Audio1Audio2Elija un Audio

MUESTRA 2

MUESTRA 3

MUESTRA 4

MUESTRA 5

MUESTRA 6

MUESTRA 7

MUESTRA 8

MUESTRA 9

MUESTRA 10

MUESTRA 11

MUESTRA 12

MUESTRA 13

MUESTRA 14

MUESTRA 15

GUARDAR RESULTADOS

GUARDAR TABLA

	1	2
1		
2		
3		
4		

6. CONCLUSIONES

- La Teoría de Preferencia Subjetiva es aplicable a Salas de Concierto en Colombia. La técnica de auralización utilizada permitió realizar una simulación adecuada de fuentes virtuales en la sala estudiada, donde fue posible para los sujetos distinguir las ubicaciones en las áreas de audiencia simuladas mediante campos sonoros reproducidos en la sala de pruebas de escucha.
- Según los resultados del Test de Preferencia Subjetiva, los sujetos presentaron mayor preferencia hacia las ubicaciones más próximas al escenario, siendo la muestra A (segunda fila) el campo sonoro que presentó el mayor nivel de preferencia. Bajo esta observación, puede decirse que las personas prefieren estar en presencia del campo directo al interior de la sala. De forma contraria, la muestra F, cuya respuesta impulsiva fue capturada en la ubicación más lejana respecto al resto, obtuvo el menor nivel de Preferencia.
- El parámetro de *sonoridad* (G) presentó valores altos en las sillas más preferidas, por lo cual, los sujetos prefieren percibir un mayor nivel de presión sonora por parte de la fuente. La acción del campo reverberante, que provoca la sensación de 'lejanía' dentro de la sala, no obtuvo una frecuencia de elección considerable.
- Los sujetos presentaron mayor preferencia en ubicaciones con valores de *tiempo de reverberación* superiores al valor medio total obtenido en la sala, siendo el *tiempo de reverberación* preferido 2.33s.
- La Sala de Conciertos de la Biblioteca Luis Ángel Arango requiere un riguroso acondicionamiento acústico interior, debido al excesivo tiempo de reverberación obtenido en las mediciones de parámetros acústicos. Es necesario realizar un control de absorción en las superficies presentes, con el fin de controlar dicho fenómeno de reverberación, así como el volumen acústico de la sala.
- El Control Room del Estudio C de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, recinto utilizado para la aplicación del Test de Preferencia, es un recinto apto para la realización de pruebas de escucha mediante auralización. El acondicionamiento acústico implementado, y el equipamiento de audio instalado en el mismo, permitió obtener condiciones óptimas para la reproducción de campos sonoros y fuentes virtuales simulados mediante procesos de convolución y cancelación *cross-talk*.

7. RECOMENDACIONES

- El método de medición utilizado para la obtención de parámetros acústicos (*respuesta impulsiva integrada*), puede implementarse bajo mejores condiciones de medición. Las fuentes sonoras utilizadas (globos de aire) poseen falencias en la radiación omnidireccional, así como en la radiación en frecuencias bajas. Un método de medición que incluya un altavoz omnidireccional que cumpla con los requerimientos de la norma ISO 3382, para producir una señal de excitación MLS o *Sine Sweep*, podrá permitir obtener respuestas impulsivas de mejores características.
- El análisis de Preferencia Subjetiva no se limita a un análisis psicométrico netamente auditivo (Ando, 2010). Es posible hallar valores de Preferencia en escala lineal para campos sonoros incluyendo la visualización de las ubicaciones en las áreas de audiencia de una sala de conciertos, lo cual podría complementar el trabajo realizado en esta investigación. De igual forma, un análisis de Preferencia Individual entre sujetos, así como un análisis de parámetros acústicos individuales, puede realizarse con el fin de obtener resultados más específicos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carrión, A. *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 1998.
- [2] Beranek, L.L. *‘Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture’* Segunda Edición. Editorial Springer-Verlag New York Inc. 2004.
- [3] Aulestia, C. *Estudio del estado acústico de dos iglesias patrimoniales de Quito (La Catedral y La Compañía de Jesús)*. Proyecto de grado. Universidad de Las Américas, 2010.
- [4] Oppenheim, A. et al. *Señales y Sistemas*. Segunda Edición. Ed. Pearson Prentice Hall, 1998.
- [5] Bertrán, E. *Señales y Sistemas de Tiempo Discreto*. Edicions UPC, 2003.
- [6] Ferreyra, S., Ramos, O. *Análisis físico-acústico espacial de respuestas impulsivas binaurales (BRIR) obtenidas por métodos indirectos*. En: Mecánica Computacional Vol XXVII. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. San Luis, Argentina, 2008.
- [7] Segura, J, et al. *Análisis de respuestas impulsivas en salas de audición*. En: 6º Congreso Ibérico de Acústica (2010: León, España).
- [8] Wersényi, G. *Evaluation of dummy-head HRTFs in the horizontal plane based on the peak-valley structure in one-degree spatial resolution*. En: Inter-Noise 2006. Honolulu, Hawaii, USA. 2006.
- [9] M. Kleiner, B-I. Dalenbäck, y P. Svensson. *Auralization: An overview*. Journal of the Audio Engineering Society. 1983.
- [10] Segura, J, et al. *Sistemas de auralización y sonido 3D para su aplicación en entornos vituales de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico*. En: Jornadas de acústica Tecniacústica (2010: Cádiz, España).
- [11] Şaher, K., Rindel, J, Nijs, L. *Comparisons between Binaural In-situ Recordings an Auralizations*. En: 120th AES Convention. Paris, France, 2006.
- [12] Kirkeby, O., Nelson, P., Hamada, H. *The ‘Stereo Dipole’ – Binaural Sound Reproduction Using Two Closely Spaced Loudspeakers*. En: AES 102nd Convention. Munich, Germany, 1997.

- [13] Sato, S. *Theory of subjective preference for sound fields in concert halls: Process and application*. En: 2do Congreso Internacional de Acústica UNTREF (2010: Buenos Aires, Argentina).
- [14] Sato, S. *Auralization and visualization for seat selection system of concert halls and theaters*. En: 2do Congreso Internacional de Acústica UNTREF (2010: Buenos Aires, Argentina).
- [15] Ando, Y. *Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo*. En: Journal of the Acoustical Society of America 1983.
- [16] Ando, Y., Imamura, M. *Subjective preference test for sound fields in concert halls simulated by the aid of a computer*. En: Journal of Sound and Vibration
- [17] Thurstone, L. *Psychophysical Analysis*. American Journal of Psychology. 1927.
- [18] González, V. *Método de Escalamiento Unidimensional de Thurstone*. Psicometría I. Universitat de València. 2004.
- [19] Fujii, et al. *Spacial Distribution of Acoustical Parameters in Concert Halls: Comparison of Different Scattered Reflections*. Journal of Temporal Design in Architecture and the Enviroment, 2004.
- [20] Farina, A. et al. *Listening Tests Performed Inside a Virtual Room Acoustic Simulator*. En: I seminario Música Ciência e Tecnologia 'Acústica Musical'. São Paulo do Brasil, 3-5 November 2004.
- [21] Bork, I. *A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation*. En: Acta Acustica united with Acustica. Volume 86, Number 6. Noviembre, 2000.
- [22] Nelson, P. Hamada, H. *Surround Sound for all angles* En: Ingenia Magazine. London, UK. 2004.
- [23] Pätynen, J., Pulkki, V., y Lokki, T., *Anechoic recording system for symphony orchestra*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 94, nr. 6, pp. 856-865, November/December 2008. Website: <http://auralization.tkk.fi>
- [24] Chorubczyk, A. Masson, F. *Levantamiento y valoración de parámetros acústicos sobre dos auditorios argentinos modernos*. Primeras Jornadas Regionales de Acústica AdAA. Rosario, Argentina, Noviembre de 2009.

- [25] Sarmiento, A. *Validación de software para predicción acústica de salas y aplicación a diseño de aulas*. Proyecto de grado. Universidad de Vigo, 2003.
- [26] León, A. *Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía*. Universidad de Sevilla. 2007.
- [27] Thurstone, L. *A Law Of Comparative Judgment*. University Of Chicago. 1994.

GLOSARIO

AURALIZACIÓN: Proceso de presentación audible, por modelización física o matemática del campo sonoro de una fuente en un espacio, de tal forma que se simula la experiencia sonora en una determinada posición en el espacio modelado.

BRILLO: Término subjetivo relacionado con la presencia considerablemente notable de frecuencias altas. Se relaciona directamente con el comportamiento de la sala respecto a la interpretación musical y su percepción.

CALIDEZ: Término subjetivo relacionado con la presencia considerablemente notable de frecuencias bajas. Se relaciona directamente con el comportamiento de la sala respecto a la interpretación musical y su percepción.

CONVOLUCIÓN: Se denomina convolución a una función, que de forma lineal y continua, transforma una señal de entrada en una nueva señal de salida. La función de convolución se expresa por el símbolo.

CROSS-TALK: En el contexto de la reproducción sonora, es tradicionalmente interpretado como un sonido reproducido en una locación donde no se pretende que sea escuchado

DUMMY-HEAD: Torso artificial, que adjunta en su cabeza dos receptores que representan los oídos humanos.

FILTRO DIGITAL: Un filtro digital, es un filtro que opera sobre señales digitales. Es una operación matemática que toma una secuencia de números (la señal de entrada) y la modifica produciendo otra secuencia de números (la señal de salida) con el objetivo de resaltar o atenuar ciertas características.

INTERAURAL: Describir la diferencia entre la recepción de sonido (particularmente en el tiempo y la intensidad) por cada oído.

NIVEL DE PRESIÓN SONORA: El Nivel de Presión Sonora es la medición logarítmica del valor promedio de la presión sonora, respecto a un nivel de referencia. Generalmente ese nivel de referencia es lo que se considera la presión sonora, del sonido más débil audible: 20 micro Pascales. Mientras que la presión sonora se mide en Pascales, el Nivel de Presión Sonora se mide en decibeles SPL, y se abrevia 'dB SPL'.

RESPUESTA IMPULSIVA: Respuesta que engloba todas las características de transmisión de las ondas sonoras entre una fuente y un receptor, asumiendo que el sistema es Lineal e Invariante en el Tiempo (LTI).

RESPUESTA IMPULSIVA BINAURAL: Respuesta que engloba todas las características de transmisión de las ondas sonoras entre una fuente y un receptor de dos entradas, asumiendo que el sistema es Lineal e Invariante en el Tiempo (LTI).

REVERBERACIÓN: Es el grado de permanencia del sonido dentro de un recinto una vez que la fuente es interrumpida.

RUIDO: (entendido como sonido molesto) producido por la mezcla de ondas sonoras de distintas frecuencias y distintas amplitudes. La mezcla se produce a diferentes niveles ya que se conjugan tanto las frecuencias fundamentales como los armónicos que las acompañan

RUIDO DE FONDO: Cuando nos referimos a mediciones acústicas, o inspecciones en materia de ruido, se considera ruido de fondo cualquier sonido indeseado que se produce de forma simultánea a la realización de una medida acústica, y que puede afectar al resultado de la misma.

SEÑAL: Función de una o más variables independientes que contienen información acerca del comportamiento un fenómeno.

SISTEMA: Proceso en el cual las señales de entrada son transformadas, o provocan que el mismo responda de alguna forma, lo que da como resultado otras señales como salidas.

SONORIDAD: Se define como la diferencia entre en nivel total de presión sonora producido por una fuente omnidireccional en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente en campo libre y medido a una distancia de 10m (tomado como nivel de referencia).

STEREO DIPOLE: Un estéreo dipolo es una fuente sonora, en un sistema ambiofónico (sistema de reproducción por medio de altavoces en configuraciones estereofónicas o 5.1), compuesto por dos altavoces muy próximos entre sí, alrededor de 10° y 30° . Gracias a la corrección *Cross-Talk*, es posible recrear una imagen estéreo de 180° aproximadamente.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN: Tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial.

ANEXOS

ANEXO A. Método de Análisis por Ley de Juicio Comparativo (Escalamiento Unidimensional de Thurstone) por Vicent Gonzàlez.

LA LEY DE JUICIO COMPARATIVO

EL MÉTODO DE LAS COMPARACIONES APAREADAS (CASO V)

FIABILIDAD.

Thurstone (1927) propuso una serie de métodos útiles para ordenar objetos a lo largo de un continuo psicológico. Los objetos psicológicos son estímulos que provocan cierta reacción en el sistema sensorial de las personas; estos objetos o estímulos pueden ser el sonido de un teléfono, una persona bien vestida, una tela de seda, un caramelo, o un perfume. También pueden incluirse en esta categoría mensajes visuales, o afirmaciones como 'Me gusta la escuela'.

Todos los métodos que propuso se basan en su Ley de Juicio Comparativo.

La Ley de Juicio Comparativo

Thurstone estaba preocupado principalmente por el problema de cómo los estímulos psicológicos pueden ser medidos y comparados entre sí. En contraste, la medida de objetos físicos, es simple y directa. Si un científico quiere averiguar el peso de una serie de objetos, por ejemplo, tan sólo tiene que utilizar la escala y el instrumento de medida adecuados y anotar el peso correspondiente a cada uno de ellos. Seguidamente, los objetos pueden ser ordenados del más ligero al más pesado. Sin embargo, si no hay ninguna escala disponible, el proceso de ordenar los objetos en función de su peso relativo se complica considerablemente, ya que ineludiblemente implica juicios individuales. Se podría, por ejemplo, pedir a cada uno de los miembros de un grupo de personas que ordenaran los objetos desde el más ligero al más pesado sopesando en la mano cada uno de los objetos una y otra vez. Alternativamente, se podrían presentar todos los pares posibles de objetos y preguntar a cada persona qué objeto del par es el más pesado. En ambos casos, obtendríamos una ordenación de los pesos de los objetos basada en los juicios comparativos de un grupo de personas.

Thurstone reconoció que ésta era precisamente la situación del científico social que intenta medir un estímulo psicológico. Y su solución reside también en los juicios humanos. Imaginemos el siguiente ejemplo: a un grupo de personas se les da una lista de profesiones, y se les pide que evalúen cada una en base a su prestigio social relativo. La lista de profesiones representa los estímulos, y el

supuesto es que cada una de ellas puede ser ordenada a lo largo de un continuo en función del grado de prestigio social que cada una tiene. La Ley de Juicio Comparativo presupone que para cada estímulo –en este caso, para cada profesión- existe una respuesta que ocurre con la mayor frecuencia. Esta respuesta más frecuente es denominada respuesta, reacción o proceso discriminatorio modal. La respuesta de cada individuo implica un juicio acerca del grado de prestigio de cada profesión. No se supone que cada estímulo evoque siempre la misma respuesta para distintos individuos ni incluso para un mismo individuo en diferentes ocasiones. De este modo, aunque esta respuesta modal elicitará una respuesta modal del grupo de individuos en relación a su prestigio, esta respuesta modal no caracterizará todas las respuestas evocadas, pues no hay que olvidar que las respuesta modal es sólo la que se da en más ocasiones.

Thurstone asume que la distribución de todas las respuestas evocadas por cualquier estímulo es normal, siendo la media la respuesta modal. Sabemos que la distribución normal puede ser descrita mediante dos parámetros: su media y su desviación típica; y que en cualquier distribución normal, la media, la mediana y la moda tienen el mismo valor. La respuesta modal para un determinado estímulo (que equivale a la media de la distribución de las respuestas evocadas) es considerada el valor de la escala para ese estímulo, y la desviación típica de la mencionada distribución es la dispersión discrimininal para ese estímulo. Así pues, cualesquiera dos profesiones pueden diferenciarse en términos de sus respuestas modales, esto es, sus valores en la escala, y sus dispersiones discrimininales. Ahora las distintas profesiones podrían ser ordenadas a lo largo del continuo psicológico que representa prestigio social, calculando sus valores en la escala y ordenándolas desde la más a la menos prestigiosa.

El supuesto básico que subyace la Ley del Juicio Comparativo es el siguiente: el grado en el que dos estímulos cualesquiera pueden ser discriminados es una función directa de la diferencia percibida existente en relación con el atributo en cuestión. Continuando con el ejemplo anterior, probablemente muchos individuos juzgarán que la profesión de médico tiene más prestigio social que la de mecánico de automóviles. Sus valores relativos en la escala reflejarán esta diferencia. Si se juzga que dos estímulos tienen exactamente el mismo valor en la escala -es decir, el 50% de los sujetos consideran que la profesión A es más prestigiosa que la profesión B, y el otro 50% exactamente a la inversa-, entonces se considera que los dos estímulos tienen la misma cantidad de la propiedad. De este modo, la ubicación de las profesiones a lo largo del continuo de prestigio social debe reflejar el grado en el que los individuos pueden discriminar entre el prestigio percibido de las distintas profesiones. A mayor distancia en el continuo entre dos profesiones cualesquiera, mayor grado en el que los individuos están de acuerdo en que una de las profesiones tiene más prestigio que la otra. Inversamente, cuanto menor sea la distancia en el continuo entre cualesquiera dos profesiones, mayor confusión existirá acerca del prestigio relativo de las dos profesiones. El grado en

el que dos profesiones cualesquiera pueden ser discriminadas es un reflejo directo de sus diferencias percibidas en cuanto a su prestigio social.

Así pues, los objetos psicológicos pueden tomar valores de una escala, pero sólo dentro de un marco de comparaciones relativas. Para ello es necesario, por lo menos, disponer de dos objetos de manera que la comparación pueda ser realizada. En este caso, Thurstone asume que las respuestas a cada objeto se distribuyen normalmente y que la varianza de las respuestas alrededor de cada media es igual para ambos objetos. Veamos pues a través de un ejemplo sencillo cómo podrían asignarse valores relativos a dos estímulos que son comparados. Supongamos que i y j son dos objetos psicológicos que tienen que ser juzgados en relación al siguiente continuo: actitud positiva hacia la asistencia a la escuela. Supongamos que i es el siguiente estímulo: 'Odio la escuela', y j : 'A veces la escuela es aburrida'.

Podríamos pedir a un grupo de sujetos que juzgaran qué afirmación es menos desfavorable a la asistencia a la escuela. Si el 80% de los sujetos eligiera j como menos desfavorable que i , y, por lo tanto, el 20% restante eligiera a i como menos desfavorable que j , podríamos argumentar que la respuesta media a j debería ser mayor que la respuesta media a i en una escala referida al continuo [aunque desconozcamos el valor de tales medias], es decir,

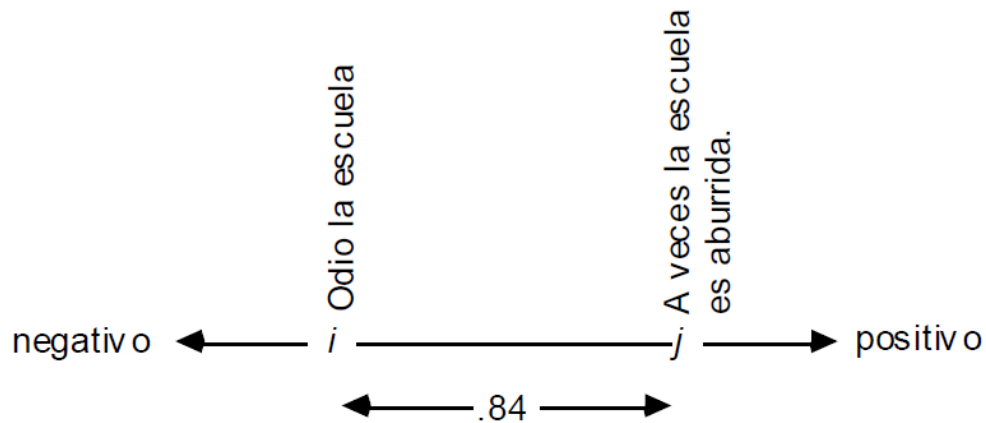
$$\bar{s}_j > \bar{s}_i$$

La distancia entre las dos medias [esto es, entre las respuestas modales de i y j] es una función del número de veces que j es valorada por encima de i . Utilizando comparaciones apareadas podríamos contar el número de veces que se da este juicio, y transformar esta frecuencia en una proporción de preferencia. Si en un grupo de 50 sujetos, j es preferida sobre i [es valorada como menos desfavorable a la asistencia a la escuela] 40 veces, entonces la proporción es 40/50 o 0.80.

Sin embargo, las proporciones pueden ser expresadas como puntuaciones normales de desviación (por ejemplo, puntuaciones típicas (z)). En el caso del ejemplo, y utilizando las tablas de la distribución normal, para una proporción igual a 0.80 corresponde una puntuación normal de desviación $z_{ij}=0.84$. La distancia en la escala entre dos objetos psicológicos puede definirse en términos de esta puntuación normal de desviación, esto es,

$$z_{ij} = \bar{s}_j - \bar{s}_i$$

Gráficamente, podemos decir que en algún lugar del continuo de 'actitud hacia la asistencia a la escuela', j e i están separados por una distancia de 0.84 del modo siguiente:



Continuo: actitud hacia la asistencia a la escuela

Nótese que a pesar de que la media de la distribución de las respuestas alrededor de los estímulos nunca será conocida, la diferencia entre dos medias cualesquiera puede ser obtenida si se acepta el supuesto de normalidad mencionado anteriormente. El uso que hace Thurstone de la puntuación normal de desviación como una medida de la distancia entre las medias se justifica de la siguiente forma:

El test de la diferencia entre medias de dos distribuciones normales es:

$$Z_{12} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 - 2 r_{12} S_1 S_2}}$$

Thurstone resuelve esta ecuación obteniendo un valor para la diferencia entre las medias de la siguiente forma:

$$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 = Z_{12} \sqrt{S_1^2 + S_2^2 - 2 r_{12} S_1 S_2}$$

Sean $\bar{X}_1$ y $\bar{X}_2$ los valores en la escala de los dos estímulos (la media y la moda son iguales en una distribución normal), y asumiendo que los estímulos no correlacionan (esto es, $r=0$), la fórmula se reduce a:

$$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 = Z_{12} \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$$

Asumiendo que las varianzas de respuesta son iguales para los dos estímulos, el valor bajo la raíz se convierte en una constante, y en este caso la fórmula se reduce a:

$$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 = z_{12} \cdot \text{constante}$$

Aunque la constante puede tomar cualquier valor, generalmente se escoge el valor de 1.

Thurstone desarrolló tres métodos de escalamiento basados en la Ley del Juicio Comparativo: el método de las comparaciones apareadas, el método de los intervalos sucesivos, y el método de los intervalos aparentemente iguales. El ejemplo anterior corresponde a una breve ejemplificación del método de las comparaciones apareadas, del que pasamos a ocuparnos a continuación con mayor profundidad.

El método de las comparaciones apareadas (caso V).

Este procedimiento de Thurstone para encontrar las distancias entre estímulos en una escala parte de las elecciones derivadas de una lista de comparaciones apareadas de objetos. Las elecciones pueden ser acumuladas en una tabla de doble entrada, escribiendo un 1 en cada intersección de una fila y una columna donde el objeto de la columna es preferido sobre el objeto de la fila. Supongamos que con cuatro objetos A, B, C, y D, formamos todas las parejas posibles, y un sujeto responde de la siguiente manera:

elecciones	pares	matriz				
3	<u>A</u> B		A	B	C	D
	<u>A</u> C	A	-	0	0	0
	<u>A</u> D	B	1	-	0	0
2	<u>B</u> C	C	1	1	-	0
	<u>B</u> D	D	1	1	1	-
1	<u>C</u> D		3	2	1	0

En cada par el objeto subrayado fue el preferido.

Una matriz puede acumular un gran número de respuestas de diferentes sujetos. En el siguiente ejemplo ficticio, la primera tabla (tabla 1) contiene la frecuencia de elecciones de los objetos *cafetería*, *gimnasio*, *teatro*, *biblioteca*, *aula*, realizadas por 100 sujetos. A éstos se les pidió que juzgaran la importancia de cada uno en relación a su educación universitaria. Los objetos fueron emparejados en las 10 formas posibles, y las elecciones acumuladas en una matriz de frecuencias.

Inicialmente, se calculan los sumatorios de los valores de cada columna (tabla 1), y si los resultados no aparecen en orden (como es el caso) las filas y las columnas son dispuestas de manera que las sumas de las columnas queden ordenadas de la menor a la mayor. La matriz reordenada aparece en la tabla 2. Bajo el modelo de Thurstone, las frecuencias son transformadas en proporciones tal como se muestra en la figura 3.

Tabla 1. Matriz de Frecuencias Acumuladas. n=100.

	<i>i</i>				
	aula	cafet	gim	biblio	teatro
aula	-	20	30	35	10
cafet	80	-	30	40	20
gim	70	70	-	45	15
biblio	65	60	55	-	25
teatro	90	80	85	75	-
Σ	305	230	200	195	70

Cada entrada de la matriz indica el número de veces que el objeto de la columna es preferido sobre el objeto de la fila.

Tabla 2. Matriz de frecuencias ordenadas

	<i>i</i>				
	teatro	biblio	gim	cafet	aula
teatro	-	75	85	80	90
biblio	25	-	55	60	65
gim	15	45	-	70	70
cafet	20	40	30	-	80
aula	10	35	30	20	-
Σ	70	195	200	230	305

Tabla 3. Matriz de proporciones.

	<i>i</i>				
	teatro	biblio	gim	cafet	aula
teatro	.50	.75	.85	.80	.90
biblio	.25	.50	.55	.60	.65
gim	.15	.45	.50	.70	.70
cafet	.20	.40	.30	.50	.80
aula	.10	.35	.30	.20	.50

En la diagonal de la matriz de proporciones se indica una proporción de .50 bajo el supuesto de que cualquier objeto juzgado contra sí mismo recibiría un número azaroso de elecciones. La expectativa es que el 50% de las veces el sujeto elegiría el objeto de la columna, y el otro 50% el objeto de la fila.

En el siguiente paso, las proporciones son transformadas a puntuaciones típicas utilizando la tabla de la distribución normal (ver tabla 4).

Tabla 4. Matriz de puntuaciones típicas (z).

	1 teatro	2 biblio	3 gim	4 cafet	5 aula
teatro	.00	.67	1.03	.84	1.28
biblio	-.67	.00	.13	.25	.38
gim	-1.03	-.13	.00	.52	.52
cafet	-.84	-.25	-.52	.00	1.17
aula	-1.28	-.38	-.52	-1.17	.00

Finalmente, se calculan las diferencias entre las columnas correspondientes a cada estímulo, tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Matriz de diferencias.

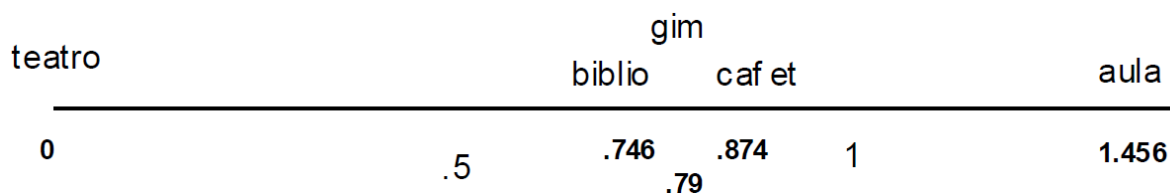
	2-1 biblio-teatro	3-2 gim-biblio	4-3 cafet-gim	5-4 aula-cafet
	.67	.37	-.19	.44
	.67	.13	.12	.13
	.90	.13	.52	.00
	.59	-.27	.52	1.17
	.90	-.14	-.55	1.17
Σ	3.73	.22	.42	2.91
n	5	5	5	5
media	.746	.044	.084	.582

Si no falta ningún dato, las diferencias entre las sumas de dos de las columnas de puntuaciones típicas de la Tabla 4 son iguales a las suma de las diferencias de la columna correspondiente de la Tabla 5.

Sabiendo las diferencias entre los objetos podemos asignar valores de la escala a cada uno acumulando las distancias o diferencias que hay entre ellos, tomando como punto de partida el estímulo que obtiene menor número de elecciones sobre los demás (en este caso, teatro). Así obtendríamos los siguientes valores en la escala de ‘importancia para la educación’:

		valores
teatro		= 0.00
biblioteca:	0.00+0.746	= 0.746
gimnasio:	0.00+0.746+0.044	= 0.79
cafetería:	0.00+0.746+0.044+0.084	= 0.874
aula:	0.00+0.746+0.044+0.084+0.582	= 1.456

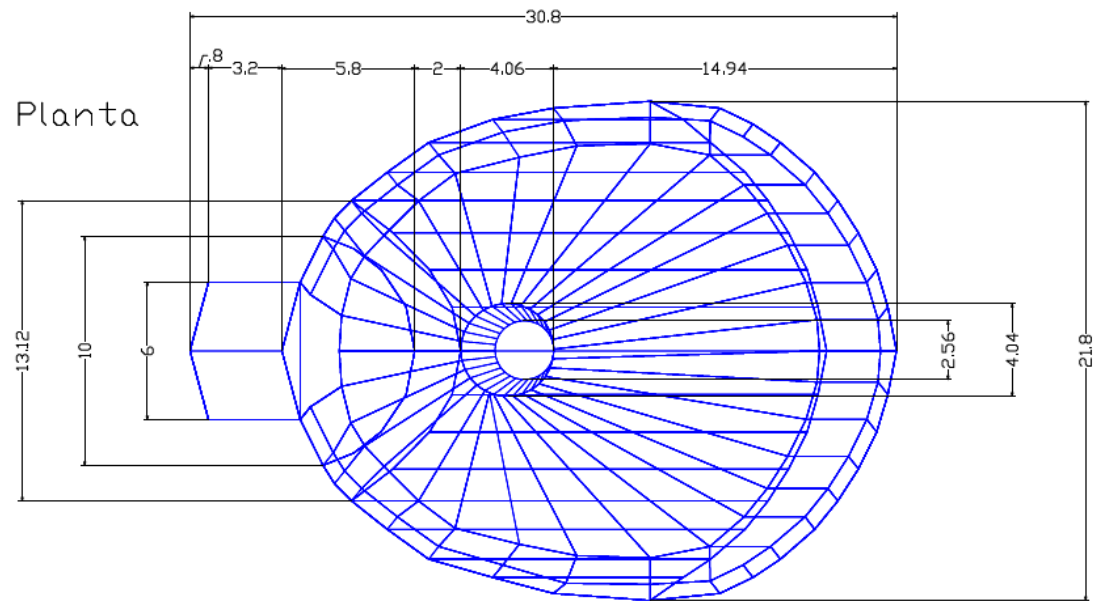
Una representación gráfica de los valores de cada objeto a lo largo del continuo puede realizarse de la siguiente manera:



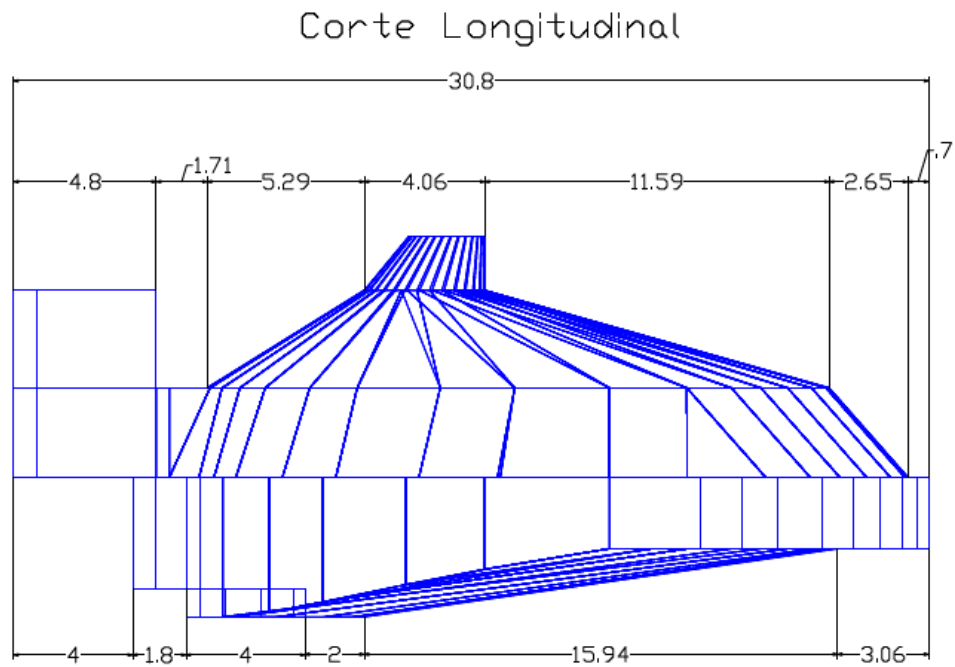
Si en los datos aparecen proporciones superiores a 0.98, éstas deben reducirse al valor señalado. Igualmente con las proporciones menores que 0.02, deben igualarse a 0.02. La razón de esta restricción es que las puntuaciones típicas para proporciones extremas generalmente resultan en distorsiones extremas de los valores de la escala. Si hay datos faltantes las correspondientes celdillas de las matrices se dejan en blanco, y no se calculan diferencias para tales celdillas. En ese caso, las medias de las diferencias de cada columna se hallan dividiendo por el número de celdillas completas en la columna. El método del caso V requiere el supuesto de igual dispersión de las respuestas a distintos objetos, y no correlación entre los juicios de diferentes objetos. Si estos supuestos no pueden ser satisfechos algún otro método o caso puede ser usado. El caso V es el más sencillo de los que Thurstone exploró.

ANEXO B. Planos arquitectónicos Sala de Conciertos Biblioteca Luis Ángel Arango

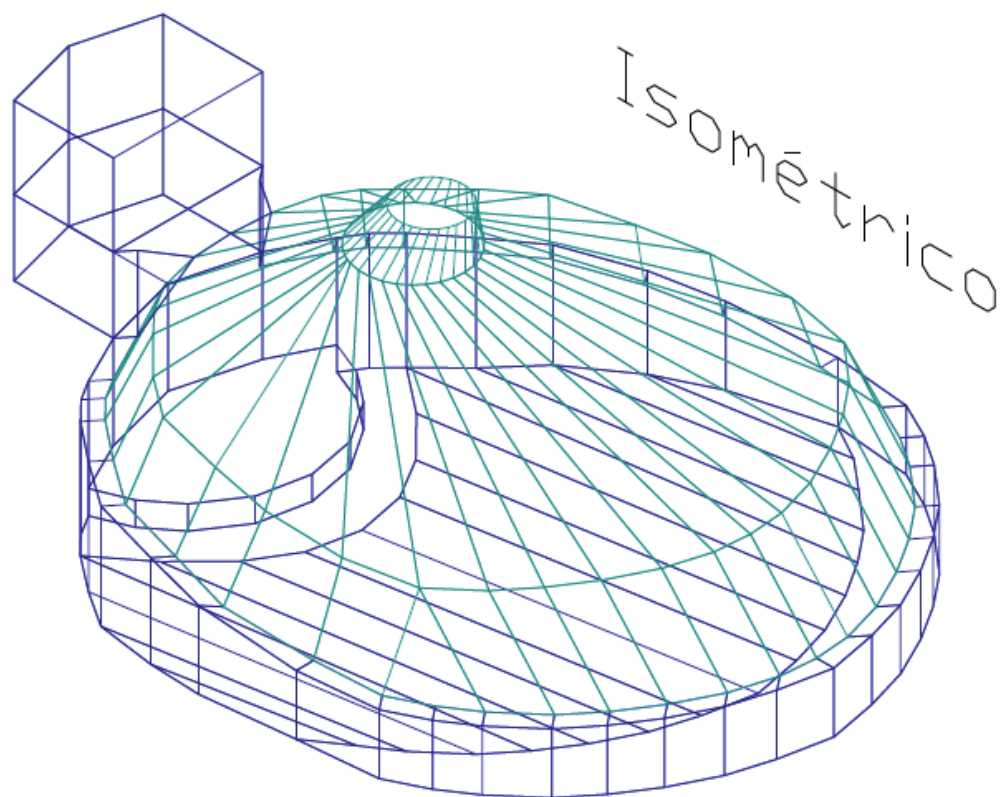
B.1 Plano de Planta



B.2 Plano de Corte



B.3 Plano de Vista 3D Isométrica



ANEXO C. Test de Preferencia Subjetiva

IMPLEMENTACIÓN DE TEORÍA DE PREFERENCIA SUBJETIVA EN SALAS DE CONCIERTO

TEST DE PREFERENCIA

Edad:

Sexo: Hombre ____ Mujer ____

Experiencia musical: Sí ____ No ____

Consentimiento informado:

La presente investigación tiene por objetivo evaluar la acústica de una sala de conciertos de acuerdo a un test psicométrico de comparación por pares, donde dicha comparación será realizada entre campos sonoros simulados por software correspondientes a diversas ubicaciones dentro de la sala. Los datos obtenidos en esta prueba son confidenciales y anónimos, y sólo se utilizarán con fines investigativos. Ninguna de sus respuestas le traerá consecuencias negativas personales, académicas o laborales.

De acuerdo con estos términos, acepto evaluar mi preferencia respecto a distintos campos sonoros en la prueba de escucha incluida en este estudio.

Firma:

Fecha:

A continuación, le serán reproducidos una serie de pares de muestras de audio, las cuales corresponden a simulaciones de campos sonoros, dadas en distintas ubicaciones en las áreas de audiencia de la Sala de Conciertos de la Biblioteca Luis Ángel Arango de Bogotá, Colombia. Para cada par de muestras, por favor seleccione la muestra de su preferencia.

- **Par 1**

A ☐ B ☐

- **Par 2**

A ☐ B ☐

- **Par 3**

A ☐ B ☐

- **Par 4**

A ☐ B ☐

- **Par 5**

A ☐ B ☐

- **Par 6**

A ☐ B ☐

- **Par 7**

A ☐ B ☐

- **Par 8**

A ☐ B ☐

- Par 9

A ☐ B ☐

- Par 10

A ☐ B ☐

- Par 11

A ☐ B ☐

- Par 12

A ☐ B ☐

- Par 13

A ☐ B ☐

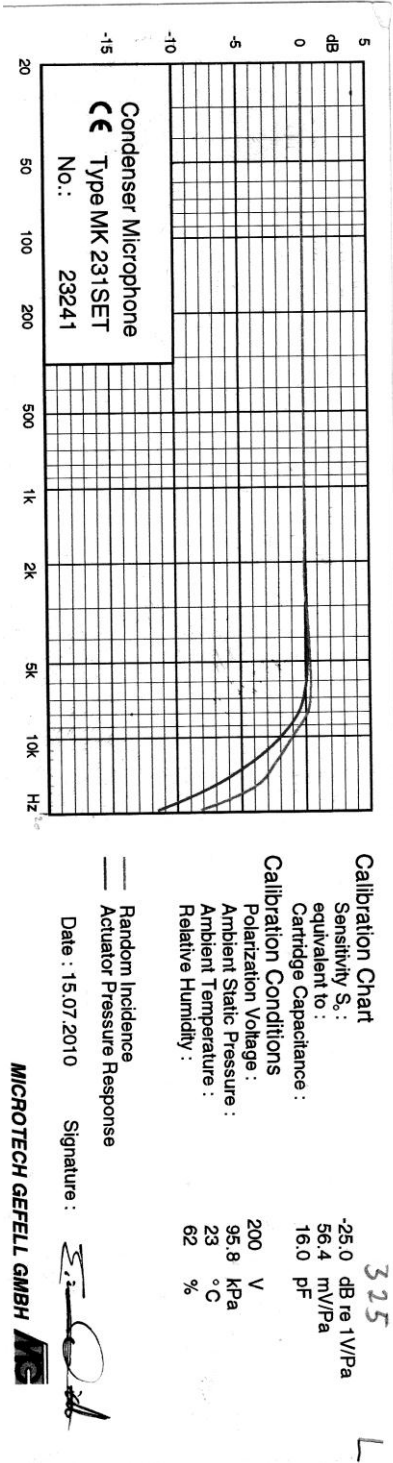
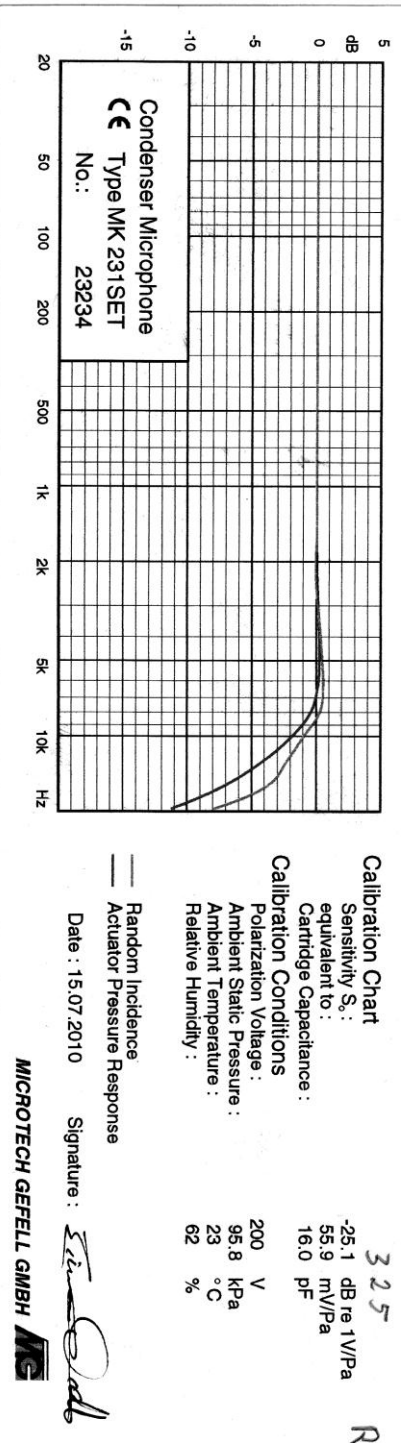
- Par 14

A ☐ B ☐

- Par 15

A ☐ B ☐

ANEXO D. Ficha técnica de transductores de *dummy-head* 01dB-Metravib



ANEXO E. Ficha técnica de tarjeta 01dB-Metravib dB4



01dB/dB4 – 4ch data acquisition platform

Analog Input Subsystem Specifications

Features	Specifications
Number of analog input channels	4, single-ended, simultaneous
Resolution	24 bits
Ranges and gains	± 10 V (gain of 1), ± 1 V (gain of 10)
Gain error - Gain of 1: - Gain of 10:	$\pm 0.02\%$ $\pm 0.5\%$
A/D type	Delta-Sigma
Maximum sample rate	52.734 kHz
Minimum sample rate	195.3 Hz
Group delay	38/Sample Frequency
Pass band - at -3 dB: - at -100 dB:	0.49 x Sample Frequency 0.634 x Sample Frequency
Pass band ripple	± 0.005 dB
Signal/noise (typical)	106 dB
Total harmonic distortion (-0.5 dB) using 1 kHz sine wave, sampled at 50 kHz	-90 dB typical
Spurious free dynamic range (SFDR) using a 1 kHz sine wave, sampled at 50 kHz 10 V full-scale signal (-0.5 dB): 1 V signal (-20 dB): 100 mV signal (-40 dB): 0 V signal:	-90 dB typical -105 dB typical -115 dB typical -115 dB typical
Crosstalk Channel 0: Channel 1:	20V PP @ 10KHz >-110dB with 50Ω termination -50dB open (Internal 1 MΩ) -105dB with 1kΩ termination
Data encoding	Offset binary
Maximum input voltage (without damage) Power on: Power off:	± 30 V ± 20 V
Input impedance	1 M Ω , 20 pF _c
Overvoltage protection (power on/off)	± 40 V
ESD protection - Arc: - Contact:	8 kV 4 kV
Current source	4 mA
Compliance voltage	18 V _d
Current noise @ 1 kHz bandwidth	5 nA rms
Current source accuracy	$\pm 1.0\%$
DC offset	1.5 mV
AC coupling at -3 dB	0.5 Hz

ANEXO F. Ficha técnica de micrófono de medición Gold-Line Tef04

