

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**  
**FACULTAD DE BELLAS ARTES**  
**DOCTORADO EN ARTES**  
**TESIS DOCTORAL**

---

**INCREMENTO DE LA CALIDAD SONORA EN SALAS PARA MÚSICA A  
PARTIR DE LA CONFIGURACIÓN DEL CAMPO ACÚSTICO TEMPRANO**

---

---

**ASPIRANTE: ING. GUSTAVO JORGE BASSO**  
**DIRECTOR: DR. DANIEL BELINCHE**  
**LUGAR DE TRABAJO: INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN PRODUCCIÓN Y  
ENSEÑANZA DEL ARTE ARGENTINO Y LATINOAMERICANO – IPEAL**

**LA PLATA, MAYO DE 2017**

---

## AGRADECIMIENTOS

Esta es una tesis tardía que narra un proceso maduro y transitado, que comenzó aún antes de la obtención de mi título de grado, y no el típico mojón de una carrera en desarrollo.<sup>1</sup> Por lo tanto, la cantidad de personas que me aconsejaron, acompañaron y ayudaron durante estos años y a los que les estoy agradecido es muy grande. La que sigue es una lista mínima e inevitablemente incompleta.

En primer lugar va mi agradecimiento a la educación pública. Estoy convencido de que es una de las maravillas de nuestro país y mi caso es sólo uno más entre los miles que se han nutrido y formado íntegramente en su seno. La recorrí desde la escuela primaria hasta mis dos facultades, la de partida -Ingeniería- y la de llegada -Bellas Artes-.

Coloco en un lugar especial al director de la tesis, Daniel Belinche, quien me sugirió generosamente la posibilidad de iniciar el recorrido que lleva a esta presentación, y que me acompañó durante todos estos años desde la dirección del IPEAL.

Va también mi agradecimiento a las autoridades, docentes y no docentes de la Facultad de Bellas Artes. Entre ellos debo destacar a los integrantes de la cátedra de Acústica Musical, cómplices y casi co-autores de este trabajo. Y a los docentes/directores que me sostuvieron al comienzo del camino, como Mario Arrese y Sergio Balderrabano, cuando no podía más que prometer un conjunto de conjeturas de resultados inciertos.

En un plano más íntimo, les debo interminables charlas sobre estos temas a Mario Mary, Rafael Sánchez Quintana, Álvaro Arrese, Alfredo Calvelo, María Andrea Farina, Federico Jaureguiberry, y a tantos otros. De ellas surgió la convicción, técnicamente insostenible, de que la acústica es en realidad una rama de la música.

Va un reconocimiento especial a Teresa Basile, a María Andrea Farina y a Belén Barbero por la lectura atenta de los borradores. Y por sus sugerencias siempre acertadas.

Mi familia, Florencia, Germán y Teresa, no sólo fue esencial desde los afectos. Tere fue quien me sugirió (¿ordenó?) que comenzara a trabajar en este escrito. Sin su estímulo no sólo no lo hubiera terminado, sino que ni siquiera lo habría empezado.

---

<sup>1</sup> Tan tardía que casi se convierte en póstuma.

---

Como comenté al principio de los agradecimientos, ésta es una tesis a hechos consumados. Los teatros ya están contruidos y en funcionamiento, y no se los puede rehacer para corregir un eventual error teórico o un corolario mal fundamentado. Como diría Charly, *lo que ves es lo que hay*.

La Plata, mayo de 2017

---

## CONTENIDOS

### PRÓLOGO

### PARTE I MARCO GENERAL

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1. FUNDAMENTOS .....	10
2. MARCO GENERAL .....	11
Cambio en los modos de audición	
Acústica de salas para música	
Dispositivos de acústica variable	
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	14
Objetivo General	
Objetivos específicos	
Hipótesis	
4. METODOLOGÍA .....	15
5. ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	17
<b>CAPÍTULO 2. ACÚSTICA DE SALAS PARA MÚSICA - ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>19</b>
1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA .....	21
2. SABINE Y LA TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN .....	24
3. CRISIS DEL MODELO DE SABINE .....	27
4. CRITERIOS ESPACIALES .....	32
5. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS ESPACIALES .....	35
6. LA ACÚSTICA DE SALAS A PARTIR DE LA DÉCADA DE 1980 .....	46
7. EL SIGLO XXI .....	52
8. PROPUESTA TEÓRICA DESARROLLADA EN ESTA TESIS .....	52
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>56</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	56
2. EL EFECTO DE PRECEDENCIA O EFECTO HAAS .....	57
Perspectiva auditiva	
3. CALIDAD ACÚSTICA .....	63
4. CARACTERIZACIÓN DE LA SONORIDAD .....	66
5. TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN Y PARÁMETROS TEMPORALES .....	68
Teoría de la reverberación de Sabine	
Dependencia espectral	
Corrección debida a la absorción del aire	
Críticas a la teoría de Sabine	
Salas a varias pendientes	

	Otras teorías de la reverberación	
6.	PARÁMETROS ESPACIALES .....	82
	Fracción lateral de energía (LE)	
	Coefficiente de correlación cruzada interaural (IACC)	
7.	RAZONES DE ENERGÍA .....	86
	Claridad a 80 ms ( $C_{80}$ )	
	Claridad a 50 ms ( $C_{50}$ )	
	Definición (D)	
	Centro de tiempo	
	Función de crecimiento de la energía	
8.	PARÁMETROS ESPECTRALES .....	88
	Razón para bajas frecuencias (BR)	
	Razón para altas frecuencias	
9.	NIVEL SONORO NORMALIZADO (G) .....	89
10.	PARÁMETROS FÍSICOS DE ESCENARIO .....	90
11.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS FUENTES .....	91
	Función de autocorrelación	
	Directividad de la fuente acústica	
12.	RASGOS PERCEPTUALES .....	92
	Claridad perceptual	
	Plenitud de sonido y Vivacidad	
	Definición	
	Ancho perceptual de la fuente (ASW)	
	Sensación de inmersión del oyente (LEV)	

## **PARTE II ESTUDIOS DE CASO**

### **CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE CASO 1. TEATRO ARGENTINO DE LA PLATA -**

<b>PARTE 1. DIAGNÓSTICO .....</b>	<b>102</b>
1. METODOLOGÍA .....	102
2. HISTORIA DEL DISEÑO ACÚSTICO ORIGINAL DE LA SALA GINASTERA DEL TA .....	103
3. DIAGNÓSTICO .....	109
	Diagnóstico auditivo
	Diagnóstico físico/acústico
4. DESARROLLO DE UN MODELO DIGITAL DE SIMULACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA GINASTERA .....	115
	Características generales del modelo geométrico vectorial
	Ajuste del modelo digital
	Resultados generales de las simulaciones
5. ESTUDIO ACÚSTICO EN BASE AL MODELO DIGITAL .....	121
	Comportamiento acústico general
	Análisis de las primeras reflexiones en tres puntos de la sala
6. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACÚSTICO: RESULTADOS .....	141
	Parámetros estadísticos globales
	Parámetros temporales y espaciales

Respuesta en frecuencia de la platea	
7.    DIAGNÓSTICO. CONCLUSIONES .....	145
<b>CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE CASO 1. TEATRO ARGENTINO DE LA PLATA</b>	
<b>PARTE 2. INTERVENCIÓN .....</b>	<b>147</b>
1.    PROPUESTAS DE INTERVENCIÓN .....	147
Análisis de las posibles vías de intervención	
Efectos de la instalación de un reflector acústico sobre el foso	
2.    DISEÑO DEL GRAN REFLECTOR ACÚSTICO SOBRE EL FOSO DE ORQUESTA .....	154
Marco teórico	
Diseño del reflector de paneles rectangulares con curvatura cilíndrica	
Comportamiento acústico del reflector – Evaluación en el modelo digital	
3.    CONSTRUCCIÓN DEL GRAN REFLECTOR SOBRE EL FOSO .....	172
4.    COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DEL GRAN REFLECTOR – MEDICIONES Y EVALUACIÓN AUDITIVA .....	175
Mediciones en la sala	
Evaluación auditiva	
5.    CONCLUSIONES .....	178
<b>CAPÍTULO 6. ESTUDIO DE CASO 2. SALA SINFÓNICA DE LA USINA DEL ARTE .....</b>	<b>181</b>
1.    METODOLOGÍA .....	181
2.    HISTORIA - PROCESO DE DISEÑO .....	182
3.    DISEÑO ACÚSTICO DE LA SALA SINFÓNICA .....	189
Configuración del campo temprano dentro del límite de Haas	
Estrategia para resolver la complejidad del sistema	
Cálculo del Índice de Calidad Acústica AQI en el modelo intermedio	
Modelo acústico definitivo de la sala de conciertos	
Evaluación de los resultados de las simulaciones en el modelo final	
Cálculo del Índice de Calidad Acústica AQI (Beranek) en el modelo final	
4.    CONTROL ACÚSTICO DURANTE LA OBRA .....	210
5.    CONCIERTOS Y RECITALES .....	212
6.    CONCLUSIONES .....	217
<b>A MODO DE CONCLUSIÓN .....</b>	<b>219</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA .....</b>	<b>221</b>

---

## PRÓLOGO

Esta tesis presenta una metodología de diseño acústico aplicable a cualquier espacio destinado a representaciones musicales sin distinción de género ni estilo. Aunque se escogieron para ilustrarla dos ejemplos locales destinados a la música académica y experimental, es fácilmente extrapolable a una gran variedad de contextos musicales diferentes a los aquí tratados.

La metodología desarrollada, multidisciplinaria, permite dar respuesta a los cambios culturales en los modos de audición, originados por el uso generalizado de sistemas de reproducción electroacústicos durante los últimos treinta años. Se nutre de los recursos metodológicos y disciplinares vinculados al análisis crítico del arte contemporáneo y de la cultura en el contexto nacional y latinoamericano, además de los propios de las disciplinas de base -física y música-.

Su aplicación permite concebir nuevos espacios de producción musical basados en la realidad sociocultural de origen. El diseño y la construcción de numerosas Estaciones Culturales de Reproducción y de Centros Culturales Barriales dan cuenta de la plasticidad y potencialidad transformadora del método cuando se lo cruza con diferentes contextos sociales y artísticos/musicales.

Los criterios de diseño de espacios destinados a la interpretación musical son revisados por cada generación a causa de los inevitables cambios en los valores estéticos y en los modos de audición, de interpretación y de circulación de la música. En la actualidad coexisten diferentes teorías que abordan el tema a partir del tratamiento estadístico de la totalidad temporal de sus campos acústicos, con resultados no siempre efectivos. En este trabajo presentamos una metodología alternativa que, enfocada principalmente en el tratamiento de la primera parte del campo acústico temporal de un espacio, aspira solucionar algunas de las cuestiones no resueltas con los métodos tradicionales. Para alcanzar este propósito se combinaron numerosas teorías y métodos preexistentes: el punto de partida fue la utilización musical del efecto de precedencia, cuya aplicación permitió establecer las condiciones de contorno del conjunto de reflexiones acústicas tempranas a partir de su ubicación dentro del "límite de Haas". A su vez, la gran cantidad de datos originados en las simulaciones digitales fueron analizados con métodos estadísticos basados en la lógica difusa.

---

El método propuesto configura, en síntesis, un sistema de evaluación y predicción acústica de espacios destinados a la música y otras artes performáticas, de aplicación directa al ámbito local y latinoamericano.



---

**PARTE I**  
**MARCO GENERAL**

---

---

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo exponer el desarrollo de una metodología original de intervención y diseño acústico de salas para música, que contempla los cambios culturales en los modos de audición ocurridos durante las últimas décadas. De lograrse este propósito, se dispondrá de un sistema completo de evaluación y predicción acústica de aplicación directa a nuevos espacios destinados a la música y otras artes performáticas, de marcada relevancia cultural, social y económica en el ámbito local y latinoamericano.

En síntesis, en esta tesis se propone describir una nueva metodología de análisis y diseño acústico de espacios para música, detallar sus fundamentos teóricos y analizar varios estudios de caso en los que fue aplicada.

### 1. FUNDAMENTOS

En las últimas décadas se han verificado cambios profundos en los modos de oír de la población, generados en gran medida por el empleo generalizado de sistemas de amplificación y equipos de audio portátiles, usados muchas veces en ambientes con gran contaminación sonora. Entre los efectos de este cambio de hábitos se destaca la naturalización de las señales con gran compresión dinámica que dominan en la actualidad la creación, la producción y la circulación de música tanto en los medios masivos de comunicación como en las redes sociales.

Por otra parte, en nuestro país y en el resto de América Latina es habitual la realización de espectáculos musicales que no emplean sistemas de refuerzo electroacústico, escenario que se observa en diferentes géneros y estilos que van desde la música académica a la de raíz folklórica, pasando por la música popular urbana y el tango. Los modelos y métodos estándar de diseño acústico de los espacios en los que se representan dichos espectáculos siguen teorías y procedimientos que fueron establecidos a mediados del siglo XX, época en los que los hábitos de audición aún conservaban muchas de las características heredadas del siglo XIX. Aunque resulten de utilidad al ser aplicadas a casos estándar, estas teorías acústicas se han mostrado estériles a la hora de describir y configurar de manera independiente el campo acústico temprano en una sala, que cubre los primeros 200 ms de la onda que llega a los oyentes después del sonido directo. Sin embargo, la posibilidad de operar sobre el campo acústico temprano permitiría adaptar estos espacios para compensar, en gran medida, la compresión dinámica naturalizada propia de nuestros tiempos. Esta operación

habilitaría la posibilidad, además, de configurar y “afinar” cada espacio en función del material musical a representarse sin necesidad de manipular el campo acústico global, tarea costosa y muchas veces impracticable por motivos arquitectónicos.

Se propone, en consecuencia, una nueva metodología de predicción y diseño acústico que permita configurar con precisión el campo acústico temprano de un espacio destinado a la representación de música en general y de música no amplificada en particular. Las implicancias musicales de este proyecto son significativas: permitirá adecuar los espacios destinados a la música a los modos de audición contemporáneos y, en consecuencia, volverlos atractivos para las generaciones formadas auditivamente a partir del uso casi exclusivo de sistemas electrónicos de reproducción.

No es menor el impacto económico y social que se puede obtener al aplicar el modelo, pues en la mayoría de los casos resulta menos costoso operar sobre las estructuras que determinan el campo acústico temprano que hacerlo sobre la totalidad del espacio arquitectónico. Se lo podrá aplicar, dada dicha factibilidad económica, para mejorar sustancialmente la calidad acústica de teatros, auditorios y centros culturales de bajo presupuesto.

## 2. MARCO GENERAL

### CAMBIO EN LOS MODOS DE AUDICIÓN

Nuestro oído ha naturalizado, como ocurre en estos casos a raíz de la necesidad biológica de adaptarse al medio, el ambiente sonoro en el que le toca vivir. En primer lugar, el aumento de nivel sonoro en nuestro entorno (Basso, 2014a) conduce en el campo musical a lo que se ha llamado la “Guerra de la Sonoridad” (Viney, 2008). Para oír música o conversar en un ambiente ruidoso tenemos que aumentar el nivel de la señal: elevamos la voz y aumentamos la potencia de salida de los equipos de sonido. De otro modo no comprenderíamos lo que nos dicen o no podríamos seguir los detalles e inflexiones de la música. La respuesta técnica que se ha encontrado es la de comprimir drásticamente el rango dinámico de las señales de audio en casi la totalidad de los medios de circulación masiva. Para que se puedan oír en lugares muy ruidosos, como el interior de un automóvil o la calle, los registros comerciales de música elevan el nivel sonoro de los pasajes débiles -los *pp*- al mismo tiempo que, para que no saturen el sistema y/o no resulten peligrosos para la salud auditiva de los oyentes, limitan el nivel sonoro en los pasajes fuertes -los *ff*- a un valor máximo de intensidad. En consecuencia, casi toda la música que circula está masterizada con un rango dinámico de unos pocos decibeles. Como ejemplo, durante un concierto sinfónico la diferencia entre *pp* y *ff* es de

alrededor de 70 dB, mientras que en un registro digital comercial de la misma pieza el rango dinámico habitualmente no supera los 20 dB. Casi toda la música comercial se masteriza en la actualidad con un rango dinámico menor a 10 dB y en casos extremos, como en los registros del llamado Pop Internacional, no se llega a los 5 dB.

Una de las consecuencias de la naturalización de la compresión dinámica, directamente relacionada con la presente tesis, es que las salas tradicionales, diseñadas con las herramientas acústicas estándar, han dejado de ser apreciadas por el público no habituado a asistir a recitales o conciertos -los *pp* les parecen demasiado débiles en comparación con los que están acostumbrados a oír en los sistemas de audio cotidianos (Basso, 2014b)-. Un correcto diseño del campo acústico temprano en las nuevas salas permitiría aumentar la sonoridad relativa de las señales en los pasajes más débiles, adaptándolos a este nuevo modo de percibir la música.

Parte sustancial de este proyecto consiste en crear espacios acústicos en los que se dispongan gran cantidad de reflexiones tempranas dentro del llamado “límite de Haas” (Haas, 1951; Basso, 2005), que separa perceptualmente las reflexiones acústicas beneficiosas que se integran al sonido proveniente de la fuente acústica, de las desfavorables, segregadas en forma de coloraciones o ecos. Este método permitirá adecuar el rango dinámico percibido por los oyentes en la sala a los nuevos modos de audición descritos en esta introducción.

## **ACÚSTICA DE SALAS PARA MÚSICA**

El estudio científico de la acústica arquitectónica nace a principios del siglo XX con los trabajos de Wallace Sabine en la Universidad de Harvard. Sabine introdujo un parámetro temporal, el *Tiempo de Reverberación* TR (Sabine, 1922), definido como el tiempo que tarda el sonido en extinguirse al cesar la fuente acústica, que permitió medir y cuantificar por primera vez un campo acústico real. Sabine también desarrolló un modelo estadístico que posibilitó el cálculo teórico del TR, a partir del que se pudo pronosticar el comportamiento acústico de un espacio antes de su construcción, y aplicó su método al diseño del *Symphony Hall* de Boston, considerado hoy en día como una de las mejores salas para música sinfónica del mundo. A partir de ese momento el TR se convirtió en el parámetro obligado para evaluar la calidad acústica de auditorios y teatros, y se lo utilizó -aún se lo utiliza- para diseñar una enorme cantidad de salas en los cinco continentes.

Sin embargo, a pesar de la innegable utilidad práctica del tiempo de reverberación, pronto se puso en evidencia que no bastaba por sí solo para asegurar la calidad acústica de un espacio: muchas salas con valores de TR óptimos se comportaban decididamente

mal, en especial aquellas que no imitaban las formas y tamaños tradicionales definidos en los siglos XVIII y XIX. A fines de la década de 1960 varios autores intentaron corregir el modelo de Sabine incorporando nuevos indicadores temporales complementarios. Aparecieron o se redefinieron numerosos parámetros acústicos físicos como la Reverberación Temprana (Jordan, 1970), la Definición (Thiele, 1953), el Retardo de la Primera Reflexión (Beranek, 1962), la Claridad (Reichardt, 1974) y muchos otros. Todos estos parámetros, aunque valiosos en diferentes aspectos, poseían una característica común: eran monofónicos.

En el año 1974 Manfred Schroeder publicó un trabajo que modificaría desde ese momento la concepción y el diseño de las salas de música. En un clásico artículo (Schroeder, 1974) propuso la utilización del *Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural* IACC como principal parámetro para la evaluación de la calidad acústica de una sala. La novedad del trabajo de Schroeder fue la introducción de un parámetro binaural -no monofónico- que pondera las diferencias entre las señales que se presentan a ambos oídos de un oyente y que permite evaluar la impresión espacial percibida (Barron, 1988). Desde la llegada del criterio espacial se incorporaron al diseño de salas gran cantidad de elementos difusores de sonido, que favorecen la distribución uniforme de la energía en el espacio, entre los que se destacan los estocásticos y los basados en la teoría de los residuos cuadráticos. Estos dispositivos pueden emplearse tanto para modificar el campo acústico global de una sala como su campo acústico temprano (Basso, 2003) y son, por lo tanto, de gran interés para el presente trabajo.

#### **DISPOSITIVOS DE ACÚSTICA VARIABLE**

De las investigaciones sobre calidad acústica que se han desarrollado en los últimos años, se desprende que para que un espacio sea acústicamente adecuado debe tener ciertas características que están ligadas al estilo musical involucrado. En el mejor de los casos, una sala puede responder correctamente a un solo género o estilo de música en particular. Por contraposición, en la actualidad se exige que los espacios destinados a las representaciones musicales puedan dar cabida a una gran variedad de géneros y estilos que requieren condiciones acústicas diferentes, cuando no opuestas. Estos recintos pocas veces están preparados acústicamente para abordar tal diversidad de funciones de manera eficaz, bien porque se construyeron para un destino acústico específico o porque han cambiado sus usos originales. Por ejemplo, la acústica requerida para un recital de rock con amplificación es completamente diferente a la necesaria para uno de música sinfónica sin amplificar.

Cuando la acústica no es la adecuada se resienten la inteligibilidad de la palabra y la calidad espectral, tímbrica y dinámica de la música. En casos extremos ni siquiera se logra establecer o seguir correctamente el discurso musical. Una solución a este problema sería construir espacios multifuncionales utilizando costosos dispositivos de acústica variable, aunque este recurso sólo es posible si se lo considera durante la etapa del proyecto arquitectónico, previa a la de la construcción de la obra.

Existe, sin embargo (y es parte del planteo de esta tesis), la posibilidad de actuar sólo sobre el campo acústico temprano (Basso, 1994). Las ventajas de esta estrategia de diseño son considerables: factibilidad arquitectónica y costos moderados. Se propone una nueva alternativa de diseño que, partiendo de un modelo de tratamiento del campo acústico temprano, permite aumentar la sonoridad percibida por la audiencia en los pasajes débiles de un programa musical. A su vez, al extender la inmersión del público en el campo sonoro general, proporciona valores de calidad acústica superiores a la media que se puede obtener empleando los métodos de diseño tradicionales.

### **3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

#### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un modelo de diseño de salas que, operando sobre el campo acústico temprano, permita construir espacios de calidad para representaciones de música y de otras artes performáticas, en especial aquellas que no emplean sistemas de refuerzo electroacústico.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar una metodología de diseño acústico que permita alcanzar una sonoridad mínima por sobre el ruido de fondo, audible aún con las fuentes instrumentales no amplificadas más débiles.
- Diseñar un sistema de cálculo de la distribución espacial de la energía acústica adecuado para obtener valores monofónicos y binaurales en cada una de las ubicaciones de una sala.
- Implementar un modelo que permita adaptar cada espacio a las características de la música a la que estará destinado, considerando las propiedades temporales (tempo, textura rítmica), espectrales (armonía, textura armónica) y las características del orgánico instrumental.

- Habilitar la posibilidad de predecir el comportamiento del espacio ante el empleo de fuentes mixtas -fuentes acústicas no amplificadas combinadas con fuentes electroacústicas-. Desarrollar un sistema de simulación digital que permita calcular el balance espectral, espacial y dinámico entre ambas clases de fuentes.
- Validar experimentalmente *in extenso* cada uno de los desarrollos citados.
- Aplicar el modelo al desarrollo de nuevas salas en nuestro país y en otros países.

## HIPÓTESIS

La hipótesis central de la presente tesis es:

*Existe la posibilidad de diseñar el campo acústico temprano de un espacio destinado a representaciones de música no amplificada con el fin de adecuarlo a las características de audición actuales, en las que las señales con gran compresión dinámica se han naturalizado.*

Esta hipótesis, a su vez, comprende las siguientes hipótesis auxiliares:

- Un aumento en la cantidad de reflexiones laterales tempranas, con sus retardos e intensidades ubicados dentro del “límite de Haas”, se correlaciona con un incremento en la sonoridad percibida por los oyentes.
- El parámetro Retardo de la Primera Reflexión ITDG, además de asociarse con la percepción de la Intimidad del campo acústico percibido, es relevante para el establecimiento de la Textura Sonora del campo acústico temprano.
- Las direcciones de arribo de las reflexiones laterales tempranas ubicadas dentro del “límite de Haas” dan cuenta de una parte sustancial de los valores de Impresión Espacial percibida por los oyentes.
- En un campo acústico no exponencial (no sabiniano) los parámetros Tiempo de Reverberación TR y Claridad C80 no se correlacionan linealmente.

## 4. METODOLOGÍA

Se utilizó el método hipotético-deductivo y se lo aplicó a los casos bajo estudio. A partir del modelo físico matemático obtenido se diseñaron pruebas experimentales cuyos resultados fueron contrastados con las predicciones obtenidas en los modelos digitales elaborados *ad-hoc*. El proceso fue iterativo y se lo repitió hasta alcanzar un grado de exactitud compatible con las exigencias de cada una de las fases o casos de la investigación.

Dada la imposibilidad de contar con la cantidad suficiente de salas para armar una base empírica estadísticamente significativa, se empleó el método de “estudio de caso” (Yin, 1994; Stake, 1995) que permitió extraer conclusiones del examen en profundidad de cada situación particular. Las salas que fueron escogidas para analizar fueron:

1. Teatro Argentino de La Plata.
2. Sala Sinfónica de la Usina del Arte (Ciudad Autónoma de Buenos Aires).
3. Teatro Colón (Ciudad Autónoma de Buenos Aires).
4. Sala de Cámara de la Usina del Arte (Ciudad Autónoma de Buenos Aires).
5. Auditorio “Ballena Azul” del Centro Cultural Kirchner (Ciudad Autónoma de Buenos Aires).
6. Auditorio de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Nacional de La Plata.
7. Algunos espacios y salas de la Argentina y América Latina (Chile, Colombia, Paraguay, Brasil y Uruguay).
8. Varios pequeños teatros, auditorios y centros culturales.

En resumen:

- Se desarrolló un modelo físico/matemático que permitió dar cuenta de las hipótesis expuestas en el punto 3 de esta introducción.
- Se elaboraron modelos acústicos digitales de cada espacio relevante en base al modelo físico/matemático anterior.
- Se midieron los espacios acústicos (casos bajo estudio) en base a los parámetros definidos por la norma ISO 3382.
- Se compararon los resultados obtenidos en los modelos digitales con los obtenidos en las mediciones de campo.
- Se ajustaron los modelos de predicción hasta alcanzar cotas de error del orden de los límenes perceptuales (mínimas diferencias perceptibles) de cada parámetro acústico.
- Se estimó la eficacia de cada intervención en base al Índice de Calidad Acústica AQL (Beranek, 1996) y, en los casos en los que fue posible, a la evaluación auditiva de interpretaciones musicales de diferentes géneros y estilos.
- Se desarrolló una metodología general de intervención acústica y arquitectónica.



## 5. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La acústica es una ciencia multidisciplinaria, que abarca desde el comportamiento de las señales físicas hasta la percepción del sonido. Incluye, al menos, saberes propios de la física, la fisiología y la psicología. En este caso, en el que la acústica se aplica al estudio de salas para música, se deben agregar los conocimientos propios de las disciplinas artísticas y musicales. Sus métodos son múltiples y van desde los de la física/matemática para el estudio de señales y ondas hasta los métodos estadísticos aplicables al análisis de las representaciones mentales del sonido.<sup>2</sup>

Hemos decidido incorporar parte de los desarrollos matemáticos formales, inevitables para mantener el rigor necesario en algunos puntos, ilustrándolos con numerosos gráficos, figuras y fotografías. El lector sin formación en ciencias exactas puede obviar la lectura de las formalidades matemáticas sin perder, no obstante, la comprensión del tópico.

Para facilitar la fluidez en el tratamiento de cada tema específico, el análisis detallado del estado del arte se incluye como introducción a cada uno de los desarrollos particulares que se tratan en la Parte II de la Tesis. Sin embargo, para preparar la lectura del corpus central del trabajo, en el Capítulo 2 se describe sintéticamente el estado general del conocimiento relacionado con la acústica de las salas para música.

La tesis está dividida en dos partes. En la Parte I se encuentra esta introducción (Capítulo 1), en la que se describen las hipótesis, los objetivos y la metodología empleadas. En el Capítulo 2 se presenta el estado general de la cuestión y en el Capítulo 3 se describen las principales herramientas teóricas que le dan sustento a la tesis.

La Parte II forma el corpus central del trabajo. Aquí se analizan los estudios de casos que permiten describir cómo las hipótesis de trabajo son contrastadas con los resultados empíricos obtenidos en campos acústicos reales. En el Capítulo 4 se muestra la aplicación de las hipótesis y de la metodología al diagnóstico acústico de un espacio existente, la *Sala Ginastera* del Teatro Argentino de La Plata, y en el Capítulo 5 se describe la aplicación de la metodología en el rediseño acústico de dicha sala. En el Capítulo 6 se presenta la aplicación del modelo a la concepción desde cero de un nuevo espacio, la Sala Sinfónica de la *Usina del Arte* de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Para el formato de citas y referencias bibliográficas se utilizó el sistema adoptado en las *Pautas de Presentación para Autores* de la Revista METAL, editada por el Instituto de

---

<sup>2</sup> El Equipo de Investigación en Acústica del IPAL/FBA está o estuvo integrado por investigadores formados en física, arquitectura, música y psicología de la percepción.

Investigación en Producción y Enseñanza del Arte Argentino y Latinoamericano (IPEAL)  
de la FBA/UNLP.

## REFERENCIAS

- Barron, Michael y Lee, Jey (1988). "Energy relations in concert auditoriums". *Journal of the Acoustical Society of America*, 84 (2), pp. 618-628.
- Basso, Gustavo (1994). "Escenarios para salas con bajo tiempo de reverberación y escasa difusión: Mejora en el Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural". *Actas del Primer Congreso Brasil/Argentina de Acústica y 15 Encuentro de la SOBRAC*. Florianópolis: Univ. De Santa Catarina.
- Basso, Gustavo (2003). "Diseño de grandes salas para música: configuración del espacio de escenario". *Tercera Reunión Anual de la Sociedad Argentina para las Ciencias Cognitivas de la Música*. La Plata: SACCoM. [En línea]. Consultado el 30 de abril de 2017 en:  
<http://saccom.org.ar/v2016/sites/default/files/Gustavo%20Basso%20-%20DISE%20C3%91O%20DE%20GRANDES%20SALAS%20PARA%20M%C3%9A SICA.pdf>
- Basso, Gustavo (2005). "Espacios acústicos confinados en el límite de Haas". *Actas de las Cuartas Jornadas de Acústica Electroacústica y Áreas Vinculadas (CADAЕ)*. Buenos Aires: CADAЕ. [En línea]. Consultado el 29 de abril de 2017 en <<http://www.cadae.org.ar>>.
- Basso, Gustavo (2014a). "La música de la aldea global". *Ciencia, Arte y Tecnología en Acción. Enfoques desde la comunicación, la innovación tecnológica, el diseño y la educación*, pp. 149-162. Remedios de Escalada: Ed. UNLa.
- Basso, Gustavo (2014b). "La música en la época de la compresión dinámica". *Primera Semana del Sonido en Uruguay*. Montevideo: Universidad de la República.
- Beranek, Leo (1962). *Music, Acoustics, and Architecture*. New York: Wiley.
- Beranek, Leo (1996). *Concert Halls and opera houses: How they sound*. New York: Acoustical Society of America.
- Haas, Helmut (1951). "Über den einfluss eines einfahechos auf die hörsamkeit von sprache". *Acustica* 1, pp.49-58. Traducción al inglés: "The influence of a single echo on the audibility of speech". *J. Audio Eng. Soc.* 20, pp. 146-159 (1972).
- Jordan, Wilhelm (1970). "Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques". *Journal of the Acoustical Society of America* 47 (2), pp. 408-412.
- Reichardt, W., Abdel Alim, O., Schmidt, W. (1974). "Abhängigkeit der Grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit von der Art de Musikmotives, der Nachhallzeit und der Nachhalleinsatzzeit". *Applied Acoustics*, 7, pp. 243-264.
- Sabine, Wallace Clement (1922). *Collected Papers on Acoustics*. London: Cambridge/Harvard university press.
- Schoroeder, M., Gottlob, D. y Siebrasse, F. (1974). "Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters". *Journal of the Acoustical Society of America*, 56, pp. 1195-1201.
- Stake, Robert E. (1995). *Investigación con estudio de casos*. Madrid: Morata.
- Thiele, Rolf (1953). "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen". *Acustica*, 3, pp. 291-302.
- Viney, Dave (2008). *The obsession with compression*. London: Thames Valley University.

- Yin, Robert K. (1994). *Case Study Research. Design and Methods*. London: SAGE.

## CAPÍTULO 2. ACÚSTICA DE SALAS PARA MÚSICA - ESTADO DEL ARTE

### RESUMEN

En este capítulo se repasan los conceptos más representativos de la disciplina y el estado actual de su desarrollo. Aunque la acústica se aplica al diseño de espacios públicos desde la antigüedad clásica, se considera que alcanzó un real estatus científico recién a fines del siglo XIX. En la actualidad coexisten numerosas teorías y modelos que intentan explicar el complejo comportamiento acústico de estos espacios y el grado de aceptación que encuentran en sus respectivas comunidades. Para la exposición elegimos respetar la sucesión cronológica de los eventos pues creemos que dicha aproximación permite comprender con claridad la necesidad histórica de cada especulación teórica.<sup>3</sup> Al final de este capítulo se describen los métodos empleados en nuestros días para explicar e intervenir las salas para música. En el que sigue se desarrollarán en detalle las teorías y modelos que fundamentan la presente tesis.

### 1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

El estudio científico moderno sobre acústica de salas para música nació en los últimos años del siglo XIX con el trabajo del físico norteamericano Wallace Clement Sabine (1868-1919). En 1895, mientras trabajaba en la cátedra de Matemáticas y Filosofía de la Universidad de Harvard, el Consejo de la Universidad le encargó corregir la deficiente acústica del salón de lectura del museo de Arte *Fogg* de Boston. Motivado por el desafío, Sabine realizó el primer estudio sistemático de acústica de salas que se conoce y, después de dos años de estudio y experimentación, pudo mejorar considerablemente la sala del museo. Estipuló que la calidad acústica de un recinto queda definida por el tiempo que tarda el sonido en extinguirse al cesar la fuente acústica que lo emite, al que denominó *Tiempo de Reverberación* (TR). También estableció que el TR depende del tamaño del local y de la cantidad de material acústico absorbente que se encuentre en su interior. A partir de ese momento dejó de emplearse el método de imitación a ensayo y error que había regido la construcción de teatros desde los comienzos de la era moderna (Basso, 2009).

---

<sup>3</sup> El uso de la primera persona del plural no se debe, en este caso, al uso del recurso retórico del plural de modestia. Estos temas fueron estudiados por el equipo de investigación de la FBA y se aplicaron en algunas de sus publicaciones. El tópico también fue desarrollado extensamente en la tesis doctoral de la Dra. M. Andrea Farina (2015) bajo mi dirección.

En el año 1900 Sabine fue contratado como consultor acústico para la construcción de un nuevo auditorio en la ciudad de Boston y pudo aplicar su teoría desde el comienzo del proyecto. El *Symphony Hall* de Boston fue la primera sala que se edificó a partir de la aplicación de una teoría científica al diseño arquitectónico. El auditorio está considerado en la actualidad como uno de los mejores para música sinfónica. En un estudio realizado por Leo Beranek (1914-2016) y publicado en el año 2003 en base a una encuesta de opinión realizada con músicos profesionales, el Symphony Hall se ubica entre los tres mejores del mundo por su calidad acústica. Los otros dos son diseños típicos del siglo XIX, el *Musikverein* de Viena y el *Teatro Colón* de Buenos Aires (Beranek, 2003).

A partir del éxito demostrado por la teoría de Sabine, el Tiempo de Reverberación se convirtió en el parámetro obligado para evaluar la calidad acústica de auditorios y teatros y se lo utilizó para diseñar una enorme cantidad de salas en los cinco continentes. Los valores óptimos de reverberación para los distintos usos de salas se establecieron mediante rigurosos experimentos psicoacústicos (Kuhl, 1954). A los arquitectos de las primeras vanguardias del siglo XX se les ofrecía un panorama inigualable: podían independizarse de las características estilísticas del pasado sin tener que resignar la calidad acústica.

Con el paso del tiempo y el estreno de nuevas salas fue creciendo la sospecha de que este escenario no era tan perfecto como prometía. A pesar de su innegable utilidad, se puso en evidencia que el TR no bastaba por sí solo para asegurar la calidad acústica: muchas salas con valores de TR óptimos se comportaban decididamente mal, en especial aquellas que no reproducían las formas y tamaños tradicionales propios de los siglos XVIII y XIX. Con el fin de superar estos problemas, a fines de la década de 1960 varios investigadores intentaron corregir el modelo de Sabine incorporando nuevos parámetros temporales complementarios, pero no obtuvieron resultados consistentes.

La base de la teoría de Sabine, como se verá más adelante, estaba asentada en la existencia de un campo sonoro perfectamente difuso, en el que la extinción de la energía es exponencial y en el que las reflexiones se producen al azar en todas las direcciones. Condiciones que, por lo general, no cumplen las salas reales. A falta de una teoría alternativa eficaz, sin embargo, se la siguió utilizando sin restricción para diseñar salas para música, al menos hasta la determinante intervención de Leo Beranek a fines de la década de 1950.

Beranek se preguntó por qué casi todas las salas construidas en el siglo XX poseían baja calidad acústica, mientras que la mayoría de las del siglo anterior eran de excelente calidad. Para responder este interrogante decidió llevar al límite la teoría de Sabine para

determinar si el modelo estaba equivocado o si los malos resultados obedecían solamente a errores de aplicación. Realizó un profundo estudio en el que evaluó una gran cantidad de salas del mundo a partir de mediciones acústicas y de encuestas a músicos, y correlacionó estadísticamente los datos obtenidos. Con la información compilada creó un nuevo modelo matemático, que ampliaba el de Sabine sin contradecirlo, y lo aplicó al diseño del *Philharmonic Hall* del Lincoln Center de Manhattan, en Nueva York.

La sala se inauguró en septiembre de 1962 y fue un completo fracaso. Tanto, que se lo llegó a conocer como la “catástrofe de la acústica del siglo XX”. Aunque fue diseñada por el mejor acústico de la época con una teoría matemática en apariencia irreprochable, el resultado acústico-musical fue muy malo. El día de la inauguración el director a cargo de la orquesta, Leonard Bernstein, se retiró sin hacer comentarios de prensa y al día siguiente Harold Schonberg, crítico estrella del New York Times y ganador del premio Pulitzer, comentó que la sala sonaba como “un gran limón de 16 millones de dólares”.

Sin embargo, los estudios posteriores, que realizaron los más destacados investigadores de la época -Jordan, Kuttruff y Schroeder entre ellos-, concluyeron que el comportamiento físico de la sala fue el esperado por Beranek y que satisfacía plenamente las condiciones de la teoría de Sabine. En síntesis, que el problema no fue causado por un error constructivo o de cálculo sino por una falla de base en la teoría madre (Basso, 2009). Como era de esperarse, aparecieron una nueva serie de teorías que, con la intención de rescatar el modelo de Sabine, incorporaban nuevos parámetros acústicos *ad-hoc*.

Hasta que, en el año 1974, Manfred Schroeder (1926-2009) publicó un trabajo en el que cuestionó la raíz misma del modelo de Sabine y su concepto de calidad acústica. Propuso la incorporación de un nuevo parámetro físico, el *Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural* (IACC), que superaba en importancia al TR de Sabine a la hora de determinar la calidad acústica de un espacio para música (Schroeder y otros, 1974). El IACC es un parámetro binaural -a diferencia del TR que es monofónico-, y evalúa las pequeñas diferencias entre las señales que llegan a cada uno de los oídos de un sujeto. Las consecuencias teóricas y prácticas de este cambio de paradigma fueron muy grandes y a partir de ese momento el TR dejó de ocupar la posición de privilegio que había mantenido desde principios del siglo XX.

No obstante la potencialidad del nuevo planteo, su implementación práctica fue difícil y lenta. Los primeros intentos, agregando difusión en el interior de la sala para aumentar el porcentaje lateral en la distribución de la energía y reducir de este modo el IACC -según Schroeder cuanto más chico mejor- no dieron buen resultado. A principios de la

década de 1980 se comenzó a estudiar en qué medida la forma de la sala incidía en su calidad y algunos arquitectos y especialistas, como Cyril Harris y Russell Johnson, decidieron volver al tradicional auditorio en forma de caja de zapatos, típico del siglo XIX, al que le cambiaron las decoraciones interiores neoclásicas por diseños contemporáneos. Aunque el planteo era muy conservador desde la arquitectura, se mostraba atractivo desde el punto de vista acústico y los resultados fueron musicalmente satisfactorios.

En la misma época comenzaron a usarse los dispositivos de acústica variable. Desde 1989, año de la inauguración del Auditorio *Eugene McDermott* de Dallas, es común el empleo de cámaras reverberantes acopladas que se vinculan a la sala principal a través de compuertas. Las cámaras acopladas permiten modificar el volumen total del auditorio y, en consecuencia, la reverberación de la sala se puede ajustar dentro de ciertos límites. En algunos casos, también se introdujeron superficies reflectoras móviles en la zona del escenario. La combinación adecuada de estos dispositivos permite ajustar el campo acústico en función de las características musicales de la obra a representar.

En la actualidad coexisten numerosas tipologías arquitectónicas y varias teorías acústicas, que se aplican de acuerdo a las preferencias que en cada caso manifiestan los arquitectos y especialistas a cargo del diseño. En lo que sigue describiremos con mayor detalle cada una de las teorías y desarrollos mencionados en esta breve reseña.

## 2. SABINE Y LA TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN

Wallace Sabine propuso sus hipótesis principales a finales del siglo XIX, luego de una larga serie de trabajos experimentales sobre salas “vivas”, con escasa absorción (de superficies internas muy reflexivas o poco absorbentes). A partir de un meticuloso análisis del salón de lectura del museo de Arte Fogg de Boston, llegó a la conclusión de que la calidad acústica dependía fundamentalmente de sólo tres factores independientes entre sí: la *sonoridad*, el *balance* y la *reverberación* (Sabine, 1922). En su modelo, la *sonoridad* estaba relacionada con la cantidad de energía acústica puesta en juego y dependía tanto de la potencia de la fuente sonora como de las características físicas del recinto; el *balance* incluía los atributos temporales, espaciales y espectrales que rigen la preservación del timbre de los sonidos y su distribución uniforme en el espacio; la *reverberación*, a su vez, determinaba la evolución temporal de la energía acústica. Centró su atención en este último factor y definió un parámetro, el *Tiempo de Reverberación* (TR), que cuantifica el tiempo que tarda el sonido en extinguirse cuando cesa de emitir la fuente. En el modelo de Sabine, el TR podía calcularse teóricamente a partir de dos magnitudes físicas independientes: el volumen del recinto y la absorción



acústica total. Las hipótesis de Sabine fueron demostradas al poco tiempo por William Franklin, al aplicarlas a un recinto con un campo sonoro difuso determinado por una distribución uniforme del material absorbente (Franklin, 1903).

El punto central del modelo de Sabine, de gran importancia teórica para esta tesis, considera que la intensidad del sonido decrece siguiendo una ley exponencial  $e^{-kt}$ , en la que  $k$  es la constante de amortiguamiento -característica de cada local- y  $t$  es el tiempo expresado en segundos transcurridos a partir del cese de la emisión de la fuente.

En la Figura 2.1 se puede ver un ejemplo de decaimiento exponencial de la presión sonora en una sala ideal y en una sala real.

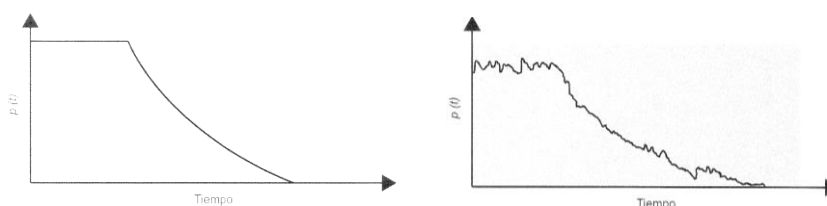


Figura 2.1. Decaimiento exponencial teórico del nivel de presión sonora en una sala ideal de alta difusión (izquierda) y medido en una sala real de difusión media (derecha) (Basso, 2009).

Sabine definió el *Tiempo de Reverberación* como el tiempo que debe transcurrir para que la intensidad del sonido que se extingue quede reducida a una millonésima parte de la intensidad inicial. Esta definición equivale a decir que transcurrido el tiempo de reverberación la señal se reduce 60 dB.

También realizó un cálculo teórico que permite deducir el TR de las características físicas del espacio. Si  $V$  es el volumen en  $m^3$  y  $A$  la absorción acústica total del recinto, el TR se puede calcular con:<sup>4</sup>

$$TR = \frac{0,16 V}{A}$$

Esta fórmula es, aún hoy, la más utilizada para el diseño estándar de una sala. También se la emplea como una primera aproximación estadística en los proyectos más elaborados que incluyen simulaciones digitales o numéricas.

<sup>4</sup> La deducción se puede ver en el Capítulo 3.

### CRÍTICAS A LA TEORÍA DE SABINE

La crítica teórica más significativa a la teoría de Sabine fue realizada por Carl Eyring (1889-1951) muy poco tiempo después de su publicación y va a ser analizada en detalle en el Capítulo 3. En esencia, Eyring corrigió una inconsistencia física del planteo de Sabine cuando se lo aplica a espacios con gran cantidad de absorción acústica.

También se le cuestionó la necesidad de mantener una gran homogeneidad espacial en la distribución del material absorbente y de considerar la difusión pareja de la energía acústica. Las salas reales no son homogéneas -el público ocupa sólo el plano inferior- y la difusión dista mucho de ser perfecta.

Las dos objeciones que siguen están directamente relacionadas con esta tesis:

1. La teoría de Sabine exige un decaimiento perfectamente exponencial de la energía acústica. Este comportamiento del campo acústico sólo le permite moverse entre dos polos contrapuestos: un campo muy reverberante y de escasa claridad o un campo muy claro y de escasa reverberación. Como veremos en el capítulo dedicado al marco teórico de este trabajo, suponer campos acústicos exponenciales por tramos o directamente no exponenciales permite sortear esta lógica binaria y obtener a la vez claridad y reverberación.
2. La adopción de un sólo valor de decaimiento exponencial, cualquiera sea su método de cálculo, es válida únicamente en la parte del campo sonoro en la que la densidad de reflexiones es muy grande y que, por lo tanto, puede ser tratado estadísticamente. Pero en el campo acústico temprano, que posee una baja densidad de reflexiones, se impone un análisis determinista muy cuidadoso. En la Figura 2.2 se puede ver la diferencia entre la zona de las primeras reflexiones (determinista) y la de reverberación sabiniana (estadística).

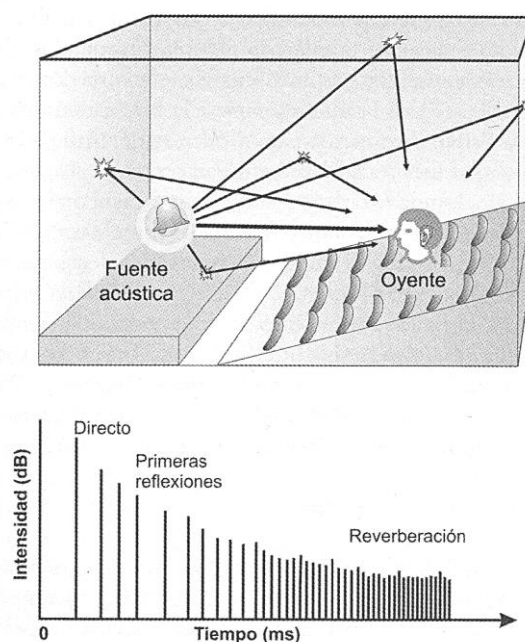


Figura 2.2. Patrón de reflexiones en una sala y reflectograma en un sector de la platea producto de las reflexiones múltiples sobre las distintas superficies del espacio.

En los capítulos dedicados a los estudios de caso (Nº 4, 5 y 6) se podrán ver las propuestas ensayadas para resolver estas dos últimas objeciones.

### 3. CRISIS DEL MODELO DE SABINE

Entre los años 1950 y principios de la década de 1960, Beranek se dedicó a estudiar el problema en detalle y decidió llevar al límite la teoría de Sabine cuando le encargan el diseño acústico de la nueva sala para la Orquesta Filarmónica de Nueva York en el Lincoln Center.

#### EL PHILHARMONIC HALL DE NUEVA YORK

La Orquesta Filarmónica de Nueva York fue fundada en 1842. Entre 1891 y 1962 ofreció sus conciertos en el *Carnegie Hall*, una sala de 2.804 localidades de gran calidad acústica. Durante la dirección de Leonard Bernstein, que fue titular de la orquesta entre 1958 y 1969, las autoridades de la ciudad decidieron construir un auditorio para música sinfónica con una capacidad final de más de 2.500 butacas ubicado en el Lincoln Center. La obra fue confiada al Arq. Max Abramovitz, quien convocó a Leo Beranek para acompañarlo con el diseño acústico.

El trabajo de Beranek se inició con un relevamiento acústico exhaustivo donde reunió información sobre 54 salas de Europa, América y Asia que incluyó mediciones y encuestas. Publicó sus conclusiones en el libro *Música, acústica y arquitectura* en el que escribe, poco antes de la inauguración de la nueva sala:

“El punto culminante de este libro es la descripción de las precauciones tomadas en la planificación del *Philharmonic Hall* del Lincoln Center. La señora suerte ha sido sustituida, por fin, por un análisis cuidadoso y la aplicación minuciosa de principios acústicos nuevos pero sólidamente basados” (Beranek, 1962, pp. 23-24).

Beranek empleó en el diseño un modelo matemático que llevaba al límite la teoría de Sabine -aunque sin contradecirla en sus postulados centrales-, en el que le asignó particular importancia a un nuevo parámetro, el *Retardo de la Primera Reflexión Significativa* (ITDG). Este parámetro mide el tiempo que transcurre entre la llegada del sonido directo y la primera reflexión significativa proveniente de la sala, y se vincula con la impresión de intimidad sonora que perciben los oyentes.



Figura 2.3. Fotografía del interior original del Philharmonic Hall.<sup>5</sup>

El auditorio fue inaugurado en septiembre de 1962 y, aunque fue diseñado por el que estaba reputado como el mejor acústico de la época y se aplicó una teoría matemática considerada perfecta, el resultado acústico-musical fue muy malo. Los oyentes

<sup>5</sup> Extraído de <http://fineartamerica.com/featured/new-york-lincoln-center-granger.html>

señalaron falta de bajos y un sonido plano y distante, y los músicos se quejaron de dificultades de ejecución en el escenario.

El fracaso del *Philharmonic Hall* atrajo a los más destacados investigadores a nivel mundial, quienes estudiaron detalladamente el auditorio. Concluyeron, a partir de los resultados de una gran cantidad de mediciones realizadas a lo largo de una década, que el comportamiento físico de la sala fue el esperado por Beranek: la sala satisfacía cabalmente las condiciones impuestas por la teoría de Sabine. Resultó evidente la necesidad de subsanar los inconvenientes asociados a esta teoría o, mejor aún, crear una nueva serie de teorías acústicas.

Algunos investigadores incorporaron parámetros temporales *ad-hoc* para corregir por tramos la teoría de Sabine, mientras que otros intentaron reemplazar los postulados centrales sobre los que se sustentaba la noción de reverberación. Finalmente, a mediados de la década de 1970, Schroeder cuestiona la raíz del concepto de calidad acústica e introduce por primera vez un criterio espacial con el objetivo de resolver el problema (ver la sección *Criterios Espaciales* en este capítulo).

Volviendo al *Philharmonic Hall*, entre los años 1962 y 1976 se realizaron numerosos intentos para mejorar la sala. Las primeras modificaciones las realizó el mismo Beranek y consistieron en cambios en el escenario, en los paneles del cielorraso y en los difusores de las paredes laterales. Se reemplazaron las butacas por otras menos tapizadas y se colocó material absorbente en la pared posterior para evitar algunos ecos prominentes. Los cambios, aunque mejoraron en parte la situación, no consiguieron que la sala fuese aceptada por los músicos y el público.

En 1976 se decide rediseñar completamente el auditorio. Se conservó sólo la estructura de hormigón externa y el proyecto interior se le encarga al Arq. Philip Johnson, quien convoca para el diseño acústico a Cyril Harris, de la Universidad Columbia. Harris reubica los niveles de bandejas, modifica el cielorraso, agrega irregularidades en las superficies, modifica el escenario y reemplaza nuevamente las butacas. El interior de la sala se reformuló por completo y hasta se le cambió el nombre por el de *Avery Fisher Hall*. Entre el primer diseño y el de Harris existen diferencias de carácter acústico en la reverberación, la claridad y la textura del sonido. Pese a estos cambios, la sala aún no se considera satisfactoria y la orquesta Filarmónica de Nueva York continúa pidiendo tocar en el Carnegie Hall.

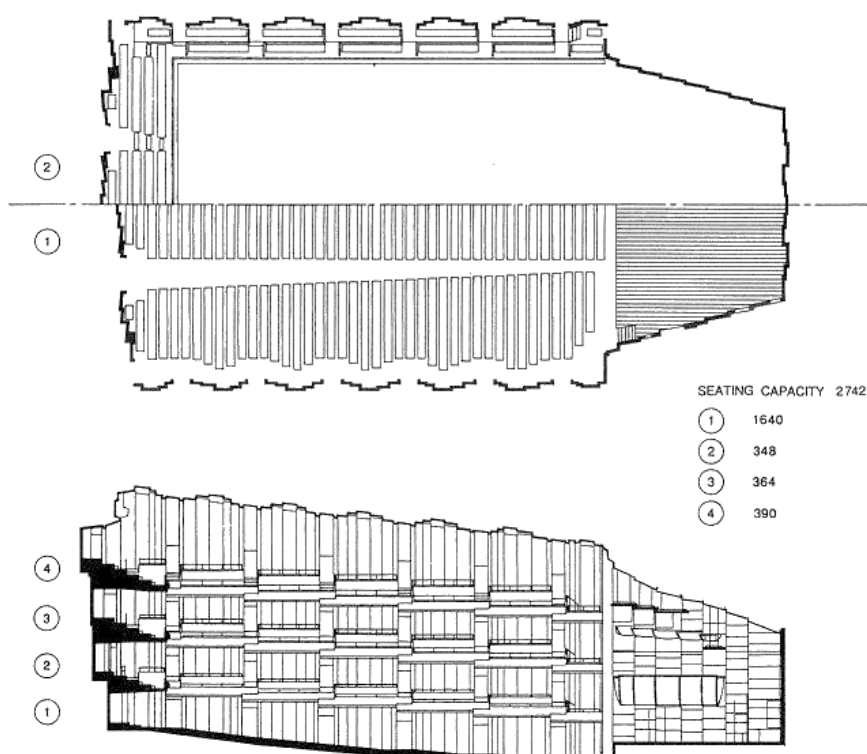


Figura 2.4. Planta y corte del Avery Fisher Hall. Extraído de Leo Beranek (1996).

### LA PHILHARMONIE DE BERLÍN

Sobresale nítidamente, frente a todos los fracasos acústicos ocurridos durante el siglo XX, la nueva sala de la *Philharmonie* de Berlín, una de las pocas excepciones exitosas del período. Inaugurada en el año 1963 en base al proyecto del arquitecto Hans Scharoun (1893-1972) y del acústico Lothar Cremer (1905-1990), su diseño en forma de viñedo o arena plantea una arquitectura sumamente original de la que no había antecedentes acústicos. “Música en el centro” fue el postulado fundacional del arquitecto, que sentía que la posición normal de la orquesta, en un extremo de la sala, impedía la comunicación franca entre los músicos y la audiencia. Scharoun quiso incorporar la experiencia que tuvo durante un viaje por África, en el que observó que los pobladores que ejercen el rol de músicos -los roles se alternan entre todos los miembros de la comunidad- se ubican en el centro y el público los rodea. Para llevar la idea a la tradición europea diseñó una sala en la que la orquesta se sitúa cerca del centro de la sala y está rodeada por el público que se ubica en terrazas. Además, los músicos de la orquesta, para llegar al escenario, deben pasar entre el público.

Lothar Cremer, el asesor acústico del proyecto, detectó los inconvenientes de carácter acústico que provocaba el partido arquitectónico. La principal dificultad radicaba en que la orquesta, en su conjunto, irradia en el espacio principalmente hacia adelante, su direccionalidad privilegiada. Por lo tanto, si una parte del público se ubicara detrás de la orquesta la audición sería radicalmente diferente. Al concluir la etapa de diseño, la orquesta quedó desplazada del centro geométrico de un espacio con forma de pentágono o hexágono irregular (Figura 2.5). El corte se definió como una gran carpa con techo en forma de cúspide. La estrategia que utilizó Cremer para suplir las paredes laterales, que en la tipología de arena de alguna manera “no están” por hallarse muy alejadas de las fuente acústicas y del público, fue colocar superficies reflectoras en los frentes de palcos, bandejas y terrazas (Figura 2.6).

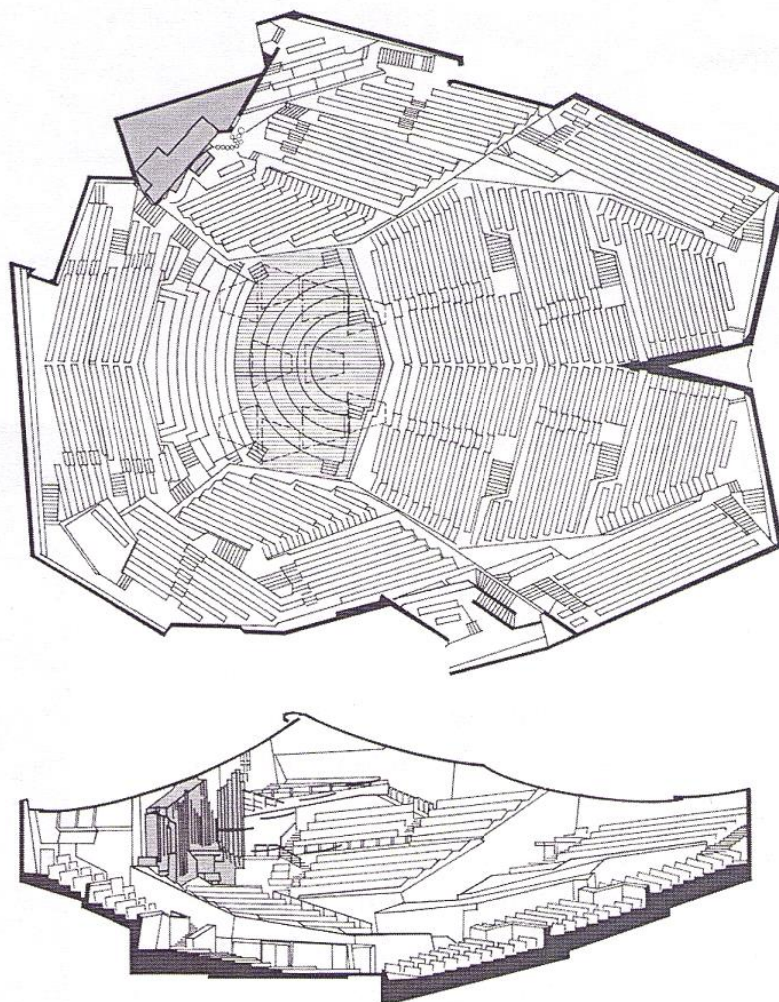


Figura 2.5. Planta y corte de la Philharmonie de Berlín. Extraído de Leo Beranek (1996).

La sala no es acústicamente homogénea y, según la ubicación elegida por el público, se comporta de manera diferente. En especial, hay un contraste sonoro importante al ubicarse detrás o delante de la orquesta. No obstante, la calidad acústica en un gran porcentaje de sus butacas es muy buena.

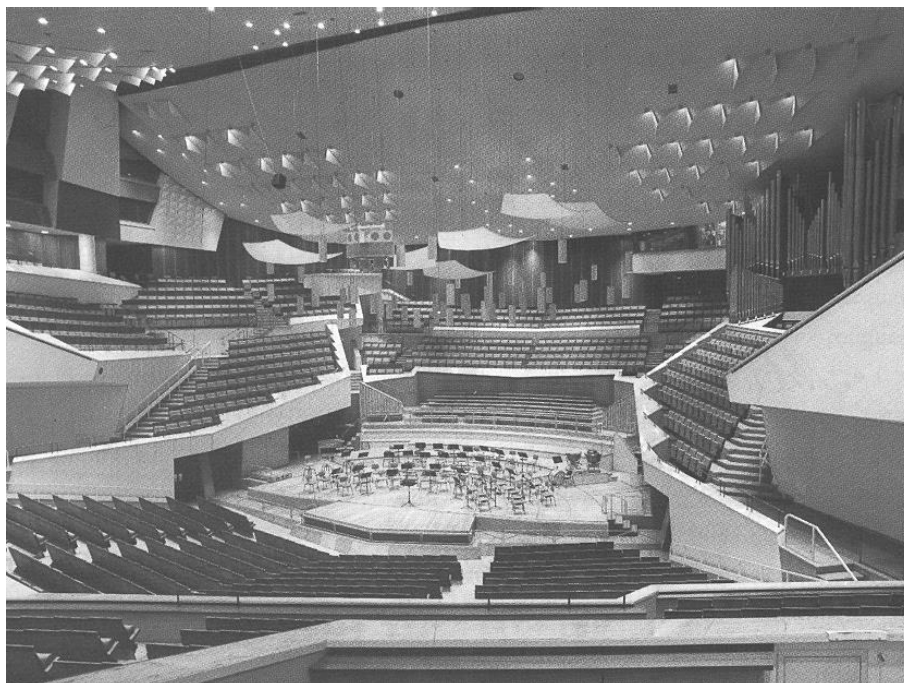


Figura 2.6. Fotografía de la Sala de la Philharmonie de Berlín (Fotógrafo: Reinhard Friedrich)

Los valores de las mediciones del tiempo de reverberación en base al modelo de Sabine de esta sala, sin embargo, son similares a los obtenidos en el Philharmonic Hall del Lincoln Center. En este punto se impone necesariamente una pregunta: ¿por qué las dos salas, con tiempos de reverberación parecidos, llegan a resultados acústicos tan diferentes? Era imprescindible desarrollar nuevas herramientas de análisis, que llegaron con la aparición de los criterios espaciales de evaluación.

#### 4. CRITERIOS ESPACIALES

A principios de la década de 1970 algunos investigadores, entre ellos Marshall, Barron, Blauert, Schroeder y Ando, realizaron diferentes experimentos de laboratorio con campos acústicos tridimensionales. Tenían por objetivo resolver el problema central de su época en el campo de la acústica arquitectónica: ¿por qué la mayoría de las salas construidas en el siglo XX, en base a las teorías acústicas dominantes, no eran de buena



calidad? De a poco comenzó a instalarse la hipótesis de que la distribución espacial de la energía sonora resultaba tanto o más importante que su comportamiento temporal.

En 1974, Schroeder, Gottlob y Siebrasse publicaron un artículo fundacional que ofreció una nueva perspectiva en la forma de pensar y diseñar salas para música. En el trabajo se analizaron las preferencias perceptuales de un grupo de oyentes ante distintas salas de concierto europeas y su correlación con las características geométricas y acústicas de cada una de ellas (Schroeder y otros, 1974). En el experimento se pudieron realizar comparaciones auditivas entre dos salas por vez, prácticamente al mismo tiempo, una inmediatamente a continuación de la otra. Examinaron 25 auditorios europeos sin presencia de público a partir de un método de trabajo dividido en cinco etapas:

1. Se registraron fragmentos musicales de la Sinfonía Nro. 41 de Mozart ejecutados por la orquesta de la BBC en una cámara anecoica.<sup>6</sup>
2. Se reprodujeron los fragmentos mediante un sistema estandarizado de amplificación colocado en cada uno de los escenarios de las salas de conciertos seleccionadas para la investigación.
3. Se registraron las respuestas de cada sala con micrófonos binaurales colocados en una cabeza artificial.
4. Se reprodujeron los registros de las grabaciones binaurales a través de parlantes en una cámara anecoica, con el objeto de que cada uno de los sujetos que participó en la experiencia recibiera las mismas señales que la cabeza artificial en las distintas salas. De esta manera pudieron recrear en laboratorio lo que la cabeza artificial había registrado en cada uno de los auditorios.
5. Se analizaron estadísticamente las respuestas de los sujetos con el fin de establecer un orden de preferencia perceptual y construir una escala de calidad acústica comparativa. Los oyentes estuvieron obligados a elegir una sala de cada par que se les presenta para cumplir con el método de elección forzada entre dos alternativas (Basso, 2009).

Este método permitió la casi instantánea comparación entre la acústica de dos salas diferentes con la misma fuente acústica y la misma obra del repertorio musical. Los sujetos podían contrastar auditivamente las salas con su memoria a corto plazo, cosa imposible de hacer escuchando música en salas reales donde sólo se puede comparar lo que se percibe en el momento con el recuerdo de lo percibido en otra sala. Schroeder utilizó el método de elección forzada entre dos alternativas, en el que el oyente está

---

<sup>6</sup> Una sala con sus superficies revestidas con material absorbente que reproduce aproximadamente las condiciones acústicas del campo libre.

obligado a elegir una sala del par que se le presenta, y estableció un orden de preferencia perceptual para construir una escala de calidad acústica comparativa.

### **COEFICIENTE DE CORRELACIÓN CRUZADA INTERAURAL**

Luego, a partir de métodos de análisis multidimensional, los resultados de las preferencias perceptuales se contrastaron con diferentes parámetros acústicos físicos medidos en cada una de las salas. El análisis de los coeficientes de correlación entre variables les permitió reconocer tres atributos acústicos dominantes de acuerdo a las preferencias de los oyentes:

1. Un factor que ponderaba la diferencia entre los sonidos percibidos por los dos oídos (cuánto más correlacionados, menos los valoraban los sujetos del experimento).
2. El TR, que sólo resultó significativo si su valor quedaba por debajo de los 2 s, el valor considerado óptimo para música sinfónica de los períodos Clásico y Romántico.
3. La Claridad a 50 ms.

A partir de estos resultados, Schroeder y su equipo construyeron una escala de calidad acústica aplicable al análisis de espacios para música. El descubrimiento central fue que el factor espacial resultó el componente físico más importante para dar cuenta de la calidad acústica de una sala. Los investigadores propusieron entonces la utilización de un parámetro físico binaural, el *Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural* (IACC) para evaluar la espacialidad acústica de una sala. La correlación cruzada mide la semejanza entre dos señales mediante un proceso iterativo: si las dos señales no están vinculadas entre sí, por ejemplo dos ondas de ruido estocástico, el valor de correlación es bajo. Si, por el contrario, las señales están relacionadas entre sí, su valor es alto.

El IACC tiene como correlato perceptual la *Sensación de Envoltura* (LEV) que se vincula con la sensación que tiene el oyente de estar rodeado por el sonido.

En 1996 Leo Beranek definió el *Factor de Espacialidad* (1-IACC) que se emplea actualmente. Si el (1-IACC) vale 1, la correlación entre los sonidos en los dos oídos es nula. Como referencia, los criterios de evaluación de Ando, Barron e Hidaka establecen que el factor de espacialidad debe ser mayor que 0,60 en una buena sala (Beranek, 1996 y Ando *et al.*, 1997).

### **FRACCIÓN LATERAL DE ENERGÍA**

Entre 1967 y 1968, Harold Marshall (1931- ) examinó el efecto de la forma en las salas de concierto y su relación con la distribución de la energía temprana en función del tiempo. Comprobó en las salas rectangulares y angostas, de muy buena calidad

acústica, la existencia de reflexiones laterales que llegaban a los oídos de los oyentes en mayor cantidad y con más energía que en las salas anchas e irregulares -de menor calidad acústica-. Esas reflexiones generan en los oyentes la sensación de estar envueltos en sonido (Marshall, 1967). En base a dichas ideas, Michael Barron definió en 1981 otro parámetro que puede utilizarse para evaluar las reflexiones laterales, la *Fracción Lateral de Energía* (LF), que es la razón entre la energía lateral temprana y la energía temprana total (Barron, 1981).

Este parámetro físico se vincula con el rasgo perceptual que define el Ancho Perceptual de la Fuente.

## 5. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS ESPACIALES

La aparición de los criterios espaciales permitió volver a analizar toda la historia de la acústica de salas desde una nueva perspectiva. Cuestiones como porqué las salas del siglo XIX eran mejores que las del siglo XX, o cómo explicar fracasos en diseños aparentemente bien planteados, comenzaron a tener respuestas convincentes.

Las nuevas teorías establecían que no sólo era importante el comportamiento temporal de la energía, es decir cómo se extingue el sonido en el tiempo, sino que tenía tanta o mayor relevancia el lugar desde el que le llegaba esa energía a los oyentes. Reuniendo ambos factores, se especuló que la dirección de arribo de la energía resultaba especialmente significativa durante las primeras décimas de segundo de la señal: el campo temprano comenzaba a ser analizado con un interés creciente.

### CRITERIOS ESPACIALES Y ARQUITECTURA.

Para alcanzar buena calidad acústica, el espacio debía favorecer la aparición de numerosas reflexiones laterales en los primeros instantes de la señal. Es decir, el campo acústico temprano debía incluir una gran cantidad de energía lateral decorrelacionada.

La arquitectura, a lo largo de la historia, dio respuesta a esta exigencia de tres maneras complementarias: adecuando la forma de la sala -su geometría-, agregando difusión e incorporando superficies reflectoras.

### LA FORMA DE LA SALA

A la luz de los nuevos modelos teóricos, la forma de una sala para música debería priorizar las reflexiones laterales. Veamos cómo actúan en este sentido las geometrías arquitectónicas más comunes.

## TIPOLOGÍAS ARQUITECTÓNICAS

Las principales formas que se han empleado desde el siglo XIX en las salas para música de gran tamaño responden a cuatro tipologías básicas: abanico, arena, rectangular (“caja de zapatos”) y herradura. En lo que sigue haremos una muy breve descripción de cada una de ellas.<sup>7</sup>

Una sala en forma de abanico, que tiene su origen en el teatro clásico griego, permite distribuir una gran cantidad de público a distancias relativamente cercanas al escenario. Por este motivo se la ha empleado reiteradamente a lo largo del siglo XX. Una sala típica en abanico se observa en la Figura 2.7.

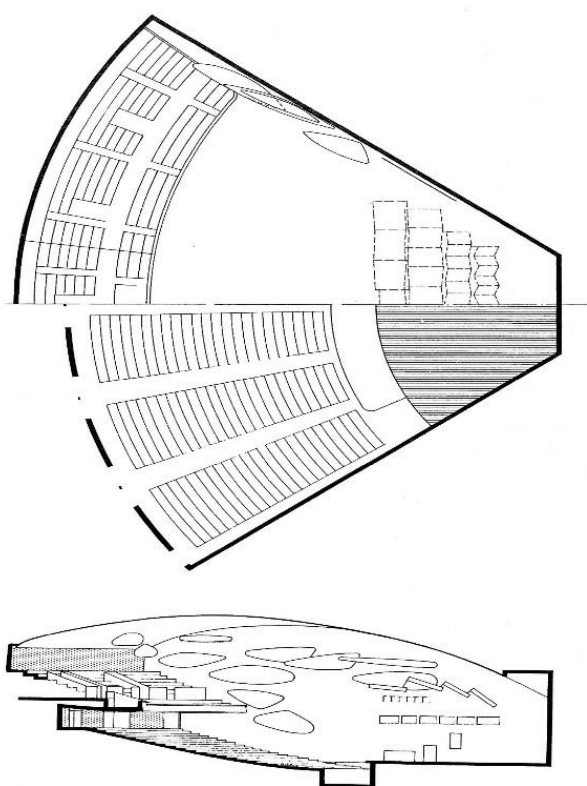


Fig. 2.7: Planta y corte de un teatro en abanico (Aula Magna, Caracas).

Las salas circulares, con el público rodeando el escenario, fueron inspiradas en las arenas romanas y tuvieron un renacimiento en la década de 1950. Esta disposición permite, como la anterior, la ubicación de gran cantidad de espectadores a distancias moderadas, pero exige planteos originales -tanto en los aspectos acústicos como

<sup>7</sup> La parte sustancial del desarrollo que sigue fue tomado de la Tesis de Doctorado de M. A. Farina (2015).

visuales- en la disposición de los músicos. En la Figuras 2.5 y 2.6 se puede ver un teatro en forma de arena.

La tercera forma característica, que apareció a mediados del siglo XIX, es la gran sala de conciertos rectangular y altura constante o “caja de zapatos”. Este tipo de sala es muy apreciada por sus características acústicas, aunque en ella muchos espectadores quedan relativamente alejados del escenario (Figuras 2.8 y 2.9).

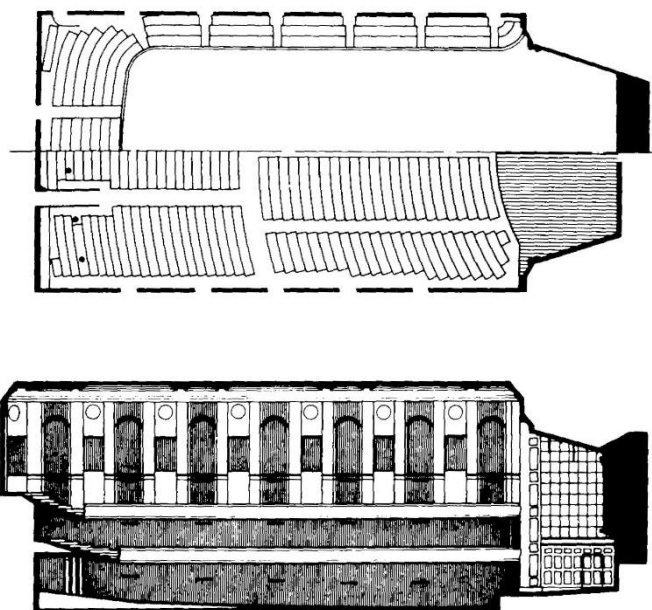


Fig. 2.8: Planta y corte de una sala tipo “caja de zapatos” (Symphony Hall, Boston).

Dice María Andrea Farina: “En esta clase de salas se consolidó el orgánico de la orquesta sinfónica romántica con maderas a 2, es decir que la plantilla orquestal normalizada -en cantidad y tipo de instrumentos- suena balanceada en ese espacio y define a la orquesta de ese período, instrumento que se mantuvo casi inalterado hasta nuestros días.<sup>8</sup> Si las salas para música sinfónica hubieran tenido en sus orígenes otras

<sup>8</sup> La sección de maderas de la orquesta clásica que incluye las obras del primer período de Beethoven -e incluso lo supera- tiene: 2 flautas, 2 oboes, 2 clarinetes y 2 fagotes. La orquesta del siglo XIX -posterior a las obras de Beethoven-: piccolo y 2 flautas, 2 oboes y corno inglés, 2 clarinetes y clarinete bajo y 2 fagotes y contrafagot. La gran orquesta de finales del siglo XIX y vigente durante el siglo XX: piccolo y 3 flautas, 3 oboes y corno inglés, clarinete en C, D o Eb, 2 o 3 clarinetes y clarinete bajo, 3 fagotes y contrafagot. Con Mahler y Stravinsky la gran orquesta como se conoce en la actualidad fue aceptada como norma. La sección de cuerdas quedó establecida con 16 a 18 violines primeros, 14 a 16 violines segundos, 10 a 12 violas, 10 a 12

características (planta en forma de abanico o de arena, por ejemplo) la plantilla orquestal hubiera sido diferente. Cuando una orquesta sinfónica suena en otro tipo de salas el resultado musical -balance, sonoridad, equilibrio de secciones- no es el mismo que en una “caja de zapatos”. Este esquema de salas perduró como tipología estándar hasta la primera guerra mundial y tuvo una profunda revisión en la década de 1980.” (Farina, 2015).



Figura 2.9. Fotografía del interior del Musikvereinsaal de Viena, una de las más célebres salas tipo “caja de zapatos”.<sup>9</sup>

Cinco de las mejores salas para música sinfónica del mundo, en el ranking de calidad acústica elaborado por Beranek (2003), son cajas de zapatos.

La cuarta forma, la del teatro barroco en herradura, se emplea para representaciones de teatro de prosa y ópera. Esta disposición permite ubicar a los espectadores a una distancia moderada que favorece la inteligibilidad del texto cantado. Se sacrifica, sin embargo, calidad en las visuales para amplios sectores del público. Se puede ver un teatro en herradura típico en la Figura 2.10.

---

cellos y 8 a 10 contrabajos. El orgánico lo completan las secciones de metales, timbales y percusión (Farina, 2015).

<sup>9</sup> Extraído de <https://www.musikverein.at>. Acceso: Enero 2015.

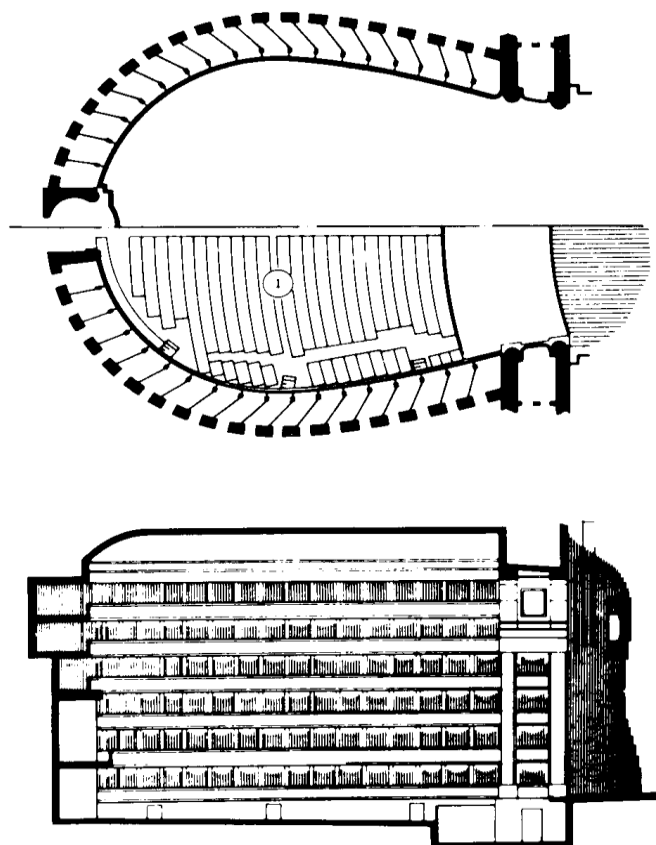


Figura 2.10: Planta y corte de un teatro en herradura (Teatro Alla Scala, Milán).

### LA FORMA DE LA PLANTA

La planta del espacio juega un papel decisivo en este sentido. Por ejemplo, las paredes paralelas de las salas de planta rectangular -las típicas “cajas de zapatos” del siglo XIX- generan gran cantidad de reflexiones laterales sobre la platea. Por el contrario, en las salas con planta en forma de abanico -una tipología característica del siglo XX-, el sonido que proviene de las reflexiones en las paredes laterales se dirige hacia atrás y no le aporta energía lateral a la audiencia (Figura 2.11).

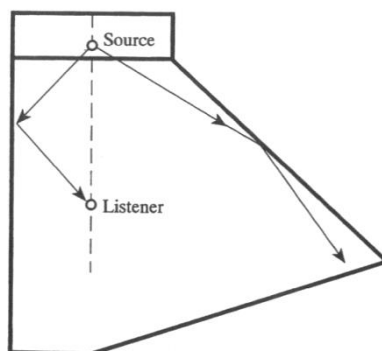


Figura 2.11. Esquema que muestra el comportamiento de las reflexiones en una sala de planta rectangular (izquierda) y en una sala en abanico (derecha). Extraído de Leo Beranek (1996).

En una sala de planta rectangular, al oyente le llega la señal directa desde la fuente acústica ubicada en el escenario y una gran cantidad de energía reflejada en las paredes. Lo que recibe el oído derecho del espectador es diferente de lo que recibe el izquierdo. De esta manera, la forma de la sala contribuye a aumentar las diferencias interaurales y la decorrelación de las señales dicóticas (Basso, 2006), precisamente lo que recomiendan las nuevas teorías para lograr alta calidad acústica. El oyente siente estar inmerso en un campo acústico que lo rodea, compartiendo el mismo espacio con la fuente.

En una sala con planta en forma de abanico, por el contrario, al espectador le llega únicamente la señal frontal que proviene del escenario, y los dos oídos reciben aproximadamente las mismas señales, altamente correlacionadas. La fuente acústica se percibe adelante, plana y separada del oyente. Aunque los sonidos lleguen a oírse claros y definidos, se los siente fuera del espacio que le corresponde al espectador, quien no experimenta la sensación de estar inmerso en un campo acústico compartido.

#### **LA FORMA DEL CIELORRASO**

Las salas con cielorraso plano de poca altura, que generan potentes reflexiones casi iguales para ambos oídos de los espectadores, poseen un comportamiento que no favorece las diferencias interaurales y su factor de espacialidad presenta, en la mayoría de los casos, un valor bajo.

Una alternativa, bastante empleada en diseños de salas medianas y chicas, consiste en construir el cielorraso con planos en diferentes pendientes, por ejemplo a dos aguas. Este quiebre permite que aparezcan diferencias en los recorridos de las señales que llegan a cada uno de los oídos del oyente y que, por lo tanto se reciban



decorrelacionadas. El factor de espacialidad aumenta con relación al del cielorraso plano y también lo hace la calidad acústica en platea (Figura 2.12).

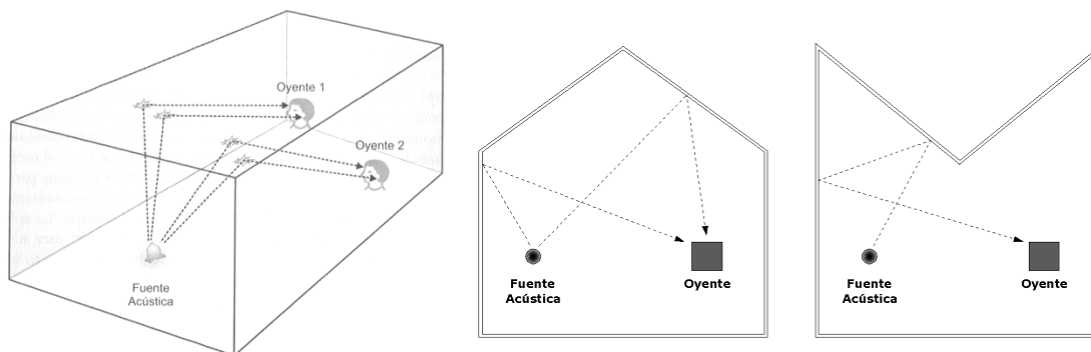


Figura 2.12. Efecto acústico de los cielorrasos sobre el factor de espacialidad. A la izquierda un cielorraso plano y a la derecha dos cielorrasos a dos aguas.

Otra opción de diseño, que permite evitar los efectos negativos de los cielorrasos planos, es colocarlos a gran altura para reducir la potencia de las reflexiones correlacionadas que genera.

### AGREGADO DE DIFUSIÓN

Otra de las soluciones encontradas para aumentar el factor de espacialidad fue el agregado de difusión sobre algunas superficies interiores específicas.

La idea apareció en varios trabajos de investigación en la década de 1970 y se aplicó en algunas obras de arquitectura. El agregado de elementos difusores a superficies estratégicas evita las reflexiones especulares, aumenta la cantidad de energía lateral y, como consecuencia, la sensación de espacialidad del campo acústico.

A diferencia de las reflexiones especulares que producen las superficies planas, las superficies difusoras devuelven la energía en todas las direcciones posibles. En la Figura 2.15 se pueden ver ambos comportamientos.

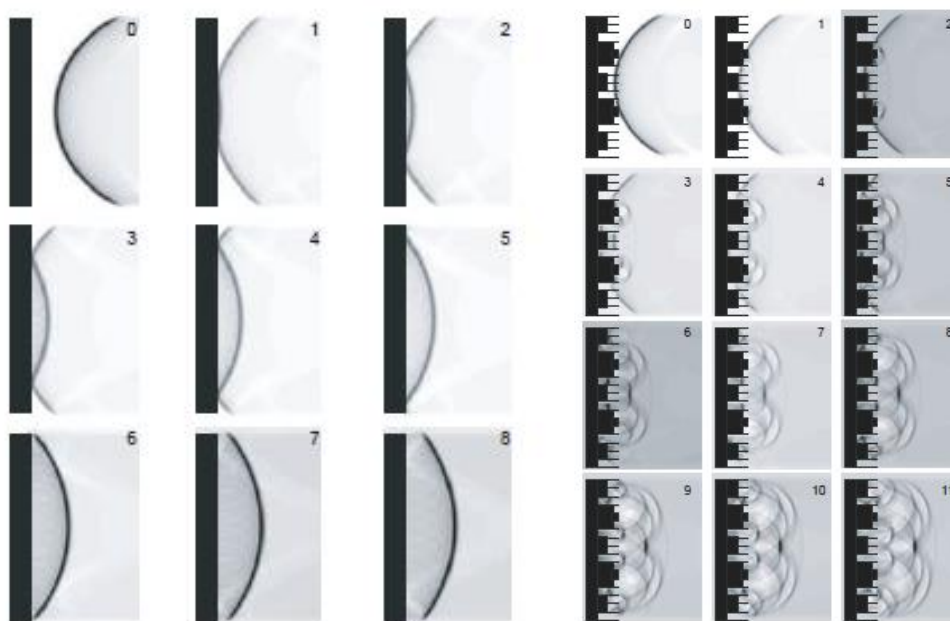


Figura 2.13. Secuencia temporal de una onda cilíndrica reflejándose en una superficie plana (izq.) y en un difusor de Schroeder (der.). Los números indican el tiempo en ms. Extraído de Cox y D'Antonio (2009).

La decoración interior de las salas de los siglos XVII y XIX contribuía en gran medida a su calidad acústica al aportar la difusión necesaria. Las estatuas, altorelieves, bajorrelieves, nichos y casetones neoclásicos del *Konzerthaus* de Berlín, por ejemplo, aportan difusión y contribuyen a que la cantidad relativa de energía lateral aumente. Su cielorraso casetonado, similar a los de las salas de Boston y Viena, también difunde las ondas sonoras.

La arquitectura, a partir de las vanguardias del siglo XX, deja de utilizar las profusas decoraciones del siglo anterior y las reemplaza por superficies lisas, que no favorecen el factor de espacialidad. La relación entre la calidad acústica y la difusión sonora, descubierta en la década de 1970, planteó la necesidad de diseñar elementos difusores con una estética acorde a los nuevos tiempos. Hacia finales de la década, Schroeder desarrolló superficies difusoras de gran rendimiento que eran asimilables a la arquitectura contemporánea (Schroeder, 1979). Los diseños que propuso son consecuencia de una transferencia matemática con dos condiciones iniciales: alcanzar gran cobertura en el espacio y mantener inalterado el espectro de la señal.

En base a estas ideas se construyeron varias salas para música con cielorrasos muy difusores, tal como proponían los autores, pero con resultados dispares. Una de las más curiosas es la *Sala Beethoven* en la ciudad de Bonn, que se reconstruyó después de un

incendio en 1983 dejando inalterada su forma original. La geometría era una especie de abanico quebrado con un cielorraso en bóveda de baja altura (ver la Figura 2.14).

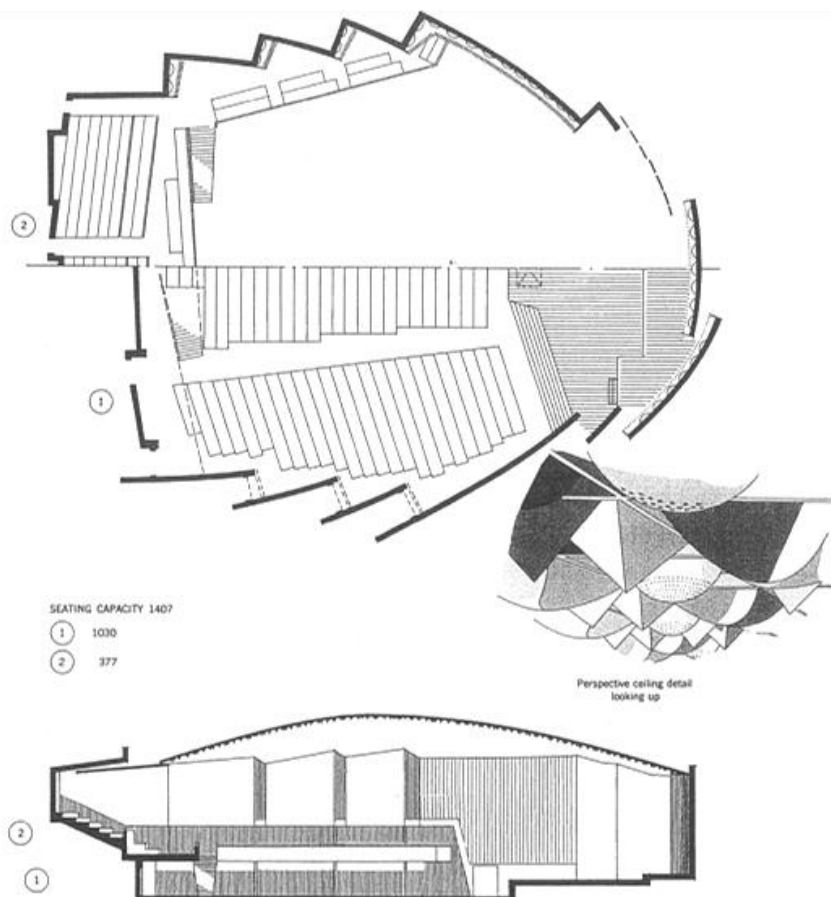


Figura 2.14. Planta y corte de la sala de Bonn. Extraído de Leo Beranek (1996).

Para mejorar baja la calidad acústica de la sala se incorporó un cielorraso muy difusor que incluía una disposición de 1.760 objetos -cubos, tetraedros, secciones de esferas, conos, cilindros- cuyo detalle se puede ver en la Figura 2.14. Sin embargo, en este auditorio el agregado de difusión en el cielorraso no solucionó los problemas relacionados con la tipología base. Resultaba claro que el problema de la calidad acústica no dependía de un solo elemento aislado.

En la década de 1980 comenzó a ganar terreno la idea de que debían combinarse varios factores para alcanzar la calidad acústica de las mejores salas del siglo XIX. Así, a la comprensión de la importancia de la forma se le unió la necesidad de combinar elementos difusores concebidos específicamente para un fin determinado. Se desarrollaron gran cantidad de algoritmos matemáticos (basados en números primos,

residuos cuadráticos o secuencia de elementos finitos) y disposiciones físicas que cumplen con la condición de reflexión difusa sin alteración espectral. El tipo de difusor escogido en cada caso determina el volumen físico que va a ocupar y el ancho de banda en el que se cumple la condición de reflexión sin modificación espectral.

Un diseño que permite una muy buena prestación es el basado en residuos cuadráticos a partir de un número primo. Brinda la posibilidad de un control preciso de las características espaciales y del rango de frecuencias de interés, aunque los dispositivos ocupan mucho espacio físico. La respuesta en frecuencia de los difusores RPG (Reflection Phase Grating), basados en la teoría de residuos cuadráticos, se establece a partir del diseño: la frecuencia de corte inferior depende de la profundidad de las celdas y la frecuencia de corte superior de su ancho. En la Figura 2.15 se pueden ver dos ejemplos representativos de difusores RPG.



Figura 2.15. Fotografías de la Sala Principal de la Usina del Arte de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires en las que se pueden ver dos clases de difusores acústicos.

### **INCORPORACIÓN DE SUPERFICIES REFLECTORAS**

Otra manera de aumentar el factor de espacialidad -cuando las características geométricas de las superficies límites de la sala resultan inadecuadas- es utilizar superficies reflectoras en posiciones cuidadosamente estudiadas, que aporten la energía lateral temprana necesaria. El tamaño y la disposición de los reflectores determinan el ancho de banda de la energía reflejada. El reflector funciona de manera efectiva para las señales cuya longitud de onda sean de menor tamaño que sus dimensiones. En otras palabras, un reflector actúa como un filtro pasa-altos cuya frecuencia de corte es función del tamaño. Es posible combinar varios reflectores

pequeños en forma de red de difracción para obtener frecuencias de corte más bajas que las que se consiguen con un único reflector de gran tamaño.

Un ejemplo de esta alternativa se implementó en la *Sala de Conciertos de Christchurch* en Nueva Zelanda, diseñada por los arquitectos Miles Warren y Maurice Mahoney, en la que trabajó como consultor acústico H. Marshall. La sala fue inaugurada en 1972.

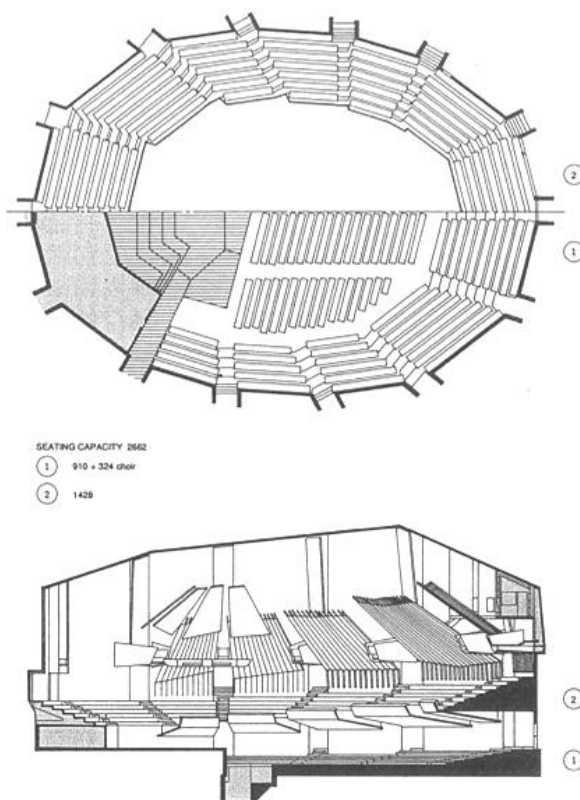


Figura 2.16. Planta y corte de la Sala de Conciertos Christchurch de Nueva Zelanda. Extraído de Beranek (1996).

La planta de la sala, como se observa en la Figura 2.16, posee forma de elipse. Como toda superficie cóncava, la elipse presenta puntos de concentración de la energía o focos -en el caso de la elipse aparecen dos focos conjugados- cuyo resultado es una sala no homogénea. Marshall, para corregir este defecto y crear una mayor impresión espacial, incorpora reflectores ubicados en la parte superior de la sala con el fin de orientar de manera lateral la energía sonora temprana. El Christchurch es una de las primeras salas donde el criterio espacial asume un rol determinante desde la etapa de proyecto.



Figura 2.17. Fotografía de la Sala de Conciertos Christchurch de Nueva Zelanda. Extraída de Barron (2010).

La sala es considerada buena por su calidad acústica. Según Beranek, en el Christchurch el oyente se siente envuelto en un sonido formado por muchas reflexiones tempranas que se encuentran temporalmente muy cercanas entre sí (Beranek, 1996). En las salas tipo caja de zapatos la sensación de estar inmerso en el sonido está presente en toda la duración de las señales. En esta sala la sensación de estar rodeado por sonido queda acotada al ataque, al inicio de la señal.

## 6. LA ACÚSTICA DE SALAS A PARTIR DE LA DÉCADA DE 1980

En las últimas décadas del siglo XX coexistieron para el diseño de salas para música dos corrientes estético-arquitectónicas contrapuestas. Una pretendía ensamblar las teorías acústicas del momento con las nuevas corrientes de diseño, en las que la estética poseía una impronta muy fuerte. Los arquitectos Frank Gehry (1929- ) y Zaha Hadid (1950-2016), representantes de este grupo, proyectaron sus salas a partir de potentes planteos estéticos, dejando las consideraciones acústicas en segundo plano. La acústica debía acomodarse a la arquitectura. La otra escuela colocó, por el contrario, la acústica en primer lugar. Sus arquitectos volvieron a la caja de zapatos del siglo anterior y la modernizaron con la inclusión de dispositivos acústicos desarrollados a la luz de las nuevas teorías. Jean Nouvel (1945- ) y Renzo Piano (1937- ) fueron dos de los arquitectos adscriptos a esta corriente, y entre los diseñadores acústicos más destacados se puede citar a Cyril Harris (1917-2011) y a Frederick Russell Johnson (1923-2007).

Russell Johnson comenzó a trabajar en la firma Bolt, Beranek y Newmann, pero se separó tiempo después fundando el grupo ARTEC, desde donde comenzó a realizar sus diseños con una arquitectura de líneas simples en base al modelo de la caja de zapatos. En la década de 1980, Johnson y otros integrantes del grupo ARTEC, entre los que se encontraba Christopher Blair, tomaron las proporciones de las mejores salas para música del siglo XIX y reemplazaron la decoración interior de la época -estatuas, bajorrelieves, altorrelieves, nichos y casetonados- por elementos cuya imagen se correspondiera estéticamente con su tiempo. Siguiendo los trabajos de Schroeder ya vistos, Johnson y Blair aplicaron revestimientos difusores diseñados a partir del método de residuos cuadráticos y la teoría de fractales (ver la Figura 2.18). También incluyeron dispositivos de acústica variable, por ejemplo cámaras reverberantes acopladas y superficies reflectoras móviles, que permitían adecuar el comportamiento acústico a distintas formaciones instrumentales. Aunque el planteo era muy conservador desde la arquitectura, se mostró muy efectivo desde el punto de vista acústico.

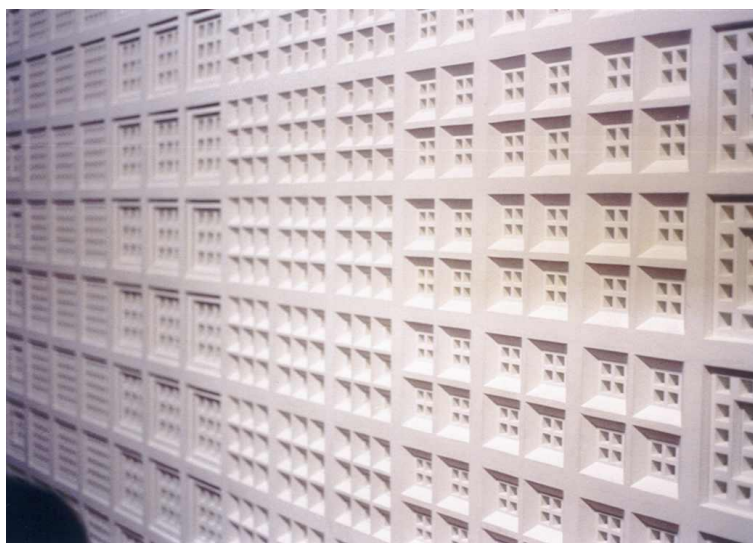


Figura 2.18. Difusor de diseño fractal para la sala KKL de Lucerna (Johnson, 1995).

Las cámaras reverberantes o acopladas eran recintos adicionales que, vinculados a la sala principal a través de compuertas, permitían modificar el volumen total del auditorio. Fueron utilizadas por primera vez en 1989 en el *Auditorio Eugene McDermott* de Dallas, Texas, y luego en la *Sala de Conciertos de Birmingham* en 1991. En la Figura 2.19 se pueden ver los volúmenes acoplados en algunas de estas salas con el fin de modificar la reverberación. Los proyectos con cámaras reverberantes necesitan espacios

acoplados a la sala principal y demandan, lógicamente, un mayor presupuesto de obra.<sup>10</sup> No sólo las cámaras tienen un costo elevado, sino también los cerramientos necesarios para vincular y desvincular de manera efectiva estos espacios.

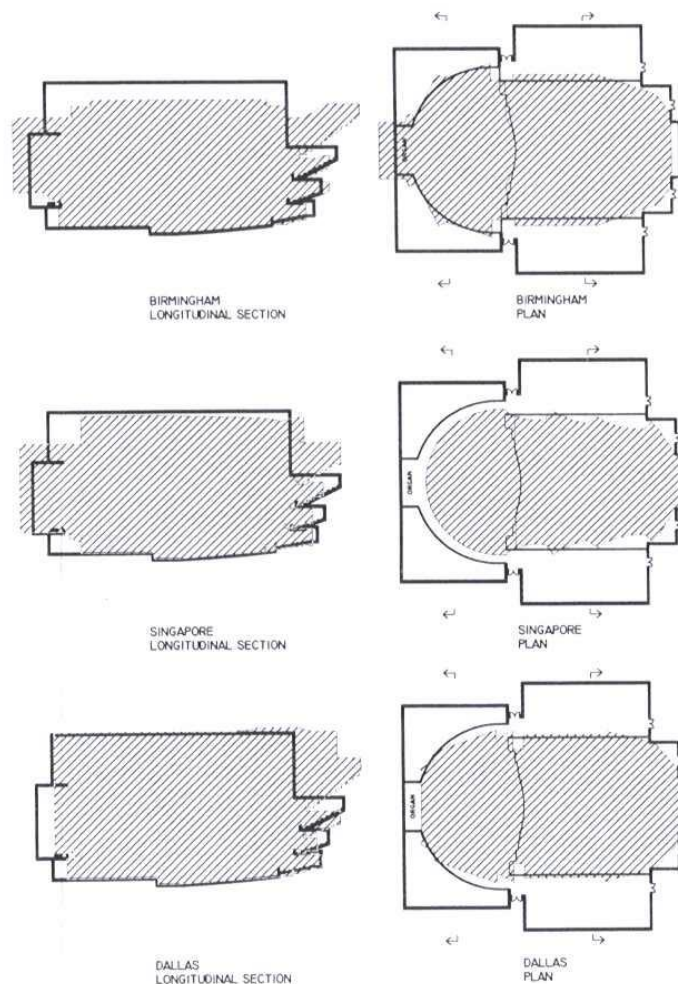


Figura 2.19. Cortes y plantas de tres auditorios con cámaras de reverberación acopladas en su etapa de proyecto (Johnson, et al., 1995).

<sup>10</sup> La conveniencia de emplear cámaras de reverberación ha sido cuestionada por muchos arquitectos y acústicos, principalmente por el gran costo adicional que implican. Su uso queda limitado a espacios donde se interpretan músicas con diferentes características pudiéndose tener, por ejemplo, un espacio menos reverberante para la ejecución de Mozart y otro con reverberación máxima para Mahler (Barron, 2010).



## DOS EJEMPLOS DE FINES DEL SIGLO XX

### SALA DE CONCIERTOS Y CONVENCIONES DE LUCERNA

Uno de los mejores ejemplos, en el que la combinación de todos los componentes de diseño de la época se utilizaron para lograr una sala de gran calidad acústica, es el de la Sala KKL de Lucerna. Farina comenta que “La delicada relación entre arquitectura y acústica alcanzó un hito trascendente cuando se unieron el arquitecto Jean Nouvel y el acústico Russell Johnson en el proyecto de la *Sala de Conciertos y Convenciones KKL* -Kultur und Kongresszentrum Luzern- en Lucerna, Suiza. Los autores trabajaron en forma conjunta en una sala que respondía tanto a las necesidades estéticas de Nouvel como a los requerimientos establecidos por Johnson. A la tipología arquitectónica de auditorio con forma de caja de zapatos le agregaron elementos de acústica de la última generación. La sala, que fue inaugurada en 1998, tiene una capacidad de 1.840 espectadores, con 4 niveles superiores que bordean el perímetro de la platea. La altura del cielorraso es importante, siendo sus proporciones 1:1:2. La sala tiene un volumen base de 17.823 m<sup>3</sup> y las cámaras reverberantes le añaden otros 6.189 m<sup>3</sup> (Farina, 2015).

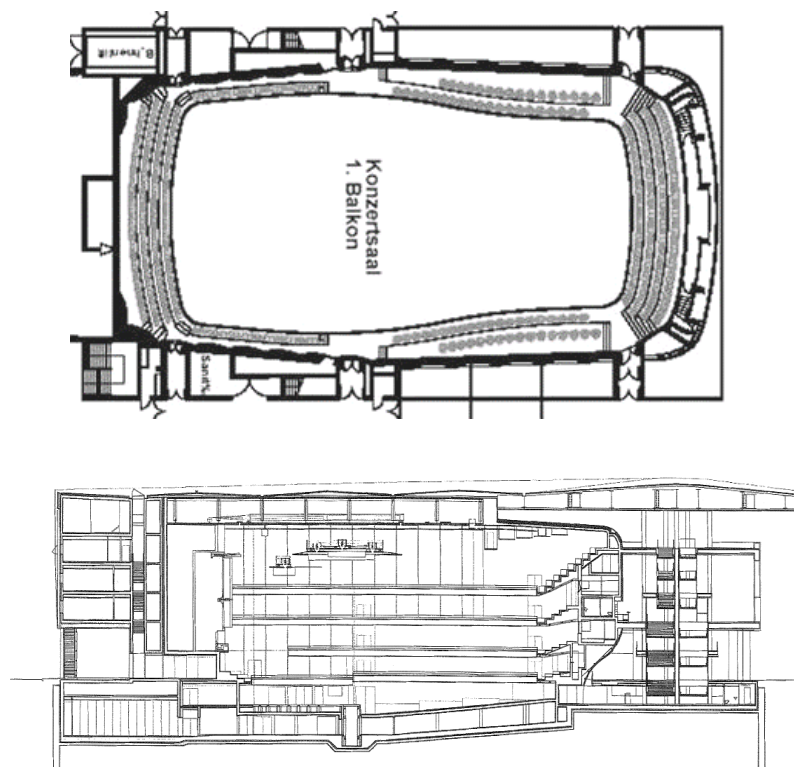


Figura 2.20. Planta y corte del KKL de Lucerna. Extraído de Futagawa (2006).

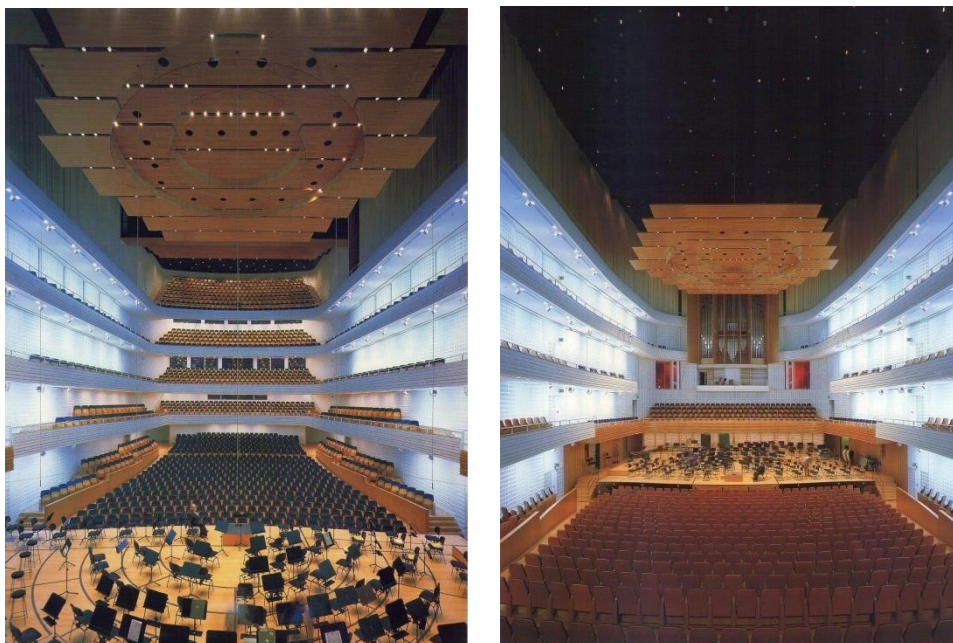


Figura 2.21 Fotografías interiores de la sala del KKL de Lucerna. Extraído de Futagawa (2006).

Todo fue cuidadosamente dispuesto para obtener en la platea la mayor cantidad de energía lateral posible: la forma de la sala; las reflexiones en las bandejas laterales que vuelven al público desde los costados; el revestimiento difusor en yeso inspirado en un diseño fractal y el gran reflector acústico móvil ubicado sobre la orquesta. Se agregaron, además, cámaras acopladas y dispositivos de acústica variable para ajuste de la reverberación (Figuras 2.20 y 2.21).

La concepción acústica de la obra satisface, con elementos de arquitectura moderna, los requerimientos acústicos característicos de las salas tipo caja de zapatos del siglo XIX.

#### **KIRISHIMA INTERNATIONAL CONCERT HALL**

A diferencia de Johnson y Nouvel, que buscaron replicar un modelo exitoso, el arquitecto Fumihiko Maki (1928 - ) y el asesor acústico Yoichi Ando (1964 - ) concibieron una sala de conciertos en la ciudad de Kirishima, Japón, en la que se optimizó el factor espacial a partir de un diseño no tradicional de la forma. La manera en la que están dispuestas y moduladas las paredes interiores y la fragmentación del plano del cielorraso aumentan la cantidad de energía decorrelacionada que llega a la audiencia, incrementando el factor de espacialidad. “El objetivo fue maximizar la cantidad de energía que llega a la platea desde direcciones laterales, a efectos de obtener valores mínimos de IACC” (Ando, 1998).

A partir de la teoría de Schroeder, Ando diseñó paneles difusores que recubren por completa las paredes laterales para aumentar la sensación de estar envuelto en sonido y evitar el corrimiento lateral de la imagen de la fuente sonora (Figuras 2.22 y 2.23).

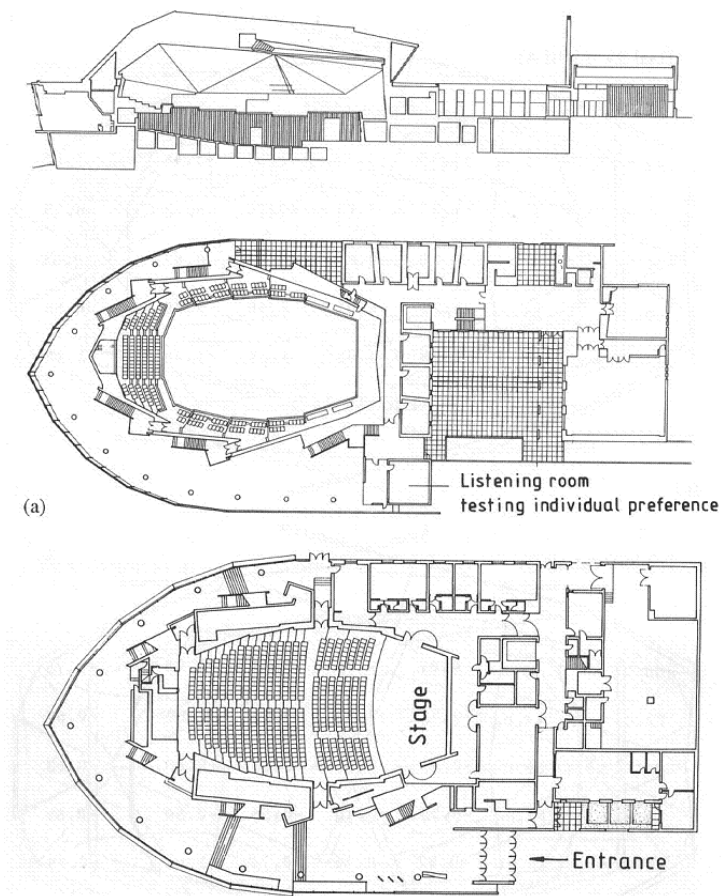


Figura 2.22. Corte y plantas y de la sala de Kirishima. Extraído de Ando (1998).



Figura 2.23. Fotografía de la Sala de Conciertos de Kirishima. Extraída de Ando y Cariani (2009).

La Sala de Kirishima fue inaugurada en julio de 1994 con muy buena aceptación por parte de los músicos, la crítica y el público.

## 7. EL SIGLO XXI

En las últimas décadas del siglo XX, con el desarrollo de las teorías espaciales y la aparición de los modelos digitales de simulación acústica, se produjo un reencuentro entre la arquitectura y la música. El regreso crítico y creativo a las tipologías del pasado permitió la construcción de algunos espacios de calidad para la representación musical.

El desafío planteado para la etapa que sigue se orienta a independizar la calidad acústica de la adscripción obligatoria a las tipologías tradicionales. Un posible camino consiste en crear campos acústicos de calidad al margen de la forma y del estilo arquitectónico propuesto en cada caso. El desarrollo de nuevos modelos teóricos permitirá, suponemos, pensar la acústica en función de premisas musicales, no geométricas, y trazar a continuación la arquitectura que mejor se le adapte. La sala, diseñada desde este origen acústico/musical, se convertiría en el resultado de lo que uno desea oír, en la proyección de una imagen interior preexistente. Esta tesis presenta una propuesta de diseño en línea con esta última tendencia.

### **PROPUESTA TEÓRICA DESARROLLADA EN ESTA TESIS**

En línea con la corriente que propone diseñar los campos acústicos desde su función acústico/musical y construir, a partir de allí, el espacio arquitectónico, esta tesis plantea la posibilidad teórica de crear un espacio acústico de gran presencia sonora, especialmente en los sonidos débiles, y una amplia sensación de “inmersión” por parte de los espectadores, manteniendo los valores estándar que definen la calidad acústica (reverberación, textura, claridad, ensamble, etc.). Aunque todas las regiones temporales de la señal recibida por cada uno de los oyentes son contempladas y resultan significativas desde el punto de vista perceptual, la parte clave del planteo radica en el tratamiento del campo acústico temprano, dentro de los 200 ms después de la llegada de la señal directa desde la fuente.

Las salas diseñadas a partir de esta propuesta deberían dar respuesta a la actual naturalización de la compresión dinámica, al aumentar efectivamente la sonoridad relativa de las señales en los pasajes más débiles.

La teoría base combina tres conceptos principales:

1. El aumento de la sonoridad percibida por los espectadores a partir de un diseño del campo temprano, que privilegia un arreglo de reflexiones en el límite de Haas provenientes de direcciones específicas.
2. El diseño del campo acústico global con un decaimiento a pendientes múltiples. Este patrón temporal, no sabiniano, permite desarmar la correlación inversa entre reverberación y claridad característica de las teorías tradicionales.
3. El desarrollo de un sistema de evaluación de campos acústicos en base a modelos digitales creados *ad-hoc* para cada espacio.

En la Parte II de esta tesis se exponen dos ejemplos en los que se puede apreciar la aplicación concreta de la propuesta teórica enunciada.

**REFERENCIAS**

- Ando, Yoichi (1998). *Architectural Acoustics. Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. New York: Springer Verlag.
- Ando, Yoichi y otros (1997). "Acoustic Design of a Concert Hall Applying the Theory of Subjective Preference, and the Acoustic Measurement after Construction". *Acustica & Acta Acustica*, 83, pp. 635-643.
- Ando, Yoichi y Cariani, Peter (2009). *Auditory and Visual Sensations*. Londres: Springer.
- Barron, Michael (1981). "Spatial Impression due to Early Lateral Reflections in Concert Halls: The Derivation of a Physical Measure". *J. Sound and Vibration*, 77 (2), pp. 211- 232.
- Barron, Michael (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. New York: Spon Press; 2 edition.
- Basso, Gustavo (2006). *Percepción Auditiva*. Colección Música y Ciencia. Bernal: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes. Segunda edición año 2009.
- Basso, Gustavo (2009). "La percepción espacial del ambiente acústico". *Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética*. Colección Música y Ciencia. Bernal: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
- Beranek, Leo (1996). *Concert Halls and opera houses: How they sound*. New York: Acoustical Society of America.
- Beranek, Leo (2003). "Subjective Rank-orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls". *Acta Acustica*, 89, pp. 494-508.
- Cox, Trevor y D'Antonio, Peter (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. Boca Raton: CRC Press.
- Farina, M. Andrea (2015). *Determinación de la calidad acústica de salas para música a partir de las tipologías arquitectónicas*. Tesis de Doctorado. Bernal: Universidad Nacional de Quilmes - Departamento DE Ciencias Sociales
- Franklin, William (1903). "Derivation of Equation of Decaying Sound in a Room and Definition of Open Window Equivalent of Absorbing Power". *Physical Review*, 16 (6). pp. 372-374.
- Futagawa, Yukio (2006). *Contemporary Architecture: Theatre*. Tokio: ADA Editors
- Johnson, Russell (1995). "Variable coupled volume for music performance". Ando, Yoichi (ed.). *Music and Concert Hall Acoustics*. London: Academic Press Limited.
- Kuhl, Walter (1954). "Über Versuche zur ermittlung der Gunstigsten Nachhallzeit Grossen Musikstudios". *Acustica*, 4, pp. 618-634.
- Marshall, Harold (1967). "A note on the importance of room crosssection in concert halls". *J. Sound Vib*, 5, pp.100-112.
- Sabine, Wallace Clement (1922). *Collected Papers on Acoustics*. London: Cambridge/Harvard university press.
- Schoroeder, M., Gottlob, D. y Siebrasse, F. (1974). "Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters". *Journal of the Acoustical Society of America*, 56, pp. 1195-1201.

- Schroeder, Manfred (1979). “Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion”. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65, pp. 958-963.

## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

### RESUMEN

Aunque el contenido de este capítulo también podría ser considerado parte del estado del arte de esta tesis, consideramos adecuado separarlo del anterior porque abarca conceptos teóricos íntimamente relacionados con su desarrollo y que requirieron tratamientos especiales. Aquí se describen formalmente y en detalle la mayor parte de las teorías y modelos que fundamentan la presente tesis. Para facilitar la articulación entre algunos modelos y su reelaboración en el marco de la propuesta, ciertos desarrollos teóricos específicos se incluyen en los capítulos de la Parte II, dedicados a los estudios de caso. La lista de parámetros físicos y perceptuales que figuran en este capítulo sirve también de referencia, a modo de glosario, para la lectura comprensiva de los capítulos que siguen.

### 1. INTRODUCCIÓN

La acústica moderna abarca un universo multidisciplinario que incluye, entre otras disciplinas, la física y psicología de la percepción. Aunque en ambas ciencias se definen modelos específicos de funcionamiento, en cada caso las características y leyes marco son muy diferentes. En la física los modelos son definidos matemáticamente y su validez se contrasta mediante pruebas experimentales en las que la teoría de la medición juega un rol central. En el caso de la psicología de la percepción, los modelos son contrastados a través de encuestas individuales que son luego analizadas estadísticamente.

El gran desafío de la acústica musical contemporánea consiste en hallar los vínculos que relacionan ambos universos de manera consistente. En esencia, se trata de explicar cómo se debe configurar un campo acústico para obtener una representación mental determinada. La dificultad aparece cuando se considera que el vínculo entre el estímulo físico y la respuesta perceptual no es lineal y que está condicionado por una gran cantidad de factores contextuales. El nicho cultural del oyente, su pasado remoto y su pasado inmediato, su experiencia y competencia musical, y una gran cantidad de factores conexos condicionan los resultados de las pruebas experimentales.

En el caso particular de la acústica de salas para música, se han creado una serie de modelos para explicar el comportamiento de la interfaz física/percepción. Los que vamos utilizar en esta tesis, como el Efecto de Precedencia o Efecto Haas, la Perspectiva Auditiva, la Calidad Acústica, la Caracterización de la Sonoridad y la Teoría de la Reverberación, están descritos con cierto detalle en este capítulo.



Los modelos, tanto físicos como perceptuales, se valen de parámetros para caracterizar sus variables. En este capítulo se van a describir formalmente sólo los que se van a usar en los estudios de caso de la Parte II de la tesis.

Los parámetros físicos se agruparon de la siguiente manera:

- Parámetros temporales: detallan el comportamiento de las señales acústicas físicas en el tiempo. Por ejemplo, el Tiempo de Reverberación (TR, T30) y la Reverberación Temprana (EDT).
- Razones de energía: comparan la energía de dos porciones de una señal acústica. Por ejemplo, la Claridad ( $C_{80}$ ,  $C_{50}$ ), la Definición ( $D_{50}$ ) y el Centro del Tiempo ( $T_s$ ).
- Parámetros espaciales: describen la distribución de la energía acústica en el espacio. Por ejemplo, la Fracción de Energía Lateral (LF) y el Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural (IACC).
- Parámetros espectrales. Describen el balance entre regiones de frecuencias. Por ejemplo, la Razón para Bajas Frecuencias (BR).
- Niveles de energía globales: determinan la cantidad de energía total de un evento. Por ejemplo, el Nivel de Presión Sonora ( $L_p$ ) y el Nivel Sonoro Normalizado (G).
- Parámetros físicos de escenario: describen el campo acústico del escenario, percibido por los músicos. Por ejemplo, el Factor de Soporte (ST1) y el Nivel de ensamble temprano (EEL).

Por su parte, los parámetros acústicos perceptuales, o rasgos perceptuales, permiten caracterizar la respuesta de los oyentes ante un estímulo físico y se obtienen a partir de encuestas de opinión que son tratadas estadísticamente. En el final del capítulo se describen la Claridad Perceptual, la Plenitud de Sonido, la Vivacidad, la Definición Perceptual y la Sensación de Inmersión

El Equipo de Investigación en Acústica del IPEAL/FBA desarrolló o describió a través de publicaciones especializadas algunos de estos parámetros. Tal como ocurre con el Capítulo 2, estos temas también fueron desarrollados extensamente en la tesis doctoral de la Dra. M. Andrea Farina (2015) bajo mi dirección.

## 2. EL EFECTO DE PRECEDENCIA O EFECTO HAAS

Albert Bregman llamó *análisis auditivo de escenas* al proceso que permite reunir en una unidad perceptiva el conjunto de datos provenientes de una fuente acústica externa (Bregman, 1994). Una *fente acústica* es una entidad física que genera ondas en el aire.

Un *agregado auditivo* es un percepto causado por un grupo de elementos sonoros que se experimenta como un todo y que parece emanar de una única fuente acústica externa. Normalmente, las propiedades emergentes que definen cada agregado están correlacionadas con las propiedades de los objetos físicos asociados.

Resulta interesante comparar las estrategias de agrupamiento y segregación de datos que operan en los sentidos de la visión y de la audición. Existe una diferencia crucial en el modo en que usamos la energía acústica y la lumínica para obtener información del mundo exterior. Cuando analizamos auditivamente un espacio hacemos uso de la energía emitida por ciertos objetos físicos (las fuentes acústicas) y casi no tomamos en cuenta la energía reflejada en otros objetos físicos. En una situación normal existe la misma cantidad de agregados auditivos, que podríamos denominar también objetos sonoros, y de fuentes acústicas físicas. Las reflexiones –que cambian en función del contexto espacial– degradan la información que nos llega de cada una de las fuentes. En consecuencia necesitamos atenuar la información que llega por reflexión y colocar en primer plano la que nos llega directamente (en una sala de conciertos situamos auditivamente el piano en el escenario, aun cuando gran parte de su energía nos llega por reflexión desde las paredes y el cielorraso de la sala). Por el contrario, la información visual está causada principalmente por la reflexión de la luz en los objetos de interés. Encendemos una lámpara no porque nos interese mirarla, sino para ver por reflexión los objetos de la sala. A diferencia de la gran cantidad de fuentes acústicas que nos acompañan desde siempre, hubo una sola fuente de luz a la vez a lo largo de gran parte de nuestro recorrido evolutivo. En resumen, los datos auditivos y visuales son diferentes y se complementan para brindarnos un panorama verosímil del mundo exterior.

Las características acústicas del ambiente, que pueden tomar la forma de reflexiones discriminables o de reverberación difusa, pueden percibirse separadas de la fuente acústica o pueden integrarse alterando de algún modo su calidad sonora. El efecto de precedencia describe las circunstancias que determinan la emergencia de cada una de estas dos alternativas.

Hans Wallach y Helmut Hass investigaron lo que ocurre al intentar localizar la ubicación de una fuente acústica en una sala reverberante donde la mayor parte de la energía proviene de reflexiones (Wallach, 1949; Hass, 1951). El *efecto de precedencia*, o *efecto Hass* establece, entre otras cosas, que dos sonidos sucesivos se perciben como uno sólo si el intervalo temporal entre ellos es lo suficientemente corto. Si esto sucede el

sonido resultante de la fusión se ubica espacialmente en la locación correspondiente a la del sonido individual que llega primero.<sup>11</sup>

Los resultados de los trabajos de Wallach y Hass pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

- Dos sonidos sucesivos se perciben como uno sólo si el intervalo temporal entre ellos es lo suficientemente corto. El límite superior es de 5 ms para clics y de 40 ms para sonidos de carácter complejo, como palabra y música.
- Cuando ocurre lo anterior, la locación de la fuente está determinada por la del primer sonido. Este fenómeno se denomina *efecto de precedencia*, o *efecto Hass*.
- El efecto de precedencia aparece sólo para sonidos de carácter discontinuo o transitorio.
- El segundo estímulo puede tener alguna influencia en la localización de la fuente (su máximo aporte es un cambio de 7° en la localización aparente).
- Si el intervalo entre estímulos es de 1 ms o menor, el efecto de precedencia no actúa; se obtiene algún tipo de compromiso entre las ubicaciones espaciales de las dos fuentes. Este hecho se denomina “suma de locaciones” (Blauert, 1997).
- Si el estímulo retrasado es lo suficiente intenso, entre 10 y 15 dB por encima del primero, el efecto no ocurre.
- Se asume corrientemente que el efecto trabaja más efectivamente cuando ambos estímulos se parecen. Divenyi demostró, sin embargo, que las diferencias espectrales no cuentan si se mantiene la envolvente temporal (Divenyi, 1992), Esta conclusión es razonable, pues las reflexiones pueden modificar el espectro de la señal por distorsión armónica.
- El efecto es más notorio en el plano horizontal, aunque también aparece en el plano medio.
- El efecto de precedencia puede tomar algún tiempo en aparecer (muy importante en grandes salas e iglesias).
- Ciertas modificaciones en las condiciones acústicas del ambiente pueden destruir temporariamente el efecto de precedencia.

---

<sup>11</sup> (Basso, 2006 y 2009).

- La habilidad para detectar cambios en el intervalo temporal del estímulo retrasado puede mejorar notablemente con la práctica.

El efecto de precedencia no involucra una completa supresión de la información que contienen las reflexiones. El oyente puede distinguir cualitativamente cualquier cambio en el patrón temporal de los estímulos. Es más, este patrón aporta información sobre la sala y la posición de los objetos y superficies dentro de ella. Parece que los posibles “ecos” son suprimidos después de haber sido evaluados como consistentes con las expectativas del oyente en relación con la fuente acústica y al ambiente. Cuando ocurre un cambio inesperado, la máscara del efecto de precedencia puede retirarse momentáneamente. De acuerdo con los estudios modernos en psicología de la percepción y neurobiología, el efecto de precedencia aparece en un nivel relativamente alto del proceso cognitivo.

En el gráfico de la Figura 3.1 se puede ver con claridad la región de validez del efecto de precedencia con relación a la intensidad y el retardo de las reflexiones.

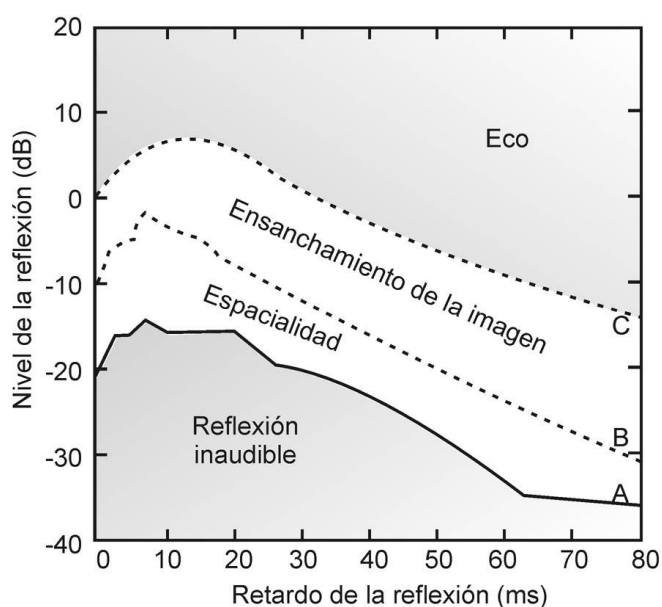


Figura 3.1. Región de validez del efecto de precedencia (Basso, 2009).

En la región superior del gráfico de la Figura 3.1 las reflexiones superan los límites del efecto de precedencia –llegan muy retrasadas o con demasiada intensidad con relación a la señal directa– y se las percibe como ecos aislados, en la parte intermedia las reflexiones aportan información del entorno acústico en la forma de ensanchamiento de la imagen auditiva o de sensación de espacialidad, y en la región inferior las reflexiones se vuelven inaudibles. Cuando las reflexiones poseen retardos iguales o menores a 1

ms aparece el fenómeno de *filtro en peine*, que se oye como una especie de coloración espectral.<sup>12</sup>

El efecto de precedencia se usa, entre otras aplicaciones, para preservar la localización espacial de la fuente física cuando se emplean varios altavoces separados por distancias significativas.

En la teoría que sustenta esta tesis se plantea que disponer de una gran cantidad de reflexiones tempranas, provenientes en su mayoría de superficies laterales, dentro del límite superior de Haas, aumenta la sonoridad, la presencia y la sensación de inmersión en el sonido percibido por el público. Este resultado se obtiene sin modificar la cantidad de energía emitida por los instrumentos que, en grandes espacios, es de una densidad muy baja. Dicho en otras palabras, la energía generada por una flauta se tiene que repartir entre la totalidad de las butacas de la sala. Como resulta imposible aumentar la potencia de la flauta sin amplificarla, a cada una de ellas le llega una cantidad mínima y el sonido se percibe débil y sin presencia. La estrategia propuesta consiste en modificar la estructura espacio-temporal de las señales que reciben los oyentes con el propósito de aumentar la sonoridad, presencia e inmersión percibidas.

### **PERSPECTIVA AUDITIVA**

La perspectiva auditiva, al igual que su contraparte visual, es una importante fuente de información ambiental. Por ejemplo, el *ancho acústico aparente* de una orquesta sinfónica, muy grande en las primeras butacas de la platea, disminuye a unos pocos grados al oírla a 300 m de distancia en un parque.<sup>13</sup> El efecto es equivalente al efecto visual de las líneas paralelas que convergen en el infinito. Si continuamos desarrollando la analogía con el sentido de la vista, se podría decir que la sonoridad disminuye con la distancia tal como ocurre con el tamaño aparente de los objetos y que la definición tímbrica se atenúa de modo similar al gradiente de color en la visión. La distancia aparente de la fuente acústica que define la *perspectiva auditiva* compone una importante dimensión psicoacústica, aunque no siempre es reconocida como tal. Los investigadores que desarrollan dispositivos acústicos para cine y sistemas multimedia han concentrado gran parte de su interés en el perfeccionamiento de modelos virtuales de perspectiva auditiva.

---

<sup>12</sup> *Comb filter* en inglés (Basso: 2001 a).

<sup>13</sup> El parámetro perceptual empleado en acústica de salas se denomina “ancho aparente de la fuente” (AWS), bien correlacionado con el parámetro físico Espacialidad (1-IACC) como veremos más adelante.

En el dominio de la audición la *constancia de la sonoridad* funciona de modo análogo a la constancia de tamaño para sentido de la vista. Si una fuente acústica de intensidad constante se aleja de nosotros, la intensidad física que nos llega disminuye proporcionalmente con el cuadrado de la distancia. No debe sorprendernos entonces que una fuente cuya intensidad decrece parezca alejarse. Sin embargo, también podemos experimentar la sensación de oír una fuente acústica que disminuye de intensidad sin alejarse –un instrumento musical en *decrescendo*–, cuyo equivalente en el campo visual podría ser un globo que se desinfla.

La Figura 3.2 sintetiza los trabajos de John Chowning a partir de una gran cantidad de experimentos sobre la perspectiva auditiva (Chowning, 1999). Representa una generalización del cambio de la composición espectral de una señal de banda ancha en función de la altura tonal, la dinámica y la distancia. A causa de la gran cantidad de dimensiones necesarias para describir los datos físicos se han incluido espacios bidimensionales (espectros de potencia) dentro de un espacio tridimensional cerrado.

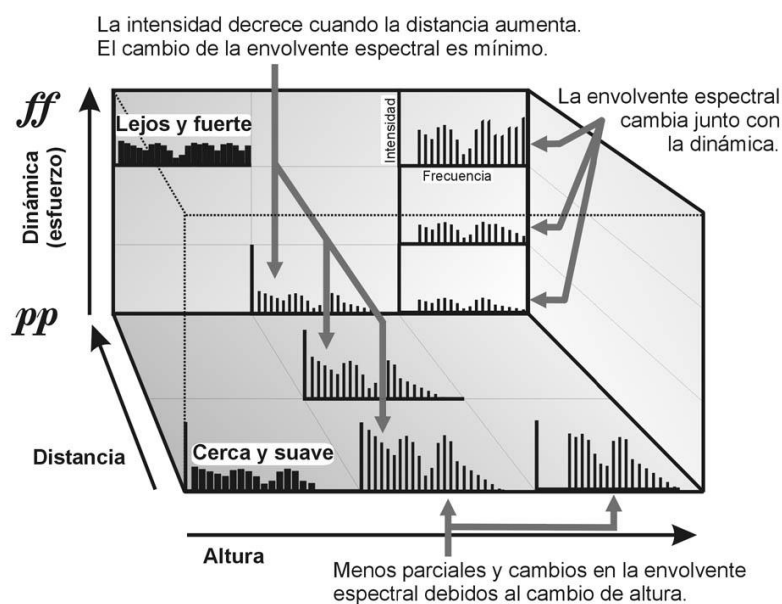


Figura 3.2. Relaciones espacio distancia-intensidad-frecuencia según Chowning.

Una fuente de información adicional sobre la distancia aparente de la fuente la proporciona la *reverberación* del recinto. La percepción de la reverberación de un campo acústico se puede considerar un caso especial de integración auditiva. El tiempo de reverberación de un espacio –abierto o cerrado– aporta información sobre sus características generales: materiales, forma, volumen, distancia a la que se encuentra la fuente acústica, etc. La relación entre la intensidad de la onda directa y de la

reverberación es interpretada por el oyente como un índice de distancia. En un espacio cerrado típico la intensidad del campo reverberante no varía con la distancia a la fuente, mientras que el sonido directo sí lo hace. Sabemos, por experiencias previas, que el nivel del campo reverberante depende de la intensidad de la fuente que lo excita y usamos este conocimiento para evaluar la intensidad y distancia de las fuentes acústicas en recintos cerrados (Basso, 2006).

El manejo adecuado de la perspectiva acústica juega un papel destacado en la teoría propuesta en esta tesis. La combinación específica de los valores que la definen, a partir de una distribución espacio temporal de la energía temprana dentro del límite superior de Haas y una estructura temporal tardía (reverberación) a pendientes múltiples, permite distribuir de modo equilibrado en el espacio los valores de sonoridad, presencia e inmersión percibidos por el público. En otras palabras, las diferencias entre los sonidos percibidos por un oyente ubicado en una butaca alejada y en otra cercana al escenario serían mucho menos pronunciadas que en una sala tradicional.

### 3. CALIDAD ACÚSTICA

La *calidad acústica* de una sala para música constituye un juicio de valor estético que se construye a través del tiempo a partir de las opiniones de los oyentes y que, como tal, no se puede determinar mediante mediciones físicas. Se la obtiene a partir de encuestas de opinión que son luego analizadas estadísticamente. Como todo juicio de valor estético, depende del contexto cultural específico que se considere, es diferente en diferentes tiempos y lugares y, aún para una misma comunidad, se modifica con el tiempo en función de los cambios en los modos de audición, de la circulación del material musical, de la aparición de nuevos géneros y estilos, y de una gran cantidad de factores específicos que actúan en ese nicho cultural concreto.

Desde los comienzos de la disciplina, uno de los mayores anhelos de la ciencia acústica fue encontrar vínculos entre la calidad acústica de un ámbito y sus características arquitectónicas (físicas). De encontrarse, permitiría concebir un espacio concreto, construirlo, y obtener el resultado musical esperado. Dada la relevancia del tema, numerosos investigadores han buscado alguna correlación entre las medidas físicas y las valoraciones perceptuales. Entre ellos se destacan Yoichi Ando y Leo Beranek, quienes desarrollaron modelos de calidad acústica en base a algunos de los parámetros físicos preexistentes (Beranek, 1996; Ando, 1998).

Beranek comparó los resultados de los juicios sobre la calidad acústica, obtenidos a partir de encuestas sobre la calidad acústica de una gran cantidad de teatros y auditorios

en el mundo, con los valores de los parámetros físicos medidos en los mismos lugares. Luego de un cuidadoso análisis estadístico multidimensional, seleccionó los que parecían independientes entre sí y elaboró un método que permite clasificar la calidad acústica de una sala a partir de los datos físicos. Definió el *Índice de calidad acústica* AQI en base a seis parámetros independientes entre sí y lo testeó con los datos documentados en la bibliografía de referencia (Beranek, 1996 y 2004).

Los seis parámetros acústicos independientes que se usan para calcular el AQI son (las definiciones se encuentran más adelante en este capítulo):

- Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural (IACC)
- Retardo de la Primera Reflexión (ITDG)
- Nivel Sonoro Normalizado ( $G_{mid}$ )
- Tiempo de Reverberación Temprano (EDT)
- Razón de Baja Frecuencia (BR)
- Índice de Difusividad de las Superficies (SDI)

En los cuadros de doble entrada de la Figura 3.3 se muestran los valores de los componentes  $S_i$  en función de los valores de los parámetros acústicos físicos. El AQI es la suma de los componentes  $S_i$ .

$$AQI = \sum_{i=1}^6 S_i$$

La condición ideal le asigna el valor cero a cada componente  $S_i$ . El índice AQI se obtiene a partir de la sumatoria de los seis valores y si el valor final se acerca a 0 significa que la calidad acústica es alta.



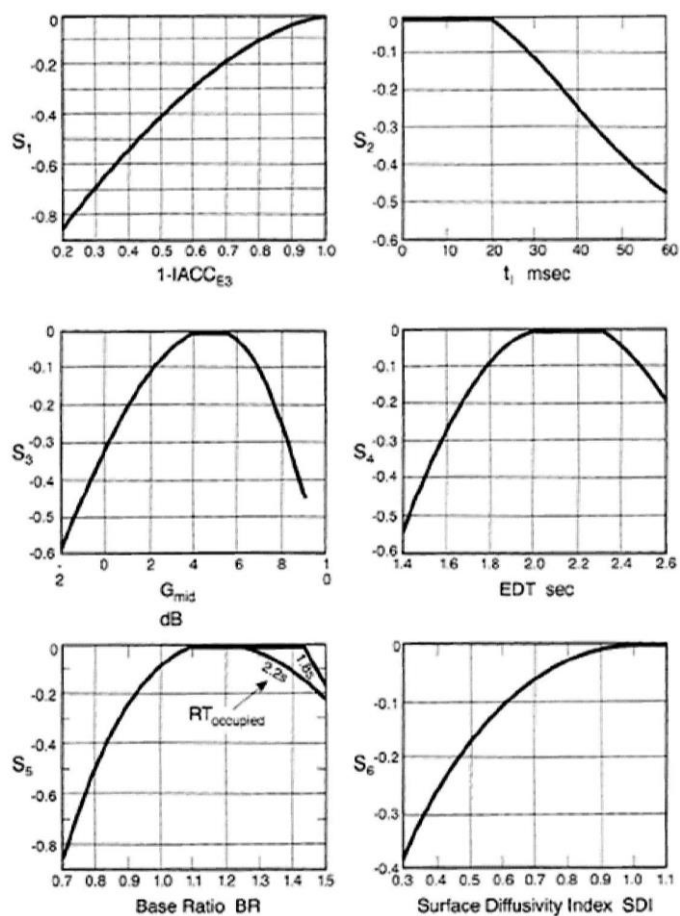


Figura 3.3. Valores prefijados para los parámetros acústicos que permiten determinar el índice de calidad de una sala (Beranek, 1996).

Beranek construyó una escala en base a los valores de AQI de cada auditorio que iba de “malo” a “uno de los mejores” y clasificó a medio centenar de teatros y auditorios del mundo a partir del juicio de músicos reconocidos (Hidaka y Beranek, 2000; Beranek, 2003).<sup>14</sup>

En esta tesis hemos utilizado el método de Beranek para evaluar la calidad acústica a partir de parámetros acústicos físicos en salas existentes y en salas en fase de proyecto. Aunque somos conscientes de la limitación del método (Canalis, 2008) y de su polarización hacia determinados géneros y estéticas musicales, creemos que es la mejor herramienta que se ha desarrollado a la fecha.

<sup>14</sup> Como dato significativo para nuestro país y la región, el Teatro Colón de Buenos Aires se ubicó en primer lugar entre los teatros de ópera y en tercer lugar entre los auditorios para música sinfónica.

#### 4. CARACTERIZACIÓN DE LA SONORIDAD

La Sonoridad es, en parte, el correlato perceptual del parámetro físico Nivel Sonoro. En relación al tema de este trabajo, se verifica empíricamente que si dos salas son de idénticas dimensiones y ambas tienen el mismo número de oyentes, el sonido será más sonoro en una sala reverberante y menos sonoro en una sala seca. La calidad acústica de una sala está relacionada con su respuesta dinámica, que supone mantener muy débiles los *pp* y alcanzar potentes *ff*. Los *ff* de gran energía son posibles sólo si las salas no son excesivamente grandes y tienen poca absorción.

La sonoridad en un recinto queda definida por cuatro variables arquitectónicas:

1. La distancia a la fuente. A medida que aumenta la distancia entre el oyente y los músicos en el escenario, menor es la sonoridad.
2. La existencia de superficies reflectoras. Las superficies que reflejan energía temprana hacia los oyentes, en especial las que provienen de los laterales de la sala, incrementan la sonoridad-.
3. El volumen del espacio. Los grandes volúmenes disminuyen la sonoridad.
4. La absorción acústica. Las superficies de gran tamaño tratadas con materiales absorbentes también reducen la sonoridad (Beranek, 2004).

Casi todos los parámetros físicos relacionados con la sonoridad percibida por los oyentes se basan en dos modelos históricos. El *Nivel de Presión Sonora* (NPS), fundado en las leyes psicoacústicas de Weber y Fechner, define la unidad decibel (dB) y se puede calcular con la expresión (1).

$$NPS = 20 \log \frac{p}{p_{ref}} [dB]; \quad p_{ref} = 20 \mu Pa \quad (1)$$

En la que  $p$  es la presión acústica medida y  $p_{ref}$  es una presión de referencia, igual al umbral de audición a una frecuencia de 1.000 Hz en condiciones de laboratorio.

Algunos investigadores, a su vez, sugieren que la sonoridad puede ser descripta aproximadamente con una unidad perceptual (*son*), para niveles que superen los 40 dB, con la expresión (2).

$$Sonoridad = \left( \frac{p}{100 p_{ref}} \right)^{0,6} [sones] \quad (2)$$

Si se comparan las expresiones (1) y (2) se ve claramente que la unidad de medida utilizada en las normas dadas en decibelios no representa de manera adecuada la sonoridad realmente percibida (Krumshansl, 1990).

Además de lo anterior, se sabe que la evaluación del Nivel de Presión Sonora en dB no contempla más que la adición logarítmica de los distintos componentes de un espectro. Para ruidos de gran ancho de banda y espectro continuo, un decibelímetro da una idea bastante acabada, una vez hecha la conversión a sonos, de la sonoridad asociada a esa señal. Sin embargo, cuando la señal está formada por una cantidad de componentes discretos o de banda angosta, como ocurre con el material musical, la adición logarítmica deja de ser válida.

Una *banda crítica* es el intervalo de frecuencias en el que la respuesta perceptual ante un estímulo cambia abruptamente. Posee un ancho de banda del 15 % al 20 % de la frecuencia del centro de la banda, que en notación musical equivale aproximadamente a una distancia de tercera menor (Plomp, 1976). Si dos estímulos simultáneos caen dentro de la misma banda crítica, la sensación de sonoridad depende de la cantidad total de energía recibida en dicha banda: las intensidades de los estímulos se suman y el resultado es bien representado por una relación logarítmica como el decibel. Pero, para estímulos que llegan a distintas bandas críticas bien separadas, la contribución a la sonoridad total de cada una de ellas es independiente a la de las otras. Fuera del intervalo correspondiente a una banda crítica, las sonoridades se suman algebraicamente.

Por ejemplo, dos sinusoides de 300 Hz y 330 Hz de igual intensidad, equivalentes a un nivel de 73 dB y a una sonoridad de 13 sonos cada una, al caer dentro de una misma banda crítica suman logarítmicamente sus niveles y alcanzan juntas un nivel de 76 dB, alrededor de 16 sonos. Si, en cambio, las dos sinusoides caen en distintas bandas críticas, digamos 300 Hz y 550 Hz, se suman las sonoridades y el resultado total es de 26 sonos. Aunque en ambas situaciones un decibelímetro hubiera indicado lo mismo, el resultado perceptual es mucho mayor en el segundo caso y queda claro que la medición realizada en dB no describe adecuadamente la respuesta. Una situación más general, en la que se barren las diferencias en frecuencias entre el unísono (igualdad de frecuencias) y la doble octava (cuadruplicación de la frecuencia más baja) se puede ver en la Figura 3.4.

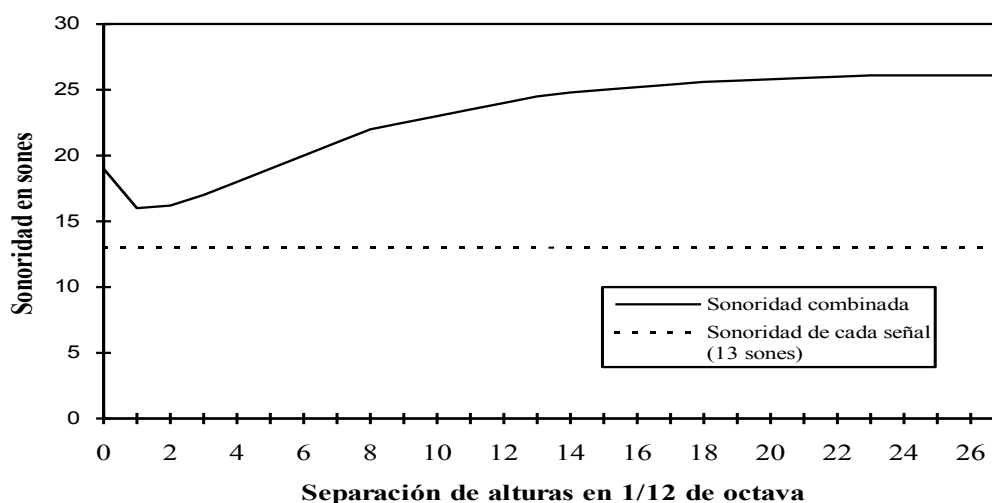


Figura 3.4. Sonoridad combinada de dos sinusoides de 13 sonos cada una. La frecuencia de la menor es de 300 Hz (Basso, 1994). El aumento de la sonoridad dentro del primer semitono de separación se debe a los efectos del batido entre las dos ondas.

El aumento de la sonoridad como consecuencia de una redistribución espectral de la energía es de gran importancia en la teoría propuesta en esta tesis, pues permite aumentar la sonoridad percibida por el público al operar sobre el ancho de banda y el espectro de frecuencias de las reflexiones tempranas. Se completa de este modo el modelo del límite da Haas, que únicamente establece intensidades y retardos, con la información espectral indispensable para nuestra propuesta teórica.

## 5. TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN Y PARÁMETROS TEMPORALES

### TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN DE SABINE

Tal como se pudo ver en el Capítulo 2, Sabine consideró que la Calidad Acústica de una sala depende de tres factores independientes entre sí: la *sonoridad*, el *balance* y la *reverberación* (Sabine, 1922). Eligió desarrollar en profundidad el último de ellos y definió un parámetro, el *Tiempo de Reverberación* (TR), que pondera el tiempo que tarda el sonido en extinguirse cuando cesa la fuente que lo emite.

El Tiempo de Reverberación es el tiempo, medido en segundos, que tarda la energía acústica de una sala en disminuir 60 dB a partir del valor existente al interrumpirse la fuente de señal. Se lo describe en función de la frecuencia (en bandas de octava o de 1/3 de octava), aunque se toma el TR correspondiente a 500 Hz o 1.000 Hz cuando se consigna un solo valor.

Las hipótesis de Sabine fueron demostradas al poco tiempo por William Franklin, al aplicarlas a un recinto con un campo sonoro difuso determinado por una distribución uniforme del material absorbente (Franklin, 1903).

El modelo de Sabine parte de considerar que la intensidad del sonido decrece siguiendo una ley exponencial:

$$e^{-kt} \quad (3)$$

En la que:

$k$  es la constante de amortiguamiento característica de cada local.

$t$  es el tiempo expresado en segundos transcurridos a partir del cese de la emisión de la fuente.

Si la intensidad de emisión inicial es  $I_0$ , al cabo de un tiempo  $t$  la intensidad remanente será:

$$I(t) = I_0 e^{-kt} \quad (4)$$

En la Figura 3.5 se pueden ver dos ejemplos de decaimiento exponencial de la presión sonora, uno teórico y otro medido en una sala real.

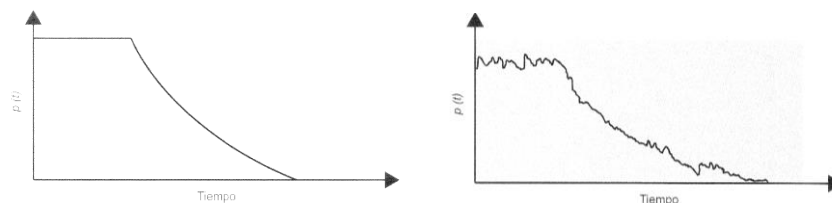


Figura 3.5. Decaimiento exponencial teórico del nivel de presión sonora en una sala ideal de alta difusión (izquierda) y medido en una sala real de difusión media (derecha).

El tiempo  $t$  que tarda la intensidad  $I(t)$  en caer a una millonésima parte de la intensidad de emisión  $I_0$  ( $10^{-6}$  de  $I_0$ , equivalente a una disminución de 60 dB) define Tiempo de Reverberación.

La teoría estadística de la reverberación necesita definir el *Camino Libre Medio* (CLM), que es la distancia media recorrida por las ondas entre sucesivas reflexiones (Arau, 1999). El CLM depende, en principio, de la forma y el tamaño del local.

El número de reflexiones que la onda realiza por segundo es igual a la distancia que recorre en 1 s dividida por la distancia media entre dos reflexiones, el CLM. En la deducción experimental de su teoría, Sabine no habló del CLM, pero demostró de

manera implícita que su valor era  $4V/S$ , siendo  $V$  el volumen del recinto y  $S$  la suma de las superficies interiores.

El número de reflexiones  $M$  en 1 s será la distancia recorrida en ese tiempo (la velocidad del sonido  $c$  multiplicada por  $t = 1$  s) dividida por el CLM:

$$M = c t / CLM = c t / \frac{4V}{S} = \frac{c S}{4V} \quad (5)$$

En la que:

$$CLM = 4 V / S$$

$$C = \text{velocidad del sonido (344 m/s)}$$

No todas las geometrías verifican la condición estadística del CLM de Sabine. Sin embargo, sí la cumplen las salas estándar con forma de paralelepípedo en las que ninguna dimensión supera ampliamente a las otras dos. No se la puede aplicar a salas muy largas y angostas o con cielorrasos muy bajos. Una condición necesaria para que el cálculo anterior de la cantidad de reflexiones por segundo  $M$  sea válido es que los coeficientes de absorción de las distintas superficies sean parecidos y de bajo valor. Después de Sabine otros autores propusieron nuevas teorías que intentaron superar estas limitaciones.

La absorción acústica de una superficie se puede expresar en función de sus coeficientes de absorción. El *coeficiente de absorción*  $\alpha$  relaciona la energía absorbida  $E_a$  con la energía incidente  $E_i$  en una superficie límite:

$$\alpha = E_a / E_i \quad (6)$$

En la Figura 3.6 se puede ver cómo se descompone la energía incidente al encontrarse con una superficie límite.

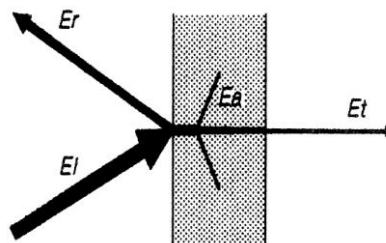


Figura 3.6. Reflexión, absorción y transmisión de sonido:  $E_i$ : energía incidente,  $E_r$ : energía reflejada,  $E_a$ : energía absorbida y  $E_t$ : energía transmitida (Méndez et al., 1994).

En teoría, el coeficiente de absorción puede tomar valores entre 0 y 1. Cero en una superficie perfectamente reflejante como un piso de mármol pulido y uno, por ejemplo, en una ventana abierta. En la práctica la situación es bastante más compleja ya que, por efectos de la difracción de borde, una ventana abierta puede presentar un valor de  $\alpha$  mayor a 1.

En cada reflexión la onda acústica pierde  $(1 - \alpha)$  de su energía. Resulta sencillo calcular la cantidad  $N$  de reflexiones necesarias para que la intensidad de la señal se reduzca a una millonésima parte de su valor inicial (o  $10^{-6}$ ), tal como definió Sabine para el TR.

$$I_{(TR)} / I_0 = 10^{-6} = (1 - \alpha)^N \quad (7)$$

La ecuación (7) supone una absorción pareja en todas las superficies interiores. Como en la práctica esto no ocurre, Sabine definió un coeficiente de absorción promedio  $\bar{\alpha}$ :

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad (8)$$

En la que:

$(\alpha_1 \dots \alpha_n)$  son los coeficientes de absorción de cada superficie individual.

$(S_1 \dots S_n)$  son las superficies que corresponden a cada material con coeficientes de absorción  $(\alpha_1 \dots \alpha_n)$ .

$S = \sum_{i=1}^n S_i$  es la superficie total en el interior del recinto.

Como  $M$  es el número de reflexiones que ocurren en 1 segundo y  $N$  el número total de reflexiones necesarias para que la energía decaiga a  $10^{-6}$  de su valor inicial -condición de Sabine-, el TR se puede obtener de la siguiente expresión:

$$TR = N / M \quad (9)$$

Reemplazando (4) (5) (7) y (8) en (9) se llega a la célebre fórmula de Sabine para el TR medido en segundos:

$$TR = \frac{0,16 V}{S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3 \dots + S_n \alpha_n} \quad (10)$$

Que se puede resumir en:

$$TR = \frac{0,16 V}{S \bar{\alpha}} \quad (11)$$

Esta fórmula es, aún hoy, la más utilizada en el diseño estándar de una sala. Y se la emplea como una primera aproximación estadística en los proyectos más elaborados que incluyen simulaciones digitales o numéricas.

### DEPENDENCIA ESPECTRAL

La ecuación (11) permite calcular el TR a una única frecuencia. Como la absorción de los materiales varía según la frecuencia con la que se los excita, el TR también depende de la frecuencia. El coeficiente de absorción de cada material se mide en laboratorios, por lo general en cámaras reverberantes o en tubos de onda estacionaria, y sus valores se presentan en tablas o en gráficos como el de la Figura 3.7.

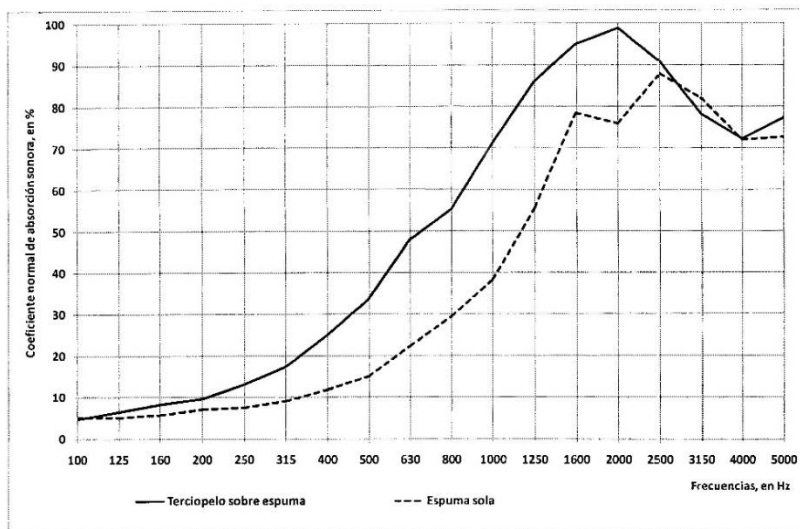


Figura 3.7. Coeficiente de absorción de un material poroso expresado en forma gráfica - Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).

Al ser los materiales dependientes de la frecuencia, el TR también lo es (Figura 3.8).

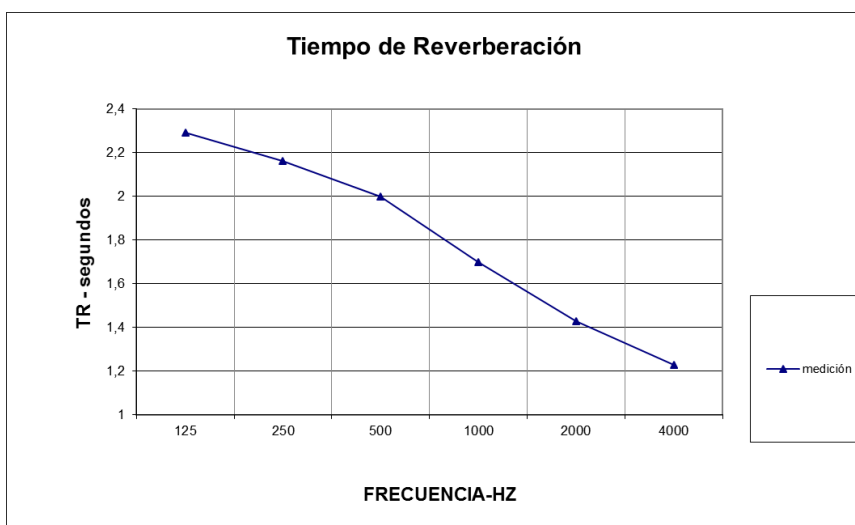


Figura 3.8. TR medido en bandas de octava entre 125 Hz y 4000 Hz en el Teatro Colón de Buenos Aires por el equipo de investigación en acústica de la FBA/UNLP en el año 2009.



### CORRECCIÓN DEBIDA A LA ABSORCIÓN DEL AIRE

El modelo base de Sabine considera que la absorción de la energía sólo se produce en las superficies límite. Pero la onda acústica también pierde energía durante su propagación en el aire. La disipación energética que experimenta la señal en el aire resulta significativa en recintos de un volumen superior a 4000 m<sup>3</sup>, en especial a frecuencias entre 2000 Hz y 4000 Hz.

El coeficiente de atenuación del aire  $m$  depende de la humedad y de la temperatura. Según Kinsler su valor es (Kinsler, 1980):

$$m = 5.5 * 10^{-4} \left[ \frac{50}{h} \right] \left[ \frac{f}{1000} \right]^{1.7} \quad (12)$$

$h$  es la humedad relativa del aire expresada en %

$m$  se expresa en m<sup>-1</sup>

La absorción debida al aire se calcula con el término  $4mV$  y se suma a la absorción  $A$  en las fórmulas de reverberación. Por ejemplo, el denominador de la expresión de Sabine pasa de  $[S\bar{\alpha}]$  a  $[S\bar{\alpha} + 4mV]$  y el de Eyring, que veremos en el apartado que sigue, de  $[-S \ln(1 - \bar{\alpha})]$  a  $[-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV]$ .

Se observa que la absorción del aire depende del volumen de la sala y del coeficiente de absorción  $\bar{\alpha}$  promedio. Si el valor de  $\bar{\alpha}$  es muy grande no es necesario considerar esta absorción. Sin embargo, en una sala de gran tamaño y poca absorción interior su efecto resulta significativo. La absorción del aire debe tenerse en cuenta en espectáculos amplificados al aire libre, sobre todo cuando los espectadores se encuentran a gran distancia de los altavoces.

### CRÍTICAS A LA TEORÍA DE SABINE

La crítica teórica más significativa a la teoría de Sabine fue realizada por Carl Eyring muy poco tiempo después de su publicación y va a ser analizada en detalle más adelante. Eyring corrigió una inconsistencia física del planteo de Sabine cuando se lo aplica a espacios con gran cantidad de absorción acústica.

Otros autores cuestionaron su deducción del Camino Libre Medio, pues la expresión  $4V/S$  sólo es válida para una geometría esférica y no resulta aplicable sin error a otras formas geométricas, como cubos y paralelepípedos, precisamente las que usamos como espacios habitables.

También se cuestionó la necesidad de mantener una gran homogeneidad espacial en la distribución del material absorbente y lograr una difusión pareja de la energía acústica. Las salas reales no son homogéneas -el público ocupa sólo el plano inferior- y la difusión dista mucho de ser perfecta.

Las dos objeciones que siguen están directamente relacionadas con este trabajo. Una parte sustancial de la propuesta de la tesis se sustenta en las respuestas que proponemos para resolverlas.

3. La teoría de Sabine exige un decrecimiento perfectamente exponencial de la energía acústica. Este comportamiento del campo acústico sólo permite considerar dos polos contrapuestos: un campo muy reverberante y de escasa claridad o un campo muy claro y de escasa reverberación. Suponer campos acústicos exponenciales por tramos o no exponenciales permite sortear esta lógica binaria y obtener a la vez claridad y reverberación. La propuesta que presentamos en esta tesis sigue este último enfoque.
4. La adopción de un sólo valor de CLM, cualquiera sea su método de cálculo, es válida únicamente en la parte del campo sonoro en la que la densidad de reflexiones es muy grande y que, por lo tanto, puede ser tratado estadísticamente. Pero en el campo acústico temprano, con una baja densidad de reflexiones, es imposible definir un CLM y se impone un análisis determinista muy cuidadoso.<sup>15</sup> La respuesta que proponemos para resolver este dilema consiste en construir campos acústicos a pendientes múltiples con tratamientos formales diferenciados por regiones.

### **SALAS A VARIAS PENDIENTES**

Las objeciones anteriores son de enorme importancia para el diseño de una sala para música. La relación entre el tiempo de reverberación TR y la Claridad C80, en un campo sabiniano exponencial, es lineal e inversamente proporcional (Figura 3.9.). Si el decrecimiento exponencial de la energía fuese un hecho, sería imposible alcanzar una sala que a la vez tenga un tiempo de reverberación elevado y muy buena claridad.

---

<sup>15</sup> En el Capítulo 2, Figura 2.2<sub>1</sub>, se pudo apreciar la diferencia entre la zona de las primeras reflexiones (determinista) y la de reverberación sabiniana (estadística).

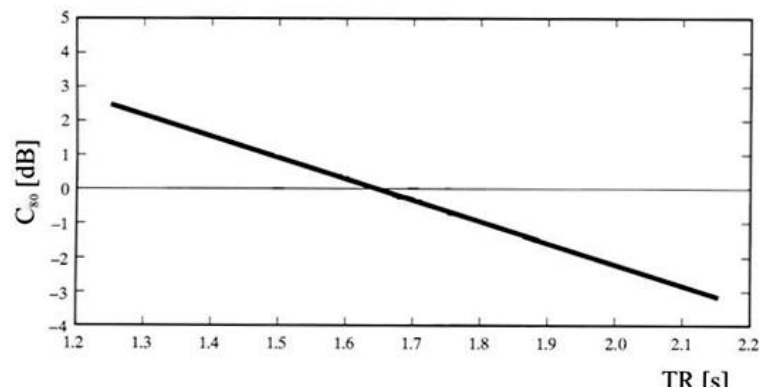


Figura 3.9. La Claridad a 80 ms ( $C_{80}$ ) y el TR presentan una curva de regresión absolutamente lineal en el modelo de Sabine.

Sin embargo, las mejores salas del mundo presentan simultáneamente ambas características, quebrando la relación lineal definida en el modelo exponencial de Sabine (Figura 3.10).

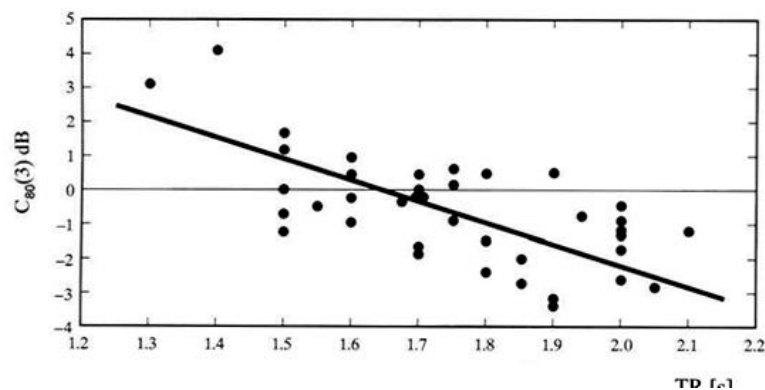


Figura 3.10. Relación no lineal entre la Claridad a 80 ms ( $C_{80}$ ) y el TR en salas reales. Cada punto representa una sala diferente.

De acuerdo a la teoría clásica, resulta imposible lograr la claridad necesaria para distinguir los menores detalles e inflexiones de la música y mantener, al mismo tiempo, una reverberación acorde a lo que solicitan los músicos (Johnson *et al.*, 1995). Para música sinfónica, los directores de orquesta consideran que el TR óptimo es de aproximadamente 2,1 s a 1.000 Hz. Pero, según la teoría de Sabine, para lograr una claridad satisfactoria los auditorios no deberían superar un TR de 1,6 s. Una posible respuesta a este dilema la ofrecen los campos no exponenciales (no sabinianos) pero ¿cómo controlarlos?

Russell Johnson desarrolló en la década de 1980 una estrategia que permite usar de manera controlada un campo no exponencial. Propuso incorporar volúmenes reverberantes acoplados al ambiente principal y denominó a estos espacios compuestos *salas a pendientes múltiples* (Johnson, *op.cit.*). Los volúmenes acoplados permiten variar la pendiente de la reverberación -por ejemplo, la duración del decaimiento tardío puede ser mayor que la del temprano-, desplazar temporalmente las transiciones en la curva de decaimiento y controlar los niveles sonoros relativos -si se prolonga la energía de la reverberación tardía aumenta la sonoridad percibida en la sala-. Por otro lado, al demorarse la aparición de la reverberación tardía, aumenta la definición de los ataques y la claridad. En la Figura 3.11 se puede ver el gráfico temporal tomado en la platea de una sala a tres pendientes -es interesante compararlo con el de la figura 3.5 en el que se muestra el de una sala a pendiente única que cumple con la teoría de Sabine-.

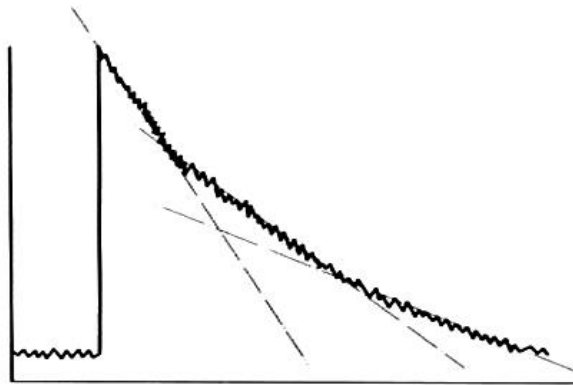


Figura 3.11. Decaimiento a pendientes múltiples (Johnson et al., 1995).

Cada composición y estilo musical presenta demandas específicas del campo acústico y por eso se determinan en la literatura especializada, según el tipo de música, valores diferentes para los parámetros físicos relevantes. En las salas a pendientes múltiples la acústica interior puede adaptarse a las características de la música variando la geometría y, en consecuencia, la estructura temporal del campo acústico. Por lo general, el sonido en las salas con cámaras acopladas posee excelente reverberación y los grupos instrumentales se perciben con claridad. La obra de Johnson vinculó eficazmente todos los antecedentes relacionados en su época con calidad acústica: los trabajos de Sabine, la historia de la tipología caja de zapatos, los desarrollos teóricos de Schroeder en la década de 1970 y el desarrollo teórico posterior al fracaso de Beranek en el Philharmonic Hall.

### OTRAS TEORÍAS DE LA REVERBERACIÓN

En lo que sigue resumiremos algunas de las teorías que, sin llegar a cuestionar el fondo del planteo de Sabine, corrigen o complementan algunas de las dificultades mencionadas. Sólo describiremos sintéticamente las de mayor importancia histórica y práctica.<sup>16</sup>

#### TEORÍA DE EYRING Y NORRIS

Si se analiza con el modelo de Sabine, un local cuyas superficies presentan absorción total ( $\bar{\alpha} = 1$ ) el TR calculado no llega a 0 s, como sería de esperar en tal situación. Entre 1930 y 1932, Eyring y Norris desarrollaron en forma independiente una teoría de la reverberación apta para ser aplicada a salas con una elevada absorción (Eyring, 1930; Norris, 1932). Partieron, como Sabine, de la existencia de un campo difuso, con el material absorbente distribuido de forma uniforme, y adoptaron el CLM de Sabine ( $4V/S$ ).

Consideraron una señal de intensidad  $I_0$  que cesa súbitamente y que se refleja sobre diversas superficies cuyo coeficiente de reflexión medio  $r_m$  es:

$$r_m = 1 - \bar{\alpha}$$

al cabo de  $N$  reflexiones la intensidad será:

$$I_{(t)} = I_0 (1 - \bar{\alpha}) (1 - \bar{\alpha}) (1 - \bar{\alpha}) \dots = I_0 (1 - \bar{\alpha})^N \quad (13)$$

De (5), el número de reflexiones  $M$  que suceden en 1 segundo es  $\frac{c S}{4 V}$  ( $c$  = velocidad del sonido). El número de reflexiones  $N$  que ocurren durante el Tiempo de Reverberación (TR) es, entonces:

$$N = M TR = \frac{c S TR}{4 V} \quad (14)$$

Al cabo de ese tiempo TR la intensidad será:

$$I_{(t)} = \frac{I_0}{10^6} \quad (15)$$

Combinando (13), (14) y (15) queda:

---

<sup>16</sup> Existen otras teorías de la reverberación, como las de Gomperts (1965), Kosten (1965 y 1966) y Wernly (1978), pero no son relevantes para este trabajo.

$$I_{(t)} = I_0 (1 - \bar{\alpha})^N = \frac{I}{10^6} = I_0 (1 - \bar{\alpha})^{\frac{cSTR}{4V}} \quad (16)$$

Despejando de (14), el TR queda:

$$TR = \frac{-0,16 V}{S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (17)$$

Expresión conocida como la fórmula de Eyring y Norris. La absorción  $A$  (valor de absorción en  $m^2$ ) es obtenida a través del logaritmo natural del complemento del coeficiente de absorción promedio:

$$A = -S \ln(1 - \bar{\alpha})$$

$$\frac{A}{S} = -\ln(1 - \bar{\alpha})$$

En este caso el valor del coeficiente de absorción promedio  $\bar{\alpha}$ , a diferencia del definido por Sabine, puede ser mayor a la unidad. Sin embargo, cuando la absorción promedio en el recinto es pequeña ( $\bar{\alpha} < 0.3$ ), los coeficientes de Sabine y de Eyring y Norris son aproximadamente iguales.

En resumen, la ecuación de Eyring y Norris extiende la validez del método de Sabine para casos con altos valores de absorción. Si la absorción es total, la reverberación llega a cero, un resultado consistente con el balance de energía del sistema.

Como en el caso del modelo de Sabine, el planteo de Eyring y Norris requiere que las distintas superficies que intervienen en las sucesivas reflexiones posean coeficientes de absorción iguales o muy parecidos entre sí. De lo contrario, la utilización de un coeficiente de absorción medio puede conducir a resultados que difieren mucho de la realidad física.

### TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN DE MILLINGTON Y SETTE

Para solucionar este inconveniente, G. Millington y W. H. Sette elaboraron, a principios de la década de 1930, una teoría de la reverberación que contemplaba el reparto asimétrico de la absorción, aunque mantuvieron sin modificar la hipótesis sabiniana del campo difuso (Millington, 1932; Sette, 1933).

La fórmula que desarrollaron supone que cada superficie posee su propio coeficiente de absorción y conserva las modificaciones introducidas por Eyring y Norris.:

$$TR = \frac{-0,16 V}{S_1 \ln(1 - \alpha_1) + S_2 \ln(1 - \alpha_2) + S_3 \ln(1 - \alpha_3)} \quad (18)$$

La diferencia entre la fórmula anterior y la de Eyring y Norris surge de la forma de calcular el valor medio de la absorción. En la fórmula de Millington y Sette la absorción  $A$  se divide en tantos términos como superficies diferentes existan en el recinto.

#### **DIFERENCIAS ENTRE LOS MODELOS DE SABINE, EYRING Y MILLINGTON**

La absorción continua que requiere el cálculo de Sabine implica un reparto homogéneo de los materiales absorbentes, con un coeficiente de absorción de valor bajo (hasta 0,25) para que la extinción lenta permita una distribución uniforme de la energía sonora.

El coeficiente de absorción medio que utiliza Eyring para su fórmula también requiere una absorción uniforme, pero admite grandes valores de absorción.

El concepto de probabilidad que introduce Millington en su deducción condiciona la reflexión al tamaño de la superficie. Lo importante ya no es la uniformidad de los absorbentes sino que las superficies sean lo suficientemente grandes como para posibilitar la correcta reflexión de todas las longitudes de onda.

Las tres teorías analizadas suponen la existencia de una buena difusión sonora, que equivale a decir que la extinción sonora se produce por múltiples reflexiones al azar en todas las direcciones posibles. Todas consideran que el valor del TR es independiente de la posición de la fuente de sonido y de la posición relativa de los materiales absorbentes.

#### **TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN DE FITZROY**

En 1959 Dariel Fitzroy, al observar que las fórmulas clásicas del Tiempo de Reverberación conducían a discrepancias con los resultados experimentales cuando se las aplicaba a salas no estándar, en las que una dimensión es muy diferente a las otras dos, ensayó una fórmula empírica que dio resultados adecuados al aplicarse en salas rectangulares y de altura constante (Fitzroy, 1959). Consideró la reverberación dividida en los tres ejes coordenados ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) y analizó el decaimiento en cada modo normal:

$$TR = \left(\frac{S_x}{S}\right) \left[\frac{0.16V}{-S \ln(1-\bar{\alpha}_x)}\right] + \left(\frac{S_y}{S}\right) \left[\frac{0.16V}{-S \ln(1-\bar{\alpha}_y)}\right] + \left(\frac{S_z}{S}\right) \left[\frac{0.16V}{-S \ln(1-\bar{\alpha}_z)}\right] \quad (19)$$

El TR total es igual a la media aritmética ponderada de los TRs en cada dirección. El análisis de Fitzroy expresa la posibilidad de que el campo acústico no se comporte de manera exponencial si la sala no tiene proporciones estándar.

Cuando  $\bar{\alpha}_x \cong \bar{\alpha}_y \cong \bar{\alpha}_z$  la relación (19) deviene en la (17), la fórmula de Eyring y Norris. Si además los valores de  $\bar{\alpha}$  son inferiores a 0,3 e iguales o prácticamente iguales entre sí, se obtiene la fórmula de Sabine:

$$\frac{\bar{\alpha}_x}{s_x} \cong -\ln(1 - \bar{\alpha}_x) \cong \bar{\alpha}_x \quad (20)$$

El modelo de Fitzroy permite separar los componentes por geometría y por absorción, obteniendo tres pendientes diferentes de decaimiento de la energía. Si existiese una distribución uniforme de material absorbente en una sala de geometría estándar, la curva de reverberación presentaría sólo la pendiente exponencial definida por Sabine.

#### **TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN DE PUJOLLE**

En 1970, Jean Pujolle planteó que el Tiempo de Reverberación depende también de la geometría de espacio. El Camino Libre Medio, por lo tanto, debería variar en función de la forma de la sala y no permanecer constante como en las teorías precedentes (Pujolle, 1975). Llegó a la siguiente relación, que es válida para una distribución uniforme de material absorbente en la sala:

$$TR = \frac{0.0406 l_m}{-1n(1-\bar{\alpha})} \quad (21)$$

El CLM  $l_m$  tiene que ser definido según la geometría de cada sala. La fórmula de Pujolle necesita que se resuelva geoméricamente cada espacio antes de ser aplicada.

#### **TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN DE KUTTRUFF**

Heinrich Kuttruff propuso una teoría en la cual el CLM se basa en distribuciones estadísticas de variables aleatorias gaussianas que siguen la ley de probabilidad de Rayleigh (Kuttruff, 1991).

Tanto la teoría de Pujolle como la de Kuttruff consideran un campo difuso y no son válidas, en consecuencia, para distribuciones de absorción no uniforme. Además, todas estas fórmulas incluyen valores de coeficientes de absorción  $\alpha$  que deben ser medidos en laboratorio según la teoría que corresponda en cada caso para que resulten válidos -no es posible usar los valores estándar, medidos según la teoría de Sabine-.

#### **TEORÍA DE LA REVERBERACIÓN DE ARAU**

En 1988, Higinio Arau desarrolló una teoría que contempla la distribución no uniforme del material absorbente y cuyo CLM no es el clásico  $4V/S$ . Postula un campo acústico con varias pendientes de decaimiento. Para una sala rectangular existen como mínimo tres pendientes: la razón de decaimiento inicial, la razón de decaimiento medio y la razón de decaimiento final. Cuando las superficies del recinto tienen distinta absorción, la energía reflejada en ellas posee también tasas de decaimiento diferente y la distribución de la energía no resulta homogénea (Arau, 1999).



Lo más interesante del planteo de Arau, que lo convierte en uno de los más eficaces de todos los métodos estadísticos, es que la absorción efectiva de cada superficie depende tanto del valor de absorción clásico como del ángulo de incidencia de la onda sonora. En una sala real los ángulos de incidencia son variables y la superficie absorbente más importante, el público, casi nunca se presenta de manera perpendicular a la dirección de propagación. El método de Arau fue empleado para verificar, en la etapa de anteproyecto, la reverberación de la Sala Sinfónica de la Usina del Arte, el segundo de los estudios de caso de esta tesis.

### **REVERBERACIÓN TEMPRANA (EDT)**

Hacia el año 1965, Atal, Schroeder y Sessler descubrieron que existía una gran correlación entre el tiempo de reverberación temprano, tomado en los primeros 160 ms de la señal, y la reverberación perceptual que distinguen los oyentes. En 1970, Jordan definió la Reverberación Temprana como el tiempo, expresado en segundos, que tarda la energía acústica de una sala en caer los primeros 10 dB desde el valor existente al interrumpirse la fuente de señal, multiplicado por 6 (Atal, 1965; Jordan, 1970). Este parámetro se relaciona significativamente con el comportamiento de las primeras reflexiones en un recinto.

En una sala con buena difusión sonora -donde las reflexiones se producen al azar en todas las direcciones- y distribución uniforme de la absorción, si la caída del nivel de presión sonora es exponencial, no debería haber diferencia entre los valores de TR y EDT. Pero en las salas en las que la distribución de la absorción no es uniforme, o en recintos acoplados con características acústicas muy diferentes entre sí, los valores de TR y EDT no son por lo general coincidentes.

La Reverberación Temprana EDT se correlaciona mejor que el Tiempo de Reverberación clásico TR con la impresión perceptual de la reverberación.

### **RETARDO DE LA PRIMERA REFLEXIÓN (ITDG<sub>1</sub>)**

Este parámetro fue creado en 1962 por Beranek, quien lo definió como el tiempo que transcurre entre la llegada del sonido directo y la primera reflexión destacada. El ITDG<sub>1</sub> se relaciona con la intimidad sonora e indica el grado de proximidad percibida entre el oyente y la fuente acústica (Beranek, 1962).

El ITDG<sub>1</sub> se mide a partir de la respuesta al impulso de la sala y el valor óptimo varía según el autor que se considere. Para Arau, por ejemplo, conviene que sea inferior a 20 ms, admitiendo como máximo un valor de 40 ms (Arau, 1996).

## RETARDO DE LA REFLEXIÓN PRINCIPAL (ITDG<sub>2</sub>)

Ando propone en el año 1983 un concepto fundamental para su *Teoría de la Preferencia Subjetiva*, el Retardo de la Reflexión Principal (ITDG<sub>2</sub>), definido como el tiempo que transcurre entre la llegada del sonido directo y la reflexión más significativa. La definición de reflexión significativa es contextual y se la contrasta con la función de autocorrelación de la señal musical que constituye la base de la teoría de Ando. La definió como la reflexión que se ubica en el baricentro de todas las reflexiones posteriores (Ando, 1983).

En una sala muy seca, con un bajo TR, esta reflexión puede ser muy pequeña. En cambio, si la sala es viva o tiene algún reflector cercano al escenario, puede llegar a igualar el nivel del sonido directo.

## 6. PARÁMETROS ESPACIALES

La localización de una fuente acústica en el espacio puede pensarse como si la fuente de sonido se ubicara en un punto de la superficie de una esfera cuyo centro es la cabeza del oyente. El espacio tridimensional queda entonces delimitado por una esfera integrada por los planos frontal, horizontal y medio que corresponden a las secciones ortogonales, como se observa en la Figura 3.12.

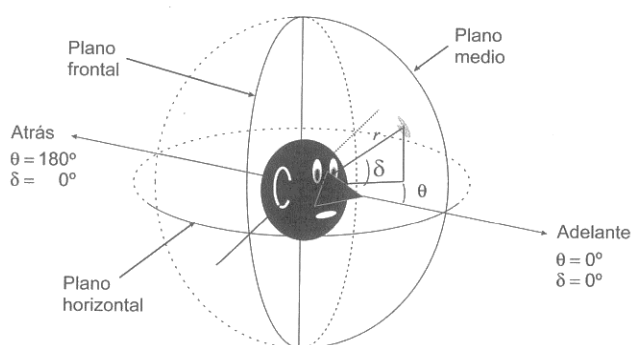


Figura 3.12. Espacio tridimensional en coordenadas polares.

De todos los parámetros que se han propuesto para evaluar la distribución espacial de la energía que llega a un oyente, dos de los más comunes son la *Fracción Lateral de Energía* (LE) y el *Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural* (IACC). Los hemos utilizado en los estudios de caso de esta Tesis para una primera aproximación general. Para los análisis más detallados, sin embargo, se estudia cada reflexión de acuerdo a su dirección de llegada desde el espacio tridimensional definido en la Figura 3.12. Un ejemplo de esta clase de análisis se puede ver en la Figura 3.13.

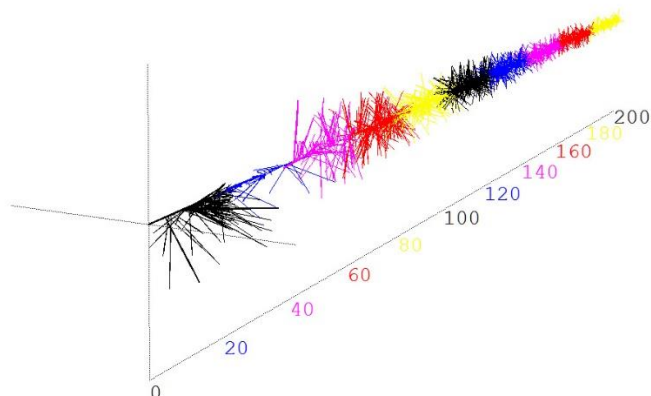


Figura 3.13. Análisis de las direcciones de llegada de las reflexiones en el espacio tridimensional. Primeros 200 ms en un punto de la platea de la Usina del Arte (Software Catt-Acoustics V9).

### FRACCIÓN LATERAL DE ENERGÍA (LE)

Michael Barron definió en 1981 la *Fracción Lateral de Energía* (LF) como la razón entre la energía lateral temprana y la energía temprana total. Es un parámetro monofónico que compara la salida de un micrófono con diagrama en forma de 8 ( $h_8^2(t)$ ) con la de un micrófono omnidireccional ( $h^2(t)$ ) (Barron, 1981).

$$LE = \left[ \frac{\int_{0,005}^{0,08} h_8^2(t) dt}{\int_0^{0,08} h_0^2(t) dt} \right] 100\% \quad (22)$$

$h_8(t)$  es la respuesta al impulso de un micrófono cuya directividad posee lóbulos en forma de 8 dispuestos en el plano horizontal para ofrecer la máxima sensibilidad a la energía lateral ( $90^\circ$  y  $270^\circ$ ).

$h_0(t)$  es la respuesta al impulso de un micrófono omnidireccional ubicado en el mismo lugar que el anterior.

El límite inferior de integración del numerador se ajusta a 5 ms para evitar cualquier fracción de sonido directo ( $0^\circ$ ) que pudiese tomar el micrófono en 8.

Algunos autores sugieren una modificación en la ecuación (22) ya que se supone que la impresión espacial perceptual varía con el coseno del ángulo horizontal, mientras que la ecuación es función del cuadrado del coseno: el numerador debería estar constituido por el producto de las respuestas de ambos micrófonos antes que por el cuadrado de la respuesta del micrófono en 8 (Basso, 1998).



Figura 3.14. Fotografía de la disposición de los micrófonos para la medición de Fracción Lateral de Energía. Sistema IADAE. Teatro Colón de la ciudad de Buenos Aires, 28 de junio de 2006.

El parámetro físico LE se vincula con el rasgo perceptual que define el Ancho Perceptual de la Fuente.

#### COEFICIENTE DE CORRELACIÓN CRUZADA INTERAURAL (IACC)

Schroeder y su equipo propusieron la utilización de un parámetro físico binaural, el *Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural* (IACC), como criterio para evaluar el factor espacial en el interior de una sala (Schroeder *et al.*, 1974).

La dedujo a partir de la función de correlación cruzada  $\Phi_{d,i}(\tau)$  entre las señales que llegan a ambos oídos de un oyente:

$$\Phi_{d,i}(\tau) = \frac{\int_0^t h_d(t)h_i(t+\tau) dt}{\left\{ \int_0^t h_d^2(t) dt \int_0^t h_i^2(t) dt \right\}^{1/2}} \quad (23)$$

En la que  $h(t)_d$  es la respuesta al impulso en el oído derecho y  $h(t)_i$  es la respuesta al impulso en el oído izquierdo. El IACC se define por medio de la siguiente expresión:

$$\text{IACC} = \text{máximo } \Phi_{d,i}(\tau) \text{ para } |\tau| \leq 1 \text{ ms} \quad (24)$$

La correlación cruzada mide la semejanza entre dos señales mediante un proceso iterativo. Para poder comparar situaciones diferentes, el valor de correlación cruzada se normaliza dividiéndolo por la potencia total de ambas señales. El IACC es, por último, el valor máximo que toma la correlación cruzada para un desplazamiento/retardo máximo entre ambas señales ( $\tau$ ) de  $\pm 1$  ms, que es el tiempo que le lleva a la onda acústica recorrer la distancia promedio entre los dos oídos.

En la Figura 3.15 se puede ver la función de correlación entre dos señales genéricas y el valor del IACC que da cuenta de las pequeñas diferencias entre ambas señales -en el eje de abscisas se indica el tiempo de retardo de la señal entre ambos oídos-.

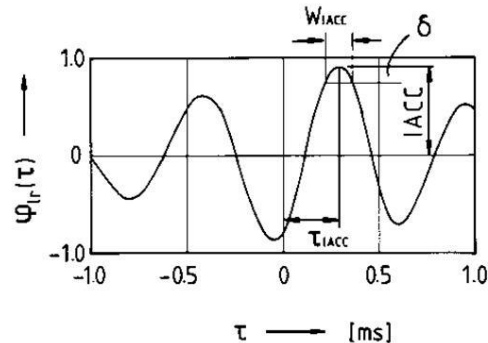


Figura 3.15. Correlación cruzada entre dos señales y definición gráfica del IACC (Ando, 1998).

El valor del IACC es 1 si las ondas que llegan a los dos oídos de un oyente son iguales; si las dos ondas son estadísticamente independientes, vale 0.

En la Figura 3.16 se observan las respuestas al impulso simuladas en computadora en los oídos derecho e izquierdo de un oyente situado en la segunda bandeja de la *Sala Ginastera* del Teatro Argentino de La Plata. El valor del IACC se puede extraer de estos ecogramas calculando la correlación cruzada entre las dos señales.

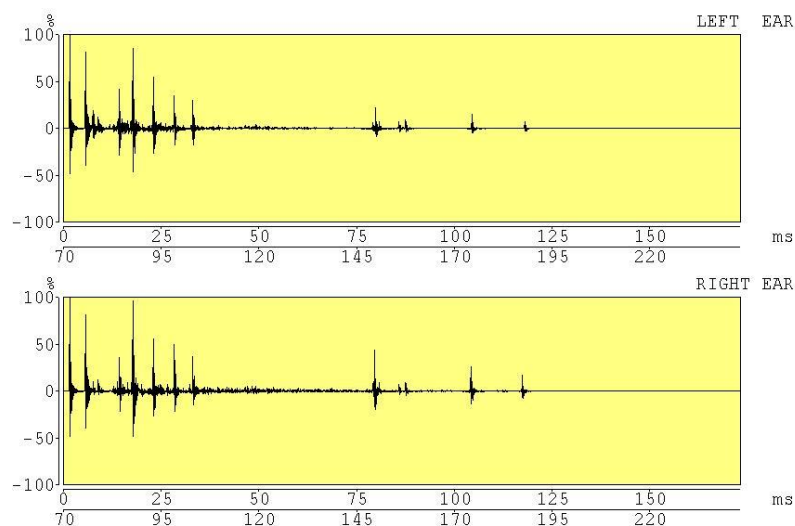


Figura 3.16. Ecogramas de los oídos derecho e izquierdo -segunda bandeja de la Sala Ginastera del Teatro Argentino de La Plata-. El valor del IACC en este caso fue 0,26 y el Factor de Espacialidad 0,74.

Con el objeto de centrar la atención en las reflexiones laterales tempranas se definieron dos valores de IACC. El  $IACC_E$  (temprano) considera el sonido que alcanza al oyente dentro de los primeros 80 ms después de la llegada del sonido directo. El  $IACC_L$  (tardío) evalúa el período posterior a los 80 ms y toma en cuenta considera la reverberación estadística de la sala. El  $IACC_A$  (total) tiene como límites de integración 0 e infinito. El  $IACC_E$  tiene como correlato perceptual el *Ancho Perceptual de la Fuente* (ASW) y el  $IACC_L$  la *Sensación de Envoltura* del oyente (LEV) que se vincula con la sensación de estar rodeado por el sonido.

En 1996, Leo Beranek definió el *Factor de Espacialidad* (1-IACC) que se emplea actualmente. Si el (1-IACC) vale 1, la correlación entre los sonidos en los dos oídos es nula. Como referencia, el criterio de Ando, Barron e Hidaka establece que el factor de espacialidad debe ser mayor a 0,60 en una buena sala (Beranek, 1996 y Ando *et al.*, 1997).

## 7. RAZONES DE ENERGÍA

### CLARIDAD A 80 MS (C80)

La Claridad relaciona la cantidad de energía inmediata, que llega al oyente durante los primeros 80 ms, con la energía sonora que llega después de transcurridos los 80 ms. Se la define matemáticamente con la siguiente expresión (Reichardt, 1974).

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} h^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} h^2(t) dt} \text{ dB} \quad (25)$$

Donde  $h(t)$  es el valor de la presión sonora instantánea en un punto receptor producido por un sonido impulsivo emitido desde una fuente sonora. Tiene aplicación para señales musicales o de gran autocorrelación ( $> 30$  ms) (Basso, 1998).

Si la Claridad tiene por valor 0 dB significa que la cantidad de energía en el principio y en el final de la señal (antes y después de los 80 ms) es la misma y la energía temprana iguala a la energía tardía o reverberante. Un  $C_{80}$  alto significa que la energía sonora temprana es superior a la energía tardía.

Algunos autores han propuesto valores óptimos de  $C_{80}$  de acuerdo al uso musical que se le va a dar a un espacio. Para el caso de las salas de concierto, Barron establece que el valor óptimo de  $C_{80}$  se encuentra entre -2 dB y +2 dB (Barron, 1993). Reichardt, por su parte, sostiene que su valor no debe ser nunca inferior a 0 dB (Reichardt, 1974) y

Lehmann sugiere que no debe ser inferior a 3 dB (Lehmann, 1986). Arau lo fija, extendiendo el límite superior de Barron, entre -2 dB y +4 dB (Arau, 1999).

Beranek menciona que los músicos prefieren distintos valores de Claridad en función de sus roles musicales específicos. Para los ensayos los directores de orquesta necesitan oír con gran definición todos los detalles musicales y eligen valores altos de  $C_{80}$ , entre 1 y 5 dB. Pero cuando dirigen un concierto o cuando asisten como oyentes prefieren espacios acústicos más reverberantes, con valores de  $C_{80}$  entre -1 dB y -4 dB (Beranek, 1996).

Por su parte, una obra de textura contrapuntística con un tempo rápido, un *allegro* por ejemplo, necesita más energía en la primera parte de la señal (los sonidos cambian rápidamente) mientras que algunas obras para órgano o de tempo lento, como el canto gregoriano, admiten campos más reverberantes y menos claros. En estos casos, la existencia de gran cantidad de energía en la parte final de la señal no constituye un problema por las características específicas del lenguaje musical (la señal cambia muy lentamente).

La percepción de la Claridad depende de la acústica de la sala, de las características musicales de la obra y de las habilidades e intenciones de los músicos o del orador.

### CLARIDAD A 50 MS ( $C_{50}$ )

La Claridad a 50 ms es similar a la anterior, pero relaciona la energía que llega al oyente durante los primeros 50 ms con la que llega en forma tardía. Tiene aplicación para la voz hablada o para señales de baja autocorrelación (< 30 ms).

$$C_{50} = 10 \log \frac{\left[ \int_0^{0,05} h^2(t) dt \right]}{\left[ \int_{0,05}^{\infty} h^2(t) dt \right]} \text{ dB} \quad (26)$$

### DEFINICIÓN (D)

La Definición fue propuesta por Thiele en 1953. Relaciona el porcentaje de energía temprana (presente en los primeros 50 ms de la señal) frente a la energía total de la señal.

$$D_{50} = \frac{\left[ \int_0^{0,05} h^2(t) dt \right]}{\left[ \int_0^{\infty} h^2(t) dt \right]} 100 \% \quad (27)$$

Si bien resulta un parámetro altamente correlacionado con la Claridad a 50 ms (linealmente dependientes), ambos no pueden ser usados indistintamente para

comparar salas. Los límites de integración en el denominador para la Claridad van desde los 50 ms hasta infinito y en la Definición se encuentran entre 0 e infinito: los parámetros no son intercambiables.

Arau establece que, para salas de concierto en la región de frecuencias medias (500 Hz y 1.000 Hz), la Definición debe ser inferior al 50% (Arau, 1999). Las salas con valores altos de Definición, superior al 65%, se encuentran mejor preparadas para el habla - teatro o sala de conferencias-. En ópera la situación es intermedia y los valores de Definición deberían estar, según Arau, entre 50 % y 65%.

### **CENTRO DE TIEMPO**

Dietsch y Kraak lo definieron en 1986 como el baricentro temporal de la respuesta al impulso de la sala:

$$t_{c(\tau)} = \frac{\int_0^{\tau} t \cdot h^2(t) dt}{\int_0^{\tau} h^2(t) dt} \quad (28)$$

$$t_c = \lim_{t \rightarrow \infty} t_{c(\tau)}$$

La función  $t_c(\tau)$  representa la evolución temporal del momento de  $h(t)^2$ . El centro de tiempo define cierto “centro de gravedad” temporal de la respuesta al impulso  $h(t)$  de la sala.

En la práctica, el Centro de Tiempo es un parámetro difícil de medir porque el numerador de la ecuación tiende a infinito cuando  $t$  tiende a infinito ya que el ruido de fondo nunca llega a ser cero en un caso real. Está altamente correlacionado con el TR y con la Claridad. Por ejemplo, al aumentar el valor del TR aumenta el del Centro de Tiempo.

### **FUNCIÓN DE CRECIMIENTO DE LA ENERGÍA**

Es la suma acumulativa de la energía acústica a medida que transcurre el tiempo  $t$ .

$$ERF_{(\tau)} = \int_0^{\tau} h^2(t) dt \quad (29)$$

La Función de Crecimiento de la Energía fue empleada en la fase de anteproyecto en el caso de la Usina del Arte.

## **8. PARÁMETROS ESPECTRALES**

Todos los parámetros analizados hasta aquí varían sus valores en función de la frecuencia. Es usual indicarlos en bandas de octava (o de tercios o sextos de octava) y



para un análisis completo hay que realizar un estudio espectral de cada uno de ellos. Existen, además, dos parámetros creados específicamente para describir a grandes rasgos el comportamiento espectral en un recinto, la *Razón para Bajas Frecuencias* y la *Razón para Altas Frecuencias*.

### **RAZÓN PARA BAJAS FRECUENCIAS (BR)**

La Razón Para Bajas Frecuencias es un parámetro que se obtiene a partir del TR y sintetiza la respuesta de la sala en la parte grave del espectro. Es la relación entre el TR a bajas frecuencias (125 Hz y 250 Hz) y el TR a frecuencias medias (500 Hz y 1.000 Hz). Se la define a partir de la siguiente expresión:

$$BR = \frac{T(125 \text{ Hz}) + T(250 \text{ Hz})}{T(500 \text{ Hz}) + T(1 \text{ kHz})} \quad (30)$$

Una sala tiene calidez acústica, a nivel perceptual, si presenta una buena respuesta a las frecuencias graves. Arau indica que el valor óptimo de la BR para música sinfónica es de 1,2 y para teatro 1,1 (Arau, 1999). Los criterios de Barron (1995) y de Bradley y Soulodre (1995) imponen como condición que el BR sea mayor a 1. Hidaka y Beranek (2000) sugieren que el BR tenga valores entre 1,1 y 1,45 en salas con tiempos de reverberación de 1,8 s o inferiores, y entre 1,1 y 1,3 para teatros de ópera.

### **RAZÓN PARA ALTAS FRECUENCIAS**

Una sala se define como brillante si presenta una buena respuesta a altas frecuencias. El brillo de una sala depende de la relación entre el valor medio del TR a altas frecuencias (2 kHz y 4 kHz) y el valor medio del TR a frecuencias medias. Indica que el sonido en la sala es claro y rico en armónicos.

$$\text{Razón alta frec.} = \frac{T(2 \text{ kHz}) + T(4 \text{ kHz})}{T(500 \text{ Hz}) + T(1 \text{ kHz})} \quad (31)$$

El valor de este parámetro debería ser alto en salas muy grandes, siendo deseable que no quede por debajo de 0,8. Sin embargo, resulta difícil que llegue a 1 debido a la absorción del aire (Arau, 1999).

## **9. NIVEL SONORO NORMALIZADO (G)**

El Nivel Sonoro Normalizado se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente acústica en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por una fuente omnidireccional de la misma potencia,

situada en campo libre a una distancia de 10 m de la fuente. Estos niveles se miden en bandas de octava desde los 125 Hz hasta los 4 kHz.

$$G = 10 \log \left[ \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h_A^2(t) dt} \right] \quad \text{dB} \quad (32)$$

$h_A(t)$  es la respuesta ante la misma fuente, colocada en el espacio libre a una distancia de 10 m del micrófono, que genera en la sala la respuesta  $h(t)$ .

Cuando se mide  $G$  es necesario considerar la directividad de la fuente. En la práctica de campo se acostumbra medir  $G$  con fuentes omnidireccionales. El Nivel Sonoro Normalizado permite comparar la intensidad efectiva entre salas diferentes y, a partir de los valores obtenidos, deducir la sonoridad aparente que perciben los oyentes.

El valor de  $G$  se corresponde con la impresión de la sonoridad de la sala, depende de la distancia al escenario, de la energía de las primeras reflexiones y del tiempo de reverberación (Arau, 1996).

## 10. PARÁMETROS FÍSICOS DE ESCENARIO

### FACTOR DE SOPORTE (ST1)

Gade sugirió este parámetro para determinar la cantidad de energía que la sala le devuelve a la fuente acústica (Gade, 1989). Determina la capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos.

Este parámetro relaciona la energía temprana que le llega al músico entre los 20 ms y 100 ms, con la energía directa que llega durante los primeros 20 ms. Se mide a 1 m de la fuente en el escenario y se expresa en dB.

$$ST_1 = 10 \log \frac{\int_{0,02}^{0,1} h^2(t) dt}{\int_0^{0,02} h^2(t) dt} \quad \text{dB} \quad (33)$$

### NIVEL DE ENSAMBLE TEMPRANO (EEL)

Determina la capacidad de los músicos de escucharse entre ellos en el escenario.

$$EEL = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} h_p^2(t) dt}{\int_0^{0,01} h^2(t) dt} \quad \text{dB} \quad (34)$$

Donde  $h_p$  es la respuesta al impulso tomada a una distancia dada dentro del escenario, por ejemplo a 8 m. El subíndice  $p$  señala que el tiempo es el de emisión, es decir que se comienza a contar desde el momento de generación del impulso.

## 11. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS FUENTES

### FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN ( $\Phi(\tau)$ )

La autocorrelación de una señal acústica aporta valiosa información sobre su coherencia interna (Ando, 1983 y 1985). Permite el análisis de la interacción entre la señal y el espacio acústico excitado y se la define como la correlación cruzada de la señal consigo misma. Resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal (Basso, 2009). Queda definida de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T h(t) h(t + \tau) dt \quad (35)$$

Donde  $h(t)$  es la señal acústica temporal y  $h(t + \tau)$  una copia de  $h(t)$  desplazada un tiempo  $\tau$ .

### DIRECTIVIDAD DE LA FUENTE ACÚSTICA

Se denomina directividad o patrón de radiación de una fuente acústica al modo particular en el que irradia en el espacio la señal acústica que produce.

Numerosos autores -por ejemplo Martin y Meyer- midieron cuidadosamente las características direccionales de instrumentos musicales, voces y altavoces. En la Figura 3.17 se pueden ver los diagramas polares de una tuba, un violín y un piano. Dado que, como es de esperar, cada instrumento presenta sus características direccionales en función de la frecuencia, las mediciones que se muestran fueron tomadas en cinco diferentes frecuencias (Davis y Davis, 1997).

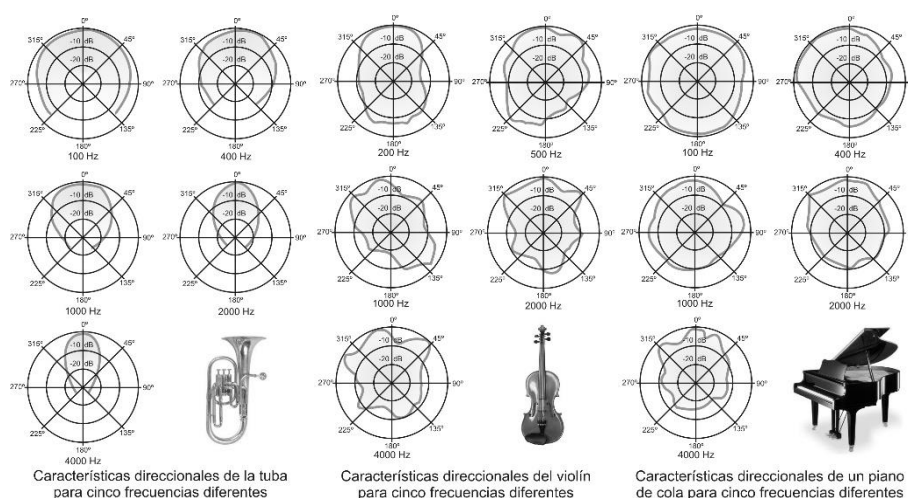


Figura 3.17. Gráficos de características direccionales de algunos instrumentos musicales (Davis y Davis, 1997, p. 602).

Los gráficos con diagramas direccionales son herramientas útiles para el diseño preciso de un sistema de sonido. En la Figura 3.18 se puede apreciar los diagramas direccionales y el trazado tridimensional para la fuente omnidireccional utilizada para caracterizar los campos acústicos de los estudios de caso de esta tesis.

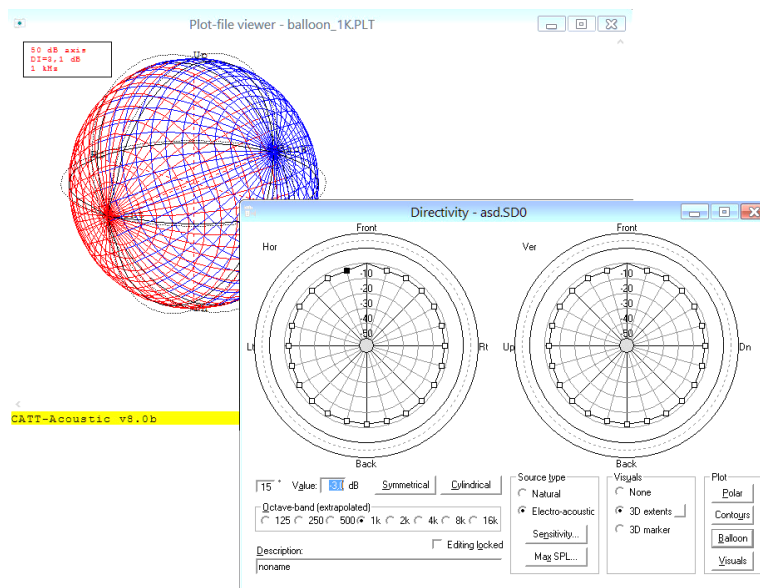


Figura 3.18. Definición de una fuente omnidireccional similar a la utilizada durante las simulaciones de diciembre de 2010 del Teatro Argentino de La Plata.

En el Capítulo 4 se muestra el análisis de la direccionalidad de un cantante que se utilizó para el diagnóstico del caso del Teatro Argentino de La Plata.

## 12. RASGOS PERCEPTUALES

Los rasgos perceptuales son parámetros que permiten evaluar la respuesta de los oyentes ante un estímulo físico. Se obtienen por medio de encuestas que son tratadas con métodos estadísticos.

### CLARIDAD PERCEPTUAL

Fischetti define la Claridad Perceptual de la siguiente manera: “La Claridad Perceptual es alta cuando el ataque del sonido y los detalles del mismo son bien percibidos”

(Fischetti, 1992).<sup>17</sup> Este parámetro también es llamado Precisión o Definición Perceptual y queda relacionado con los parámetros físicos Claridad y Definición.

### **PLENITUD DE SONIDO Y VIVACIDAD**

La Plenitud de Sonido es un término perceptual, no está definido físicamente y generalmente se lo relaciona con la reverberación. Un sonido pleno es un sonido con gran reverberación y baja Claridad Perceptual.

Beranek define la Vivacidad como la Plenitud de Sonido en la zona de alturas medias y agudas. Por el contrario, llama Calidez (*Warmth*) a la Plenitud de Sonido en la zona de alturas graves (Beranek, 1996).

### **DEFINICIÓN**

Beranek establece dos tipos de Definición perceptual: la horizontal, que se aplica a sonidos que son ejecutados en sucesión, y la vertical en la que los sonidos son ejecutados en forma simultánea (Beranek, 1996).

La Definición perceptual horizontal se refiere al grado en el que los sonidos se distinguen cada uno separado del siguiente. Los compositores pueden indicar ciertos aspectos musicales que determinan la Definición horizontal como el tempo, la repetición de alturas en una frase o la sonoridad relativa de los sonidos sucesivos. El ejecutante puede variar la Definición horizontal por la manera en la que elige articular y frasear un pasaje musical. Los factores acústicos que afectan la Definición horizontal son el tiempo de reverberación y la razón entre la energía temprana y reverberante.

La Definición vertical describe la capacidad de discriminar sonidos en forma individual cuando ocurren simultáneamente. Los ejecutantes pueden alterar la Definición vertical variando la dinámica y la articulación de los sonidos.

La Definición perceptual es sensible a factores acústicos como el balance entre las señales de los instrumentos, la manera en la que llegan a la audiencia, el grado de ensamble de las señales de los diferentes instrumentos en el espacio del escenario, la respuesta relativa de la sala a baja, media y alta frecuencia y la razón entre la energía temprana y reverberante.

---

<sup>17</sup> Algunos autores -Fischetti, por ejemplo- utilizan el término “subjetivo” como sinónimo de “perceptual”. Para el presente trabajo nos parece más apropiada la palabra “perceptual” ya que “subjetivo” puede estar relacionado a una opinión o juicio de valor.

El grado de Definición horizontal o vertical es el producto de una suma de factores musicales y acústicos que dependen del lenguaje de la obra musical, de la forma de ejecución y de las características del espacio en el que se la interpreta.

#### **ANCHO PERCEPTUAL DE LA FUENTE (ASW)**

Según Morimoto, es el primero de los factores en los que se divide la Espacialidad (Morimoto, 1993). El Ancho Perceptual de la Fuente se define como la amplitud horizontal del evento sonoro que se percibe espacial y temporalmente fusionado con el sonido directo.

Se lo relaciona con la textura lateral y la sensación de estar inmerso en el campo sonoro. La correlación entre el Ancho Perceptual de la Fuente y el Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural es alta.

#### **SENSACIÓN DE INMERSIÓN DEL OYENTE (LEV)**

También llamada Espacialidad, Sensación de Espacialidad o Impresión Espacial, es la sensación que experimenta un oyente de estar rodeado o de ser envuelto por el sonido.

Se relaciona con el Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural y con la Fracción de Energía Lateral (Kuttruff, 1991).

## REFERENCIAS

- Ando, Yoichi (1983). "Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall". *Journal of the Acoustical Society of America*, 74, pp. 873-887.
- Ando, Yoichi (1985). *Concert Hall Acoustics*. Berlin: Springer Verlag.
- Ando, Yoichi y otros (1997). "Acoustic Design of a Concert Hall Applying the Theory of Subjective Preference, and the Acoustic Measurement after Construction". *Acustica & Acta Acustica*, 83, pp. 635-643.
- Ando, Yoichi (1998). *Architectural Acoustics. Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. New York: Springer Verlag.
- Arau, Higini (1999). *ABC de la acústica arquitectónica*. Barcelona: CEAC.
- Atal, B., Schroeder, M. y Sessler, G. (1965). "Subjective reverberation time and its relation to sound decay". *Proceedings of the Fifth International Congress on Acoustics*. Liège, Paper G32.
- Barron, Michael (1995). "Bass sound in concert auditoria". *Journal of the Acoustical Society of America*, 97 (2), pp.1088-1098.
- Basso, Gustavo (1994). "La contaminación acústica y la cultura del ruido". *Actas del I Encontro Latino Americano de Tecnologia do Ambiente Contruído*. Gramado, Brasil.
- Basso, Gustavo (2006). *Percepción Auditiva*. Bernal: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
- Basso, Gustavo (2009). "La percepción espacial del ambiente acústico". *Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética*. Bernal: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
- Beranek, Leo (1962). *Music, Acoustics, and Architecture*. New York: Wiley.
- Beranek, Leo (1996). *Concert Halls and opera houses: How they sound*. New York: Acoustical Society of America.
- Beranek, Leo (2003). "Subjective Rank-orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls". *Acta Acustica*, 89, pp. 494-508.
- Beranek, Leo (2004). *Concert Halls and opera houses*. New York: Springer.
- Blauert, Janes (1997). *Spatial Hearing. The psychophysics of human sound localization*. Cambridge: MIT Press.
- Bradley, John y Soulodre, Gilbert (1995). "Subjective evaluation of new room acoustic measures". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (1), pp. 294-301
- Bregman, Albert (1994). *Auditory Scene Analysis*. Cambridge: MIT Press.
- Canalis, Ianina y Basso, Gustavo (2008). "Evaluación de la calidad acústica del Teatro Colón de Buenos Aires". *Proceedings of the VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008*. Buenos Aires: AdAA-FIA. [en línea] Consultado el 29 de abril de 2017 en <<http://www.sea-acustica.es/fileadmin/BuenosAires08/a-110.pdf>>
- Chowning, J. (1999), "Perceptual Fusion and Auditory Perspective". Cook, P. R. (ed.). *Music, Cognition, and Computerized Sound*. Cambridge: MIT Press.
- Davis, Don y Davis, Carolyn (1997). *Sound system engineering*. Boston: H. W. Sams.

- Divenyi, Pierre (1992). "Binaural suppression of nonechoes". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91 (2), pp.1078-1084.
- Eyring, C. F. (1930). "Reverberation time in dead rooms". *J. Acoust. Soc. Am.*, 1, pp. 168.
- Farina, M. Andrea (2015). Determinación de la calidad acústica de salas para música a partir de las tipologías arquitectónicas. Tesis de Doctorado. Bernal: Universidad Nacional de Quilmes - Departamento de Ciencias Sociales.
- Fischetti, Antonio y otros (1992). "Relations between Subjective Spatialisation, Geometrical Parameters and Acoustical Criteria in Concert Halls". *Applied Acoustics*, 37, pp. 233-247.
- Fitzroy, Daniel (1959). "Reverberation formulae which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption". *J. Acoust. Soc. Amer.*, 31, pp. 893-897.
- Franklin, William (1903). "Derivation of Equation of Decaying Sound in a Room and Definition of Open Window Equivalent of Absorbing Power". *Physical Review*, 16 (6). pp. 372-374.
- Gade, Anders (1989). "Investigations of musician's room acoustic conditions in concert halls. II: Field experiments and synthesis of results". *Acustica*, 69, pp. 249-262.
- Haas, Helmut (1951). "Über den einfluss eines einfahechos auf die hörsamkeit von sprache". *Acustica*, 1, pp.49-58. Traducción al inglés: "The influence of a single echo on the audibility of speech". *J. Audio Eng. Soc.* 20, pp. 146-159 (1972).
- Hidaka, Takashuki y Beranek, Leo (2000). "Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas". *Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 368-383.
- Johnson, Russell (1995). "Variable coupled volume for music performance". Ando, Yoichi (ed.). *Music and Concert Hall Acoustics*. London: Academic Press Limited.
- Jordan, Wilhelm (1970). "Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques". *J. Acoust. Soc. Am.*, 47 (2), pp. 408-412.
- Kinsler, Lawrence y otros (1980). *Fundamentals of Acoustics*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Krumshansl, Carol (1990). *Cognitive Foundations of Musical Pitch*. New York: Oxford Univ. Press.
- Kuttruff, Heinrich (1991). *Room Acoustics*. Londres: Elsevier Applied Science.
- Lehmann, W. (1986). *Technical communication*. *Acustica*, 45.
- Méndez, Antonio y otros (1994). *Acústica Arquitectónica*. Buenos Aires: Universidad del Museo Social Argentino.
- Millington, G. (1932). "A Modified Formula for Reverberation". *J. Acoust. Soc. Amer.* 4, pp. 69-82.
- Morimoto, Masayuki y otros (1994), "Relation between Auditory Source Width in Various Sound Fields and Degree of Interaural Cross-Correlation: Confirmation by Constant Method". *Applied Acoustics*, 42, pp. 233-238.
- Norris, R. R. (1932). "A derivation of the reverberation formula". En Knudsen, Oliver (ed.). *Architectural Acoustics*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Plomp, Reiner (1976). *Aspects of Tone Sensation*. New York: Academic Press.



- 
- Pujolle, Jean (1975). "Nouvelle formule pour la durée de reverberation". *Revue d'Acoustique*, 19, pp. 107-113
  - Sabine, Wallace Clement (1922). *Collected Papers on Acoustics*. London: Cambridge/Harvard university press.
  - Reichardt, W. y otros (1974). "Abhängigkeit der Grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit von der Art de Musikmotives, der Nachhallzeit und der Nachhalleinsatzzeit". *Applied Acoustics*, 7, pp. 243–264.
  - Schoroeder, Manfred y otros.(1974). "Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters". *Journal of the Acoustical Society of America*, 56, pp.1195-1201.
  - Sette, W.H. (1933). "A New Reverberation Time Formula". *J. Acoust. Soc. Amer.*, 4, pp. 193-210.
  - Wallach H., Newman E., Rosenzweig (1949). "The precedence effect in sound localization". *Am. J. Psychol.*, 52, pp. 315-336.

---

**PARTE II**  
**ESTUDIOS DE CASO**

---

---

## PARTE II. ESTUDIOS DE CASO

Una vez planteada la hipótesis inicial de este trabajo, propuesta en una publicación temprana (Basso: 1994e) y que coincide a grandes rasgos con la de la presente tesis, hubo que decidir la realización de pruebas experimentales que pudieran corroborarla o refutarla.

Por lo general, una prueba experimental estándar consiste en enunciar una hipótesis falsable, construir un modelo que la ponga en evidencia, medir la salida del modelo ante una señal de entrada conocida en condiciones controladas de borde, y corroborar o refutar la hipótesis comparando dicha salida con lo predicho por el modelo. Si la hipótesis es refutada, se la modifica levemente o se agregan hipótesis *ad-hoc* y se reinicia el proceso. En casos extremos, por ejemplo ante el fracaso frente a un experimento crucial o de existencia, se la puede llegar a descartar.

En el campo de la acústica de ondas y más específicamente en el área de los campos acústicos tridimensionales, la base empírica se establece a partir de dos métodos posibles: la realización de experimentos controlados en laboratorio o el análisis de espacios arquitectónicos reales en cantidad suficiente como para formar un universo estadístico significativo.

La realización de experimentos controlados en laboratorio es costosa, requiere de instalaciones especializadas -como cámaras anecoicas y reverberantes- y de instrumental elegido y/o diseñado específicamente para cada prueba. Aunque han sido realizados con gran provecho en muchas oportunidades en laboratorios de prestigiosas universidades de EEUU, Europa y Japón e incluso de nuestro país, su utilidad en nuestro caso era más que discutible. Desde el comienzo planteamos que la variable de salida del sistema sería evaluada en términos de la *Calidad Acústica* del espacio bajo análisis (ver en el Capítulo 3). En todos los modelos que la definen, los de Beranek o Ando por ejemplo, la Calidad Acústica es una magnitud perceptual compuesta que depende de un gran número de variables de entrada, cuyo número y participación en el valor final no está bien establecida. Algunas de estas variables son tan complejas y dependen de tal cantidad de factores -como las definidas por los instrumentos musicales que intervienen, su ubicación en el espacio, las técnicas de ejecución involucradas o el género y estilo de las piezas musicales que se hayan escogido- que un experimento controlado de laboratorio no sería representativo del funcionamiento del sistema.

Por otra parte, resulta imposible construir en laboratorio modelos 1:1 de salas como teatros, auditorios y espacios experimentales -muchos de los casos que se van a analizar costaron decenas o centenares de millones de dólares-.

Mucho más efectivo en nuestro caso es fundar la base empírica en salas reales, de escala 1:1, pasibles de ser energizadas mediante altavoces y con instrumentos musicales reales ejecutados por músicos profesionales. El problema aquí es que la cantidad de salas, modificadas o diseñadas a partir de la metodología expuesta en esta tesis, no es suficiente como fundar un universo estadístico significativo.

Ante la imposibilidad de contar con la cantidad suficiente de salas para armar una base empírica estadísticamente significativa, se empleó el método de “estudio de caso” (Yin, 1994; Stake, 1995) que permite extraer conclusiones relevantes del examen individual de cada escenario existente. Un estudio de caso es un análisis en profundidad de una situación particular, utilizado para abordar un campo de estudio cuando la población disponible es insuficiente para un abordaje estadístico de gran alcance.

La base empírica utilizada para los estudios de caso estuvo compuesta por:

1. Salas existentes analizadas por investigadores y laboratorios reconocidos. La literatura especializada abunda en datos acústicos sobre salas célebres del mundo pero, salvo algunas pocas excepciones, no están dirigidos a la detección de valores relacionados con nuestra hipótesis central.
2. Salas existentes analizadas por nuestro equipo de trabajo. En estos casos se pudieron diseñar las pruebas experimentales adecuadas para responder las preguntas que plantea la hipótesis central.
3. Salas diseñadas y construidas a partir de lo establecido por el modelo bajo estudio. Se han podido construir numerosas salas chicas y medianas que permitieron poner en práctica los principios de diseño acústico/arquitectónico derivados del modelo desarrollado. También se han construido varias salas grandes y otras están en fase de diseño y/o construcción.
4. Salas existentes cuyo comportamiento acústico era deficiente y que se reformaron en base a pautas derivadas del modelo desarrollado. En estos casos los resultados experimentales fueron especialmente significativos, pues se pudieron comparar los valores obtenidos antes y después de la intervención.

Las salas que fueron escogidas para analizar en detalle fueron:

- Sala Ginastera del Teatro Argentino de La Plata.
- Sala Sinfónica de la Usina del Arte (Ciudad Autónoma de Buenos Aires).
- Sala de Cámara de la Usina del Arte (Ciudad Autónoma de Buenos Aires).
- Teatro Colón (Ciudad Autónoma de Buenos Aires).
- Sala Sinfónica (Ballena Azul) del Centro Cultural Kirchner (Ciudad Autónoma de Buenos Aires).
- Auditorio de la Facultad de Bellas Artes de la UNLP (Ciudad de La Plata).

En los Capítulos 4 y 5 se describe la aplicación de la metodología al caso de la Sala Ginastera del Teatro Argentino de La Plata y en el Capítulo 6 al de la Sala Sinfónica de la Usina del Arte.

También se analizaron algunos aspectos vinculados con las hipótesis auxiliares de esta tesis, aunque sin el rigor de un estudio de caso, en varios teatros y salas de la Argentina y América Latina (Chile, Colombia, Paraguay, Brasil y Uruguay) y en numerosos teatros, auditorios y centros culturales distribuidos por todo el país.

## **CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE CASO 1. TEATRO ARGENTINO DE LA PLATA**

### **PARTE 1. DIAGNÓSTICO**

De todos los estudios de caso, el del Teatro Argentino de La Plata (TA) fue el que más información aportó pues se pudo realizar un trabajo constante, con acceso total a las instalaciones y participación en las producciones oficiales del Teatro, durante un período de más de 10 años. El caso se encuadra dentro del tipo 4 de la base de datos: "Salas existentes cuyo comportamiento acústico era deficiente y que se reformaron en base a pautas derivadas del modelo desarrollado". Aunque no corresponde calificar a la Sala Ginastera del Teatro Argentino como deficiente, presentaba algunas características acústicas en su platea que podían mejorarse y que fueron señaladas por la mayoría de los músicos y habitués consultados.

Se contó con la invaluable colaboración de los profesionales y técnicos de la Dirección Artística, de la Dirección Técnica y de las secciones de Audio y Video, Construcciones Escénicas, Efectos Especiales y Herrería Teatral, Escenografía, Luminotecnia, Montaje Escénico y Diseño y Producción Escenotécnica del TA.

Dada su extensión, el caso del TA se dividió en dos capítulos, el 4 dedicado al diagnóstico y el 5 a la intervención.

#### **RESUMEN**

En este capítulo se describe el diagnóstico acústico de la Sala Ginastera del Teatro Argentino de La Plata, realizado en base a encuestas de opinión, mediciones físicas y simulaciones digitales. Se muestran las limitaciones de los análisis tradicionales y, por contraposición, la eficacia del análisis basado en las hipótesis propuestas en esta tesis. Se detallan las características del campo temprano que generan las características acústicas percibidas en la platea y se proponen las acciones escogidas para su corrección.

#### **1. METODOLOGÍA**

La metodología que se aplicó al caso del Teatro Argentino de La Plata (TA) sigue, en esencia, la que se describió en el capítulo introductorio de esta tesis:

- Se realizó un diagnóstico perceptual a partir de encuestas de opinión obtenidas de músicos, críticos y asistentes habituales a la sala.

- Se midió el campo acústico de la Sala Ginastera en base a los parámetros definidos por la norma ISO-3382.
- Se elaboró un modelo acústico digital de la Sala Ginastera en base al modelo físico/matemático desarrollado en la investigación madre.
- Se ajustó y validó el modelo digital, a partir de los resultados obtenidos en la medición de campo, hasta alcanzar cotas de error del orden de los límnes (mínimas diferencias perceptibles) de cada parámetro acústico.
- Se elaboró un diagnóstico acústico completo de la sala a partir de las mediciones de campo, de los resultados de las encuestas de opinión y de las simulaciones digitales realizadas.
- En base a las conclusiones del diagnóstico se propusieron una serie de modificaciones operadas sobre el campo acústico temprano -hipótesis central de esta tesis- con el propósito de corregir los defectos acústicos detectados.
- Se realizaron las modificaciones propuestas en la Sala Ginastera.
- Se estimó la eficacia de la intervención en base al Índice de Calidad Acústica AQI (Beranek: 1996) y a la evaluación auditiva de interpretaciones musicales de diferentes géneros y estilos.

## 2. HISTORIA DEL DISEÑO ACÚSTICO ORIGINAL DE LA SALA GINASTERA DEL TA

El primer edificio del Teatro Argentino, un clásico teatro en herradura inaugurado en 1890, sufrió un incendio que destruyó su sala principal el 18 de agosto de 1977. En lugar de su restauración, el gobierno militar decidió demoler lo que quedaba en pie y llamar a concurso para construir un nuevo *Centro de las Artes del Espectáculo Teatro Argentino de La Plata*.

El proyecto ganador, obra de los arquitectos Enrique Bares, Tomas García, Roberto Germani, Inés Rubio, Alberto Sbarra y Carlos Ucar, contó con los Ings. Rafael Sánchez Quintana y Federico Malvarez como especialistas en acústica.

Para la Sala Lírica, denominada *Sala Alberto Ginastera*, se escogió una tipología arquitectónica que combina las tradicionales salas italianas en herradura con una planta en abanico con grandes bandejas frontales, de modo similar a las del *Metropolitan* de Nueva York, el *Kennedy* de Washington o la *L'Opéra Bastille* de París. El objetivo era mejorar las visuales de los sectores laterales, habitualmente malas en los teatros italianos clásicos.

Los teatros de ópera tradicionales tienen en general una planta en forma de herradura y entre cuatro y siete niveles similares de palcos y, a través de los años y sucesivos desarrollos, demostraron ser acústicamente eficaces. En el TA, a diferencia de estos ejemplos, se conservaron sólo tres niveles de palcos completos en los laterales, intercalándose otros cuatro niveles de palcos laterales corridos con una sola fila de sillas, con acceso desde las bandejas. La intención de los proyectistas era permitirle al espectador acomodarse al ángulo más conveniente para no sufrir ninguna obstrucción visual o acústica (Sánchez Quintana, 2000). Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 permiten apreciar el exterior del edificio -de estilo brutalista-, los esquemas de planta a nivel de platea y el corte longitudinal de la sala.



Figura 4.1. Exterior del edificio del TA, esquina de 9 y 53. <sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> Tomada de:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Teatro\\_Argentino\\_de\\_La\\_Plata#mediaviewer/File:Complejo\\_cultural\\_Teatro\\_Argentino\\_La\\_Plata\\_1.JPG](http://es.wikipedia.org/wiki/Teatro_Argentino_de_La_Plata#mediaviewer/File:Complejo_cultural_Teatro_Argentino_La_Plata_1.JPG)



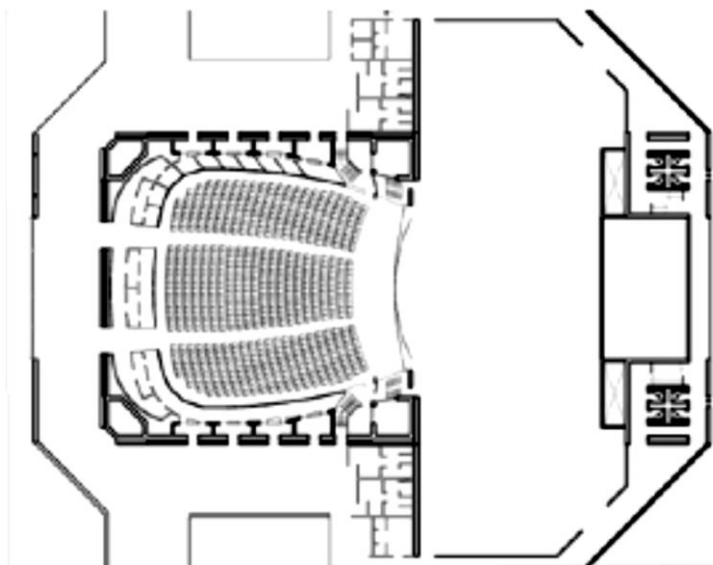


Figura 4.2. Planta de la Sala Ginastera que incluye a la platea y al escenario.

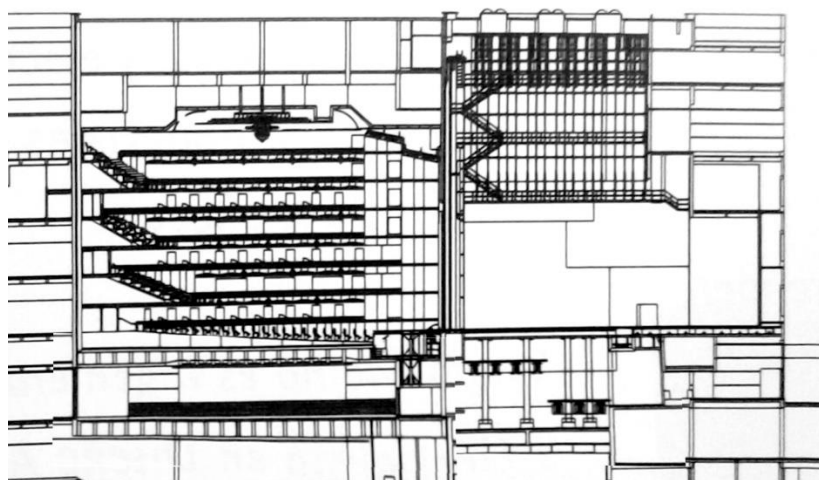


Figura 4.3. Corte longitudinal de la Sala Ginastera.

En las bases del concurso se había especificado un tiempo de reverberación  $TR$  a frecuencias medias del orden de 1,4 s a 1,5 s a sala llena, valores típicos para teatros líricos europeos.

De acuerdo a lo narrado por el Ing. Sánchez Quintana (op. cit.), para el diseño del campo acústico interior se emplearon todas las herramientas con que contaba la ciencia acústica de la época: estudios geométricos en dos dimensiones, análisis estadístico de la reverberación y análisis mediante la confección de modelos físicos a escala. En la Figura 4.4 pueden verse parte de los ensayos con luz láser sobre una maqueta acústica.

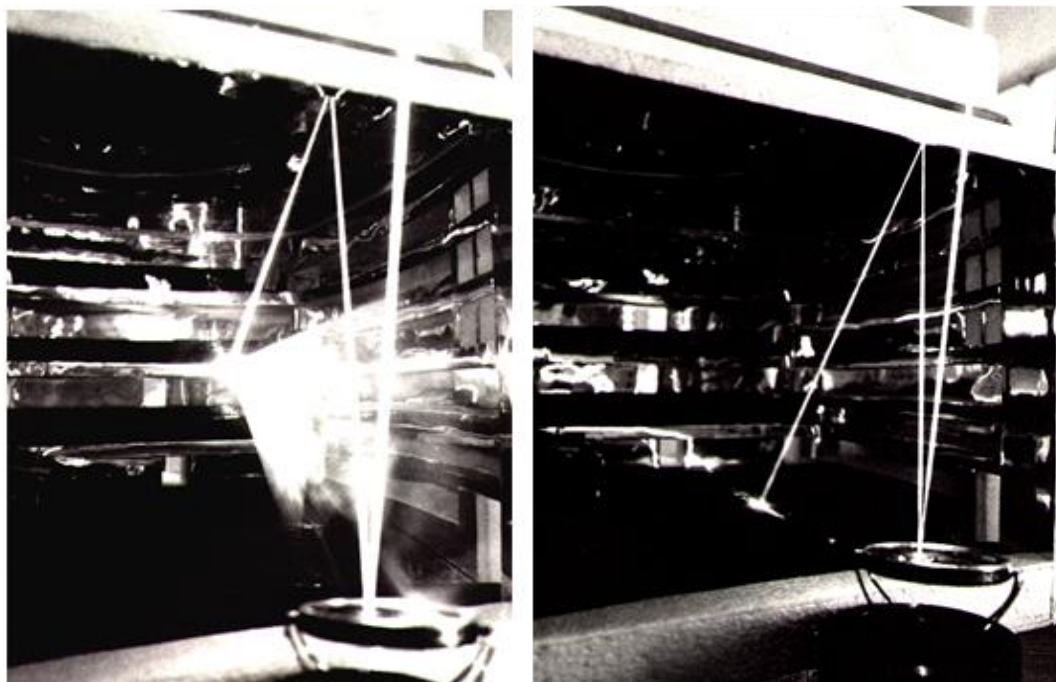


Figura 4.4. Ensayos con luz láser sobre una maqueta acústica (Sánchez Quintana, 2000).

Se contrató al estudio *BAP -Bickerdike, Allen Partners-* para confeccionar una maqueta más grande, a escala 1:50, pasible de ser analizada mediante ondas sonoras de alta frecuencia. Este estudio, a su vez, subcontrató los servicios de la Universidad de Cambridge, cuyo departamento de acústica estaba a cargo del reconocido especialista Dr. Michael Barron. Lamentablemente, estos ensayos en el exterior debieron suspenderse por motivos fuera del alcance del equipo proyectista.

Concluidos los análisis acústicos, se tomó la decisión de modificar las inclinaciones de palcos, cielorraso, antepechos de palcos y cambiar la forma del arco del proscenio con el fin de proveer mayor difusión acústica al interior de la sala.

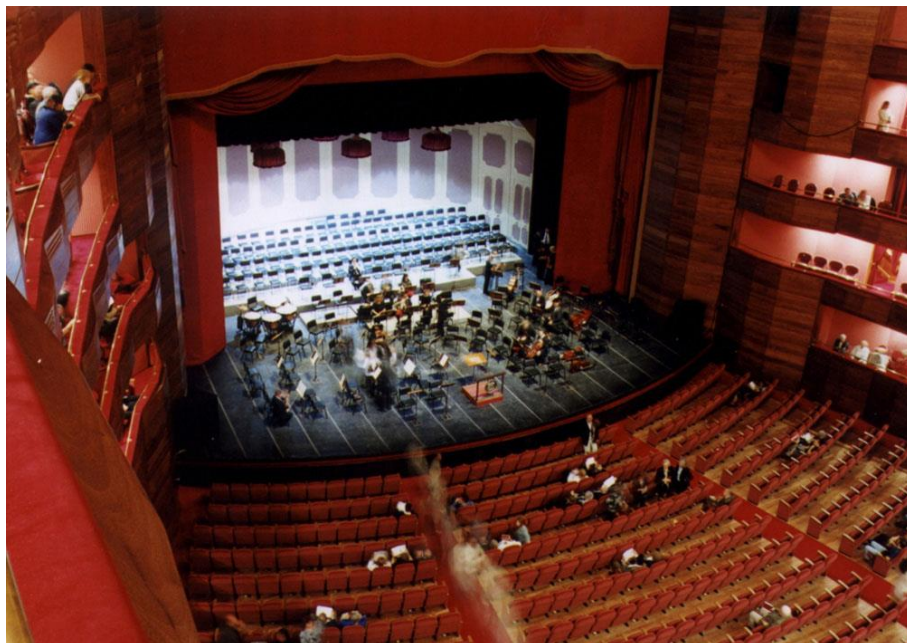


Figura 4.5. Ensayos para la Inauguración - año 1999.

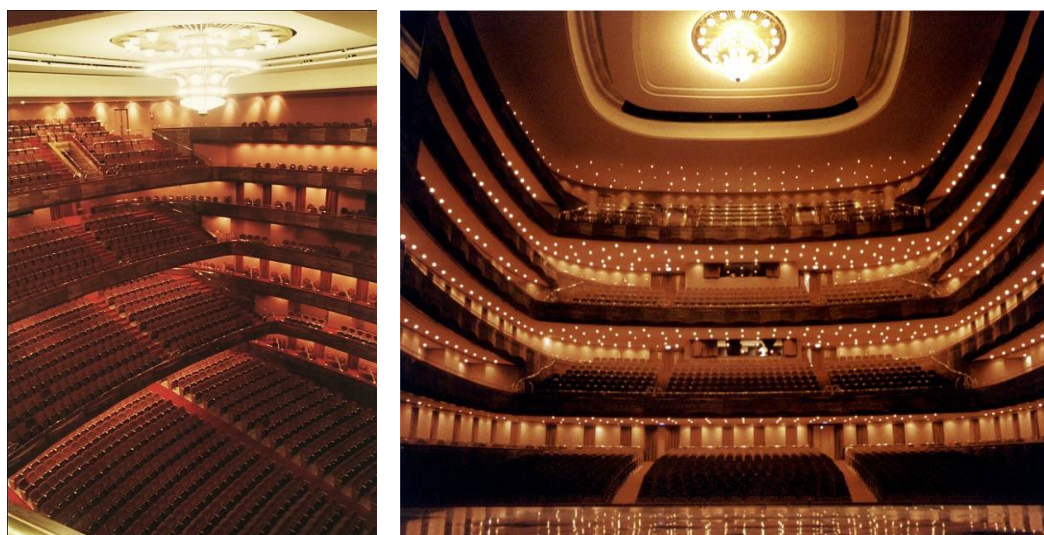


Figura 4.6. Imágenes del interior de la Sala Ginastera.

La inauguración de la nueva sala tuvo lugar el 12 de octubre de 1999 y la opinión del público sobre su acústica fue, en principio, favorable.

Sin embargo, a medida que se sucedían las funciones de ópera y de música sinfónica y coral, fue ganando terreno la opinión, compartida por músicos, público y crítica, de que la platea carecía de la calidad acústica esperada. Se alegaba una reverberación insuficiente, un déficit en bajas frecuencias y la sensación general de percibir un sonido plano y lejano, como si los espectadores no compartieran el mismo espacio con los

músicos.<sup>19</sup> Estas opiniones se potenciaban por la inevitable comparación con el Teatro Colón de Buenos Aires, quizá el mejor teatro de ópera del mundo.

Por el contrario, en las bandejas superiores la calidad sonora fue considerada entre muy buena y excelente, dato que se convertiría en un elemento clave a la hora de decidir la futura intervención acústica, tal como se verá más adelante.

Las autoridades del Teatro Argentino decidieron realizar las modificaciones necesarias para mejorar el comportamiento acústico en la platea, el sector más importante y el que define la calidad general del teatro ante la opinión pública. En el año 2002 convocaron a la Cátedra de *Acústica Musical* de la Facultad de Bellas Artes de la UNLP, que decide realizar un completo examen acústico del teatro. Este estudio incluiría la realización de un modelo digital de la sala, mediciones de campo para ajustar el modelo digital y mediciones en laboratorio. Los ensayos de laboratorio se realizarían en el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL) de la Comisión e Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), invocando un convenio marco entre la UNLP y la CIC.

La idea instalada en la comunidad de especialistas en acústica del país, cuyos referentes fueron consultados a propósito de la futura intervención, se basaba en los conceptos acústicos tradicionales que definían el modelo de Sabine: la reverberación insuficiente, el déficit de bajas frecuencias y la falta de inmersión en el espacio acústico se corregirían quitando parte del material absorbente en las paredes de la sala, aumentando de este modo el Tiempo de Reverberación general y el Tiempo de Reverberación a bajas frecuencias en particular. Semejante intervención, muy costosa y difícil de justificar en un edificio recién inaugurado, tropezaba además con un inconveniente formal pues no se había declarado el fin de obra y cualquier cambio debía ser aprobado por el Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires. La Dirección de Teatro Argentino sólo podía actuar sobre lo que estaba considerado como “elemento escenográfico”, no estructural y removible con facilidad.

Por otro lado, quedaba un interrogante sustancial que debía necesariamente ser resuelto antes de cualquier acción concreta: una intervención sobre el campo acústico global de la sala, basada en la teoría de reverberación de Sabine ¿sería eficaz para resolver sus problemas? Esa teoría había sido utilizada a conciencia en la etapa de diseño por dos de los más destacados especialistas en acústica del país.

---

<sup>19</sup> Cabe aclarar que estas características eran habituales en la mayoría de las salas diseñadas en la época, previa a la aparición de los modelos de predicción digital.

La Cátedra de Acústica Musical de la FBA decide entonces realizar un estudio completo de la Sala Ginastera empleando las nuevas teorías y métodos de la disciplina, herramientas que no existían cuando se diseñó la sala 20 años antes.

Participaron, en determinados temas o partes de la investigación, además de la Cátedra de Acústica Musical y del Equipo de Investigación en Acústica de la Facultad de Bellas Artes de la UNLP, el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (LAL-CIC), investigadores de la Universidad Nacional de Lanús y de la Universidad Nacional de Quilmes, personal especializado del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y personal de las secciones técnicas del TA -en especial del área de Audio y Video-.

### 3. DIAGNÓSTICO

#### DIAGNÓSTICO AUDITIVO

El diagnóstico auditivo fue realizado mediante encuestas de opinión a numerosos músicos de la Orquesta Estable del TA y a gran cantidad de asistentes habituales a la sala. La que sigue es la lista de los problemas acústicos detectados, extraída de las respuestas obtenidas. Se incluyen las probables causas físicas y las soluciones recomendadas de acuerdo al modelo tradicional.

#### EN PLATEA

##### 1. Falta de graves

Causas probables de acuerdo al modelo estándar: escasez de energía de baja frecuencia, escaso tiempo de reverberación estadístico (TR de Sabine) a baja frecuencia, escasa relación de bajas frecuencias (*Bass Ratio*).

Soluciones de acuerdo al modelo estándar (Teoría de Sabine): reducir la absorción en bajas frecuencias, aumentar el número de instrumentos graves -contrabajos, etc.-.

##### 2. Sonido “plano” y distante, baja sensación de “estar envuelto por el sonido” (*Envelopment*)

Causas probables de acuerdo al modelo estándar: insuficiente nivel sonoro, falta de difusión lateral de la energía (sala ancha y corta, en contra de lo recomendado en la literatura especializada), espacios acústicos del escenario y de la sala no acoplados.

Soluciones de acuerdo al modelo estándar: aumentar el número de reflexiones laterales globales. Acoplar el escenario a la sala.

### *3. Desbalance orquestal. Instrumentos apenas audibles en algunas secciones instrumentales*

Causas probables de acuerdo al modelo estándar: insuficiente proyección acústica desde el escenario, enmascaramiento de instrumentistas entre sí, espacios acústicos del escenario y de la sala no acoplados.

Soluciones de acuerdo al modelo estándar: rediseño de la cámara de orquesta y de las tarimas de orquesta. Acoplar el escenario a la sala.

### *4. Sección de cuerdas sin cuerpo*

Causas probables de acuerdo al modelo estándar: insuficiente proyección acústica desde el escenario.

Soluciones de acuerdo al modelo estándar: rediseño de la cámara de orquesta. Acoplar el escenario a la sala.

## **EN LOS NIVELES SUPERIORES**

En general, no se detectaron los defectos mencionados en la platea. En particular, no se percibe una gran escasez de bajas frecuencias, lo que permite deducir que tanto el tiempo de reverberación estadístico (TR de Sabine) como la relación de bajas frecuencias ("Bass Ratio") de la sala son adecuados. Esta conclusión contradice las hipótesis planteadas en el punto 1 del diagnóstico en platea de acuerdo al modelo estándar.

## **EN EL ESCENARIO**

### *1. Mala audición en escenario*

Durante la ejecución en el escenario a los músicos les cuesta oírse entre sí, especialmente entre secciones distantes. El balance tímbrico y el ensamble rítmico son deficientes debido, en parte, a causas acústicas.

Los instrumentistas se enmascaran entre sí.

La imagen sonora del director no coincide con la de los músicos ni con la de los espectadores.

Soluciones de acuerdo al modelo estándar: rediseño de la cámara de orquesta y de las tarimas de orquesta.

## 2. Se oyen ecos prominentes desde el fondo de la sala

Soluciones de acuerdo al modelo estándar: eliminación de las superficies reflectantes que originan los ecos mediante absorción o redireccionamiento de la energía.

### DIAGNÓSTICO FÍSICO/ACÚSTICO

#### MEDICIONES FÍSICAS PREVIAS

El equipo de asesores acústicos a cargo del proyecto original realizó mediciones acústicas, al concluirse la obra, que se usaron para evaluar físicamente la sala. Una síntesis de esas mediciones se encuentra en el texto del Ingeniero Rafael Sánchez Quintana (Sánchez Quintana: 2000). En la Tabla 5 de ese trabajo, “Evolución del tiempo de reverberación”, se puede observar el valor del TR en septiembre de 1999, a un mes de la inauguración de la sala (12 de octubre de 1999) [Tabla 4.1 y Figura 4.7].

Frecuencia [Hz]	TR Jun-97 [s]	TR Jun-98 [s]	TR Ago-99 [s]	TR Sep-99 [s]
125	9,1	9,6	2,8	1,96
250	8,2	7,7	3,05	1,7
500	6,3	6,7	4,4	1,77
1000	5,7	5,3	4,6	1,78
2000	4,5	4,45	4,01	1,52
4000	2,82	2,95	2,5	1,23

Tabla 4.1. Evolución del tiempo de reverberación durante la construcción de la sala (R. S. Quintana: 2000).

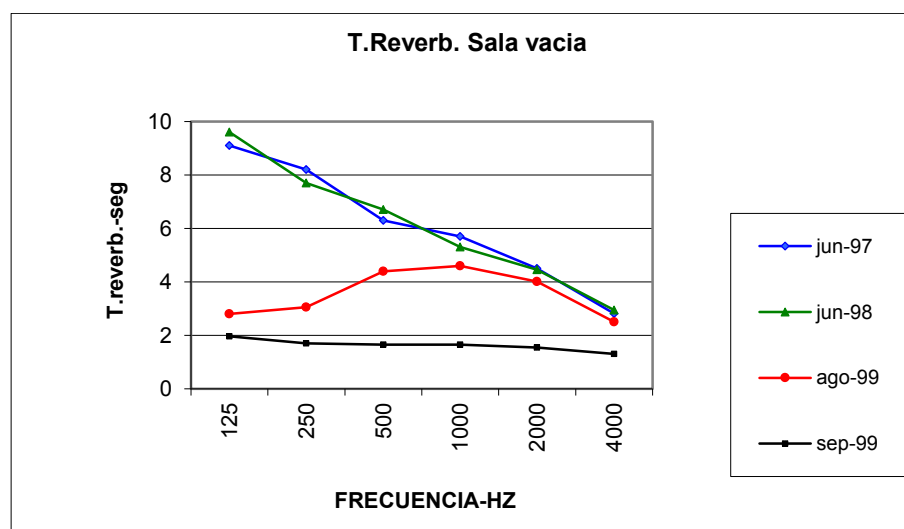


Figura 4.7. Evolución del tiempo de reverberación durante la construcción de la sala (R. S. Quintana: 2000).

La medición realizada en septiembre de 1999 fue con la sala sin público y con el telón de seguridad bajo. Los valores son el resultado de un promedio estadístico de los resultados obtenidos en una gran cantidad de puntos de medición, distribuidos en la platea y en los niveles superiores.

Aunque los valores y el comportamiento espectral del TR resultaron adecuados de acuerdo a la bibliografía especializada, al no haber sido medidos diferenciando sectores resulta imposible distinguir las diferencias acústicas entre la platea y los niveles superiores. Era necesario, por lo tanto, realizar nuevas mediciones orientadas a investigar las causas físicas de las diferencias percibidas.

#### **NUEVAS MEDICIONES FÍSICAS BAJO NORMA ISO-3382**

El Equipo de Investigación en Acústica de la FBA realizó el 22 de diciembre de 2010 nuevas mediciones acústicas de la Sala Ginastera, esta vez bajo la norma ISO-3382.<sup>20</sup>

Para energizar la sala se generaron impulsos acústicos en tres puntos del escenario en dos condiciones diferentes, con el telón cortafuego de chapa cubriendo la embocadura de escenario y con el telón de textil en posición cerrada, y se midieron las respuestas al impulso en varias butacas de la platea.



Figura 4.8. Imágenes de las mediciones del 22 de diciembre de 2010 (Fotografías de Valeria Cejas).

Una síntesis de los resultados se puede ver a continuación.

---

<sup>20</sup> Participaron María Andrea Farina, Valeria Cejas, Federico Jaureguiberry, Federico Santander, Juan Manuel Cingolani, Demián García Violini y Jorge Pappadopoulos.



En la Figura 4.9 se pueden ver los valores de Tiempo de Reverberación T30 promedio, medidos con el telón de textil en posición cerrada.

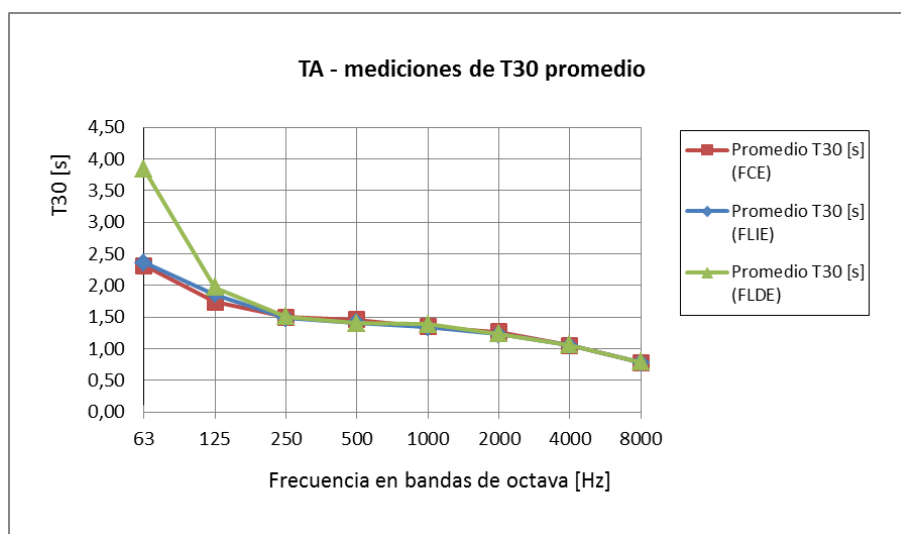


Figura 4.9. Fuente centro escenario (FCE), Fuente lateral izquierdo escenario (FLIE), Fuente lateral derecho escenario (FLDE). Con telón de textil.

En la Figura 4.10 se pueden observar los valores de Claridad Acústica C80 promedio, medidos con el telón de textil cerrado.

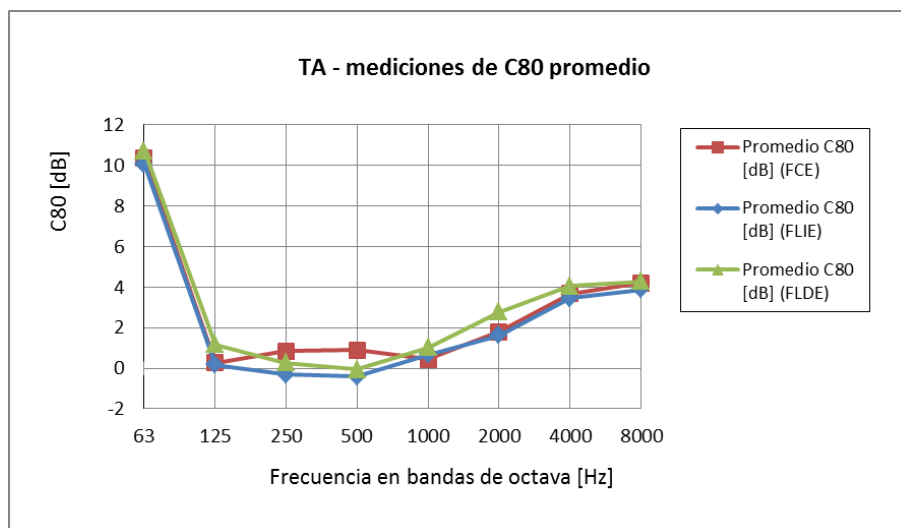


Figura 4.10. Fuente centro escenario (FCE), Fuente lateral izquierdo escenario (FLIE), Fuente lateral derecho escenario (FLDE). Con telón de textil.

Aunque las mediciones realizadas aportaron una gran cantidad de información sobre la sala, no pudieron dar cuenta de los problemas acústicos puestos en evidencia en el diagnóstico auditivo.

### CONCLUSIONES PRELIMINARES 1

De las mediciones físicas estándar, tanto las realizadas en el año 1999 como las realizadas bajo norma ISO-3382 en el año 2010, no se deducen las características acústicas percibidas. Sólo los valores de TR y C80 a 63 Hz estarían señalando una leve carencia en la llegada de energía de baja frecuencia a la platea. La Claridad en la región entre 125 y 2000 Hz, cercana a 0 dB, estaría indicando lo contrario, una gran cantidad de energía tardía en dichas bandas.

Se decidió, entonces, realizar mediciones del campo temprano diseñadas *ad-hoc*, en línea con la hipótesis central de este trabajo, para intentar determinar las causas del comportamiento acústico revelado por la prospección auditiva.

### MEDICIONES DEL PATRÓN TEMPORAL DE LA ENERGÍA TEMPRANA

Se diseñaron, en consecuencia, una serie de mediciones del patrón temporal de la energía temprana.

De todos los resultados obtenidos, en la Figura 4.11 se muestra a modo de ejemplo la respuesta al impulso tomada en la posición 01 de platea -detrás de la 5ª fila de butacas, a 1 m del centro de simetría longitudinal de la sala-. Esta ubicación era representativa de las características señaladas en la platea: falta de graves, sonido plano y distante, baja sensación de “estar envuelto por el sonido”, desbalance orquestal y cuerda sin cuerpo.

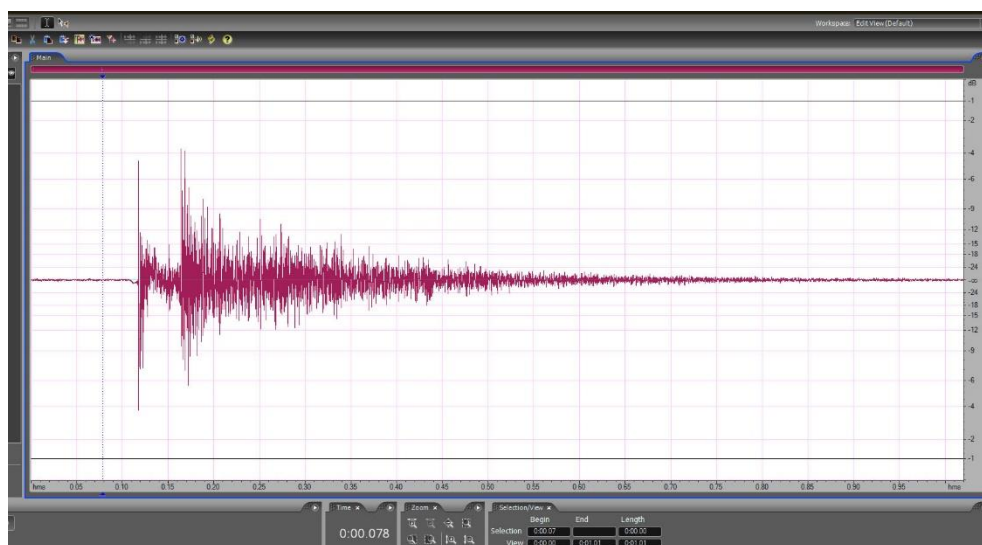


Figura 4.11. Respuesta al impulso obtenida en la posición 01.

Es notoria la ausencia de energía temprana entre la señal directa y la primera reflexión significativa, que llega con un retardo de 70 ms. De acuerdo con este nuevo dato, la causa de la percepción deficiente en bajas frecuencias se debería, entonces, a una ausencia de energía temprana y no a una ausencia de reverberación estadística en baja frecuencia. Este resultado contradice uno de los postulados centrales del modelo estándar de Sabine y refuerza la hipótesis central de esta tesis, es decir la existencia de un vínculo consistente entre la calidad sonora y la estructura del campo acústico temprano.

También se midió la *Fracción de energía lateral temprana* LF. En la posición 01 del ejemplo presentó un valor de 9%, muy por debajo del mínimo de 30% recomendado en la bibliografía especializada. La falta de cuerpo en el sonido de la sección de cuerdas, el sonido “plano” y distante y la falta de sensación de “estar envuelto por el sonido”, podían derivarse de un marcado déficit de energía lateral temprana.

### **CONCLUSIONES PRELIMINARES 2**

A partir de las mediciones del patrón temporal de la energía temprana y de la fracción lateral de energía, y de una interpretación basada en el modelo propuesto en este trabajo, se pudieron identificar las principales causas físicas de los defectos acústicos percibidos en la posición 01 en la platea de la sala:

- Un déficit de energía temprana entre 5 ms y 70 ms.
- Falta de energía lateral temprana en los primeros 200 ms.

Estas conclusiones fueron de especial interés para el desarrollo de esta tesis porque su hipótesis central está fundada precisamente en la relevancia del campo acústico temprano. La verificación experimental, sin embargo, requería necesariamente la intervención de la sala.

El siguiente paso fue determinar las características acústico/arquitectónicas responsables del particular comportamiento acústico en la platea. Para identificar dichas causas se desarrolló un modelo digital *ad-hoc* de la Sala Ginastera.

## **4. DESARROLLO DE UN MODELO DIGITAL DE SIMULACIÓN ACÚSTICA DE LA SALA GINASTERA**

El modelo digital se desarrolló a partir del Software base *Catt-Acoustic-V8*, que utiliza los métodos de imágenes virtuales y trazado de rayos. Diferentes características y

algoritmos de cálculo fueron modificados para adecuarlo al caso bajo estudio. El modelo se confeccionó en base a la siguiente información:

- Planos de la sala (en papel y AutoCAD).
- Resultados de las mediciones de campo acústico y ruido realizadas el 22/12/2010.
- Inspecciones oculares y fotografías de la sala.

Los coeficientes de absorción de las superficies se tomaron de las mediciones en sala, de mediciones realizadas en laboratorio (corregidas según recomendaciones ISO) y/o de tablas confiables.

#### **CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO GEOMÉTRICO VECTORIAL**

En las figuras que siguen se muestran algunas imágenes del modelo geométrico desarrollado. Sus características más destacadas fueron:

- Sala con ocupación completa (100 %).
- Grandes superficies (escenario, cielorraso, zócalo, etc) con absorción y difusión acústica según cada material.
- Resto de las superficies con absorción residual (Beranek, 1998).
- Difusión global media (Coef. Lambert = 20 %).
- 40.000 rayos por octava.
- Tiempo de corte de la simulación = 3500 ms.

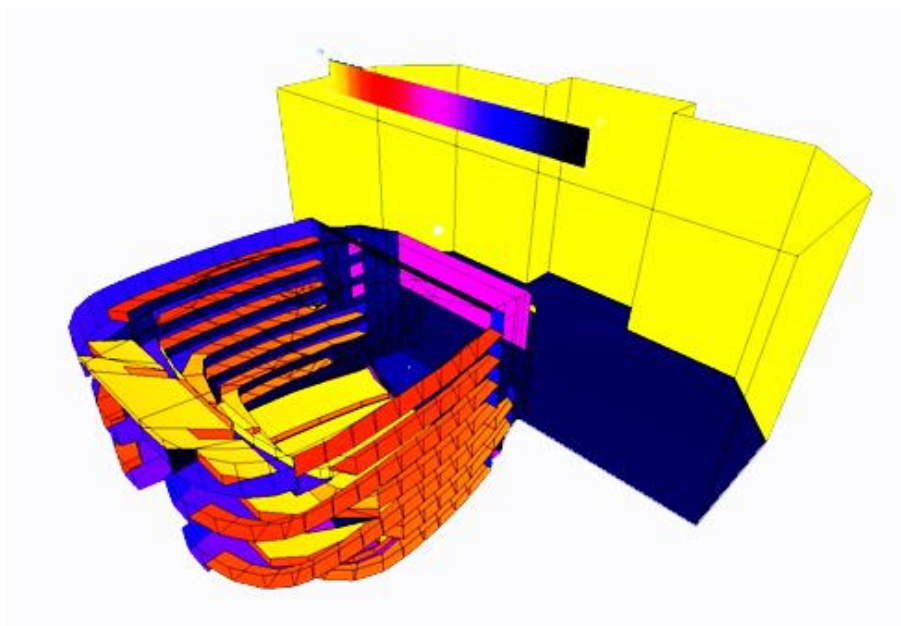


Figura 4.12. 3D del modelo digital en CATT-Acoustic de la sala Ginastera.

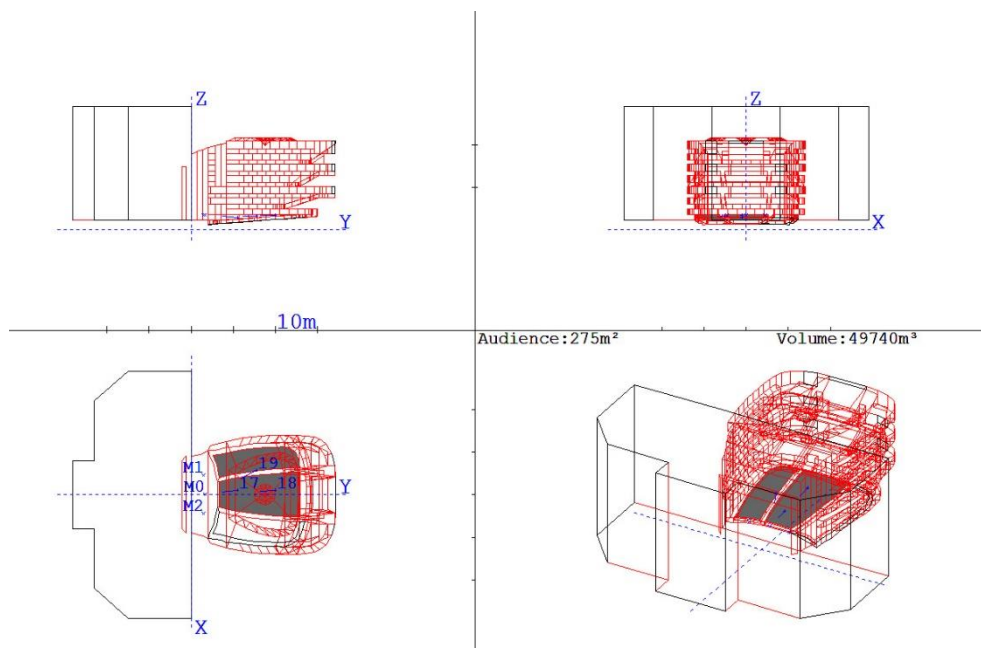


Figura 4.13. Vistas del modelo vectorial de la sala Ginastera.

El modelo resulta eficaz, es decir que posee la capacidad de predecir el comportamiento de un campo acústico real, si los datos con los que se lo confeccionó son correctos. En el caso de una sala nueva, todavía no construida -como en nuestro estudio de caso N° 2-, no hay ninguna opción, sólo resta esperar a tener la nueva sala completa para comprobar su eficacia. En el caso del Teatro Argentino, sin embargo, la sala existía y pudimos emplear las mediciones realizadas para ajustar los valores del modelo con gran precisión.

#### AJUSTE DEL MODELO DIGITAL

El modelo acústico digital fue ajustado en base a la medición realizada en la Sala Ginastera el día 22 de diciembre de 2010. Los resultados obtenidos en las simulaciones a partir del modelo se contrastaron con las mediciones realizadas en la sala. Se ajustaron los valores de absorción y difusión y el resultado final se consideró satisfactorio. En la Figura 4.14 se puede ver una comparación entre la simulación del T30 y la medición en sala del mismo parámetro.

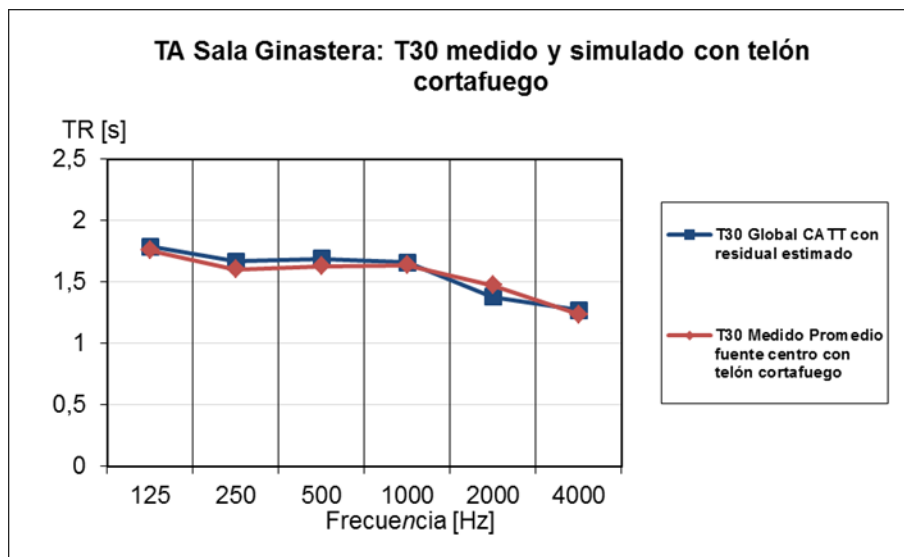


Figura 4.14. Comparación entre los resultados obtenidos con el modelo digital y las mediciones realizadas en la sala.

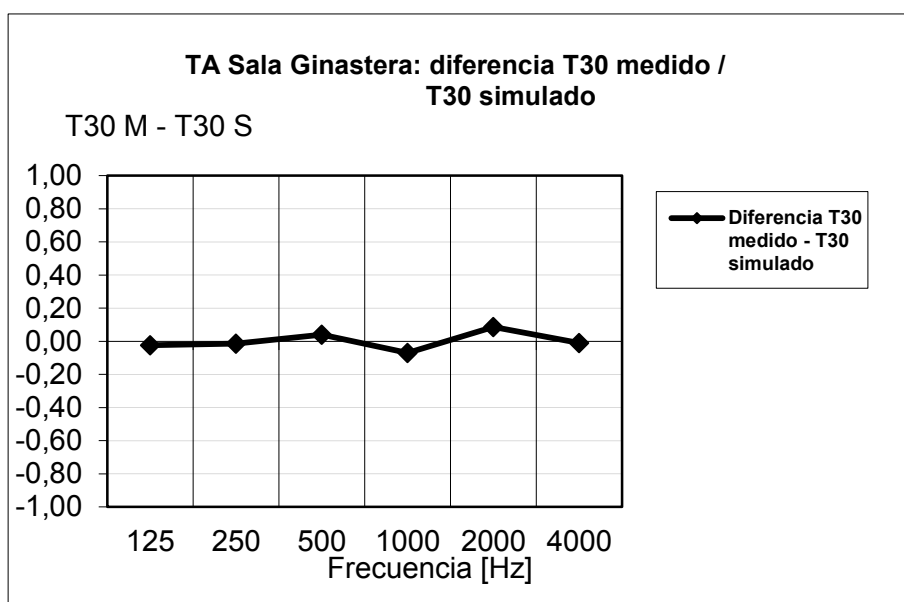


Figura 4.15. Error absoluto de la simulación digital.

En ningún caso el error absoluto fue superior al limen para el T30, de 0,1 s (Figura 4.15). Por lo tanto, el modelo pudo ser aplicado para predecir diferentes configuraciones en la sala Ginastera y resultó válido en tanto predictor de los parámetros acústicos definidos en la Norma ISO-3382.

#### RESULTADOS GENERALES DE LAS SIMULACIONES

Se reprodujeron en el modelo digital las mismas condiciones definidas para las mediciones realizadas el el 22/12/2010. Es decir, telones de textil y cortafuego en

posición, ubicación de las fuentes y posición de los puntos de medición. Se agregaron ubicaciones extra que, en principio, podían aportar información adicional de valor. En las Figuras 4.16 a 4.20 se pueden ver algunos de los resultados de las simulaciones en un punto de medición cerca del centro de la platea (Basso, 2016).

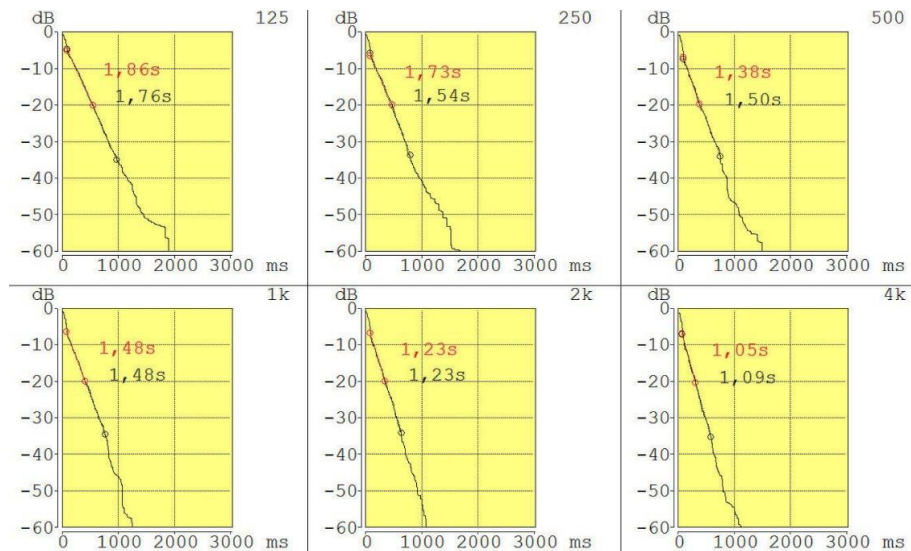


Figura 4.16. Curvas de decaimiento filtradas por octava - simulación en la posición 18 en platea.

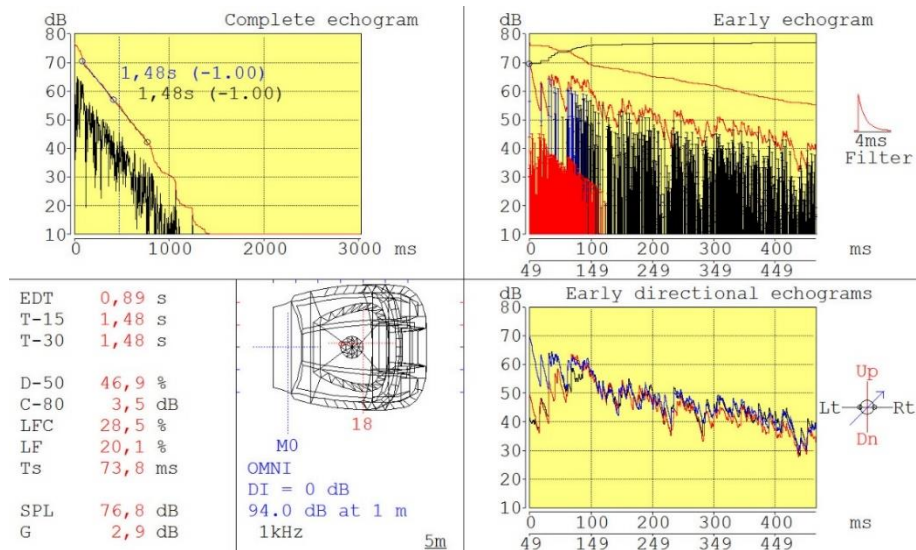


Figura 4.17. Resultado de la simulación en la posición 18 en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

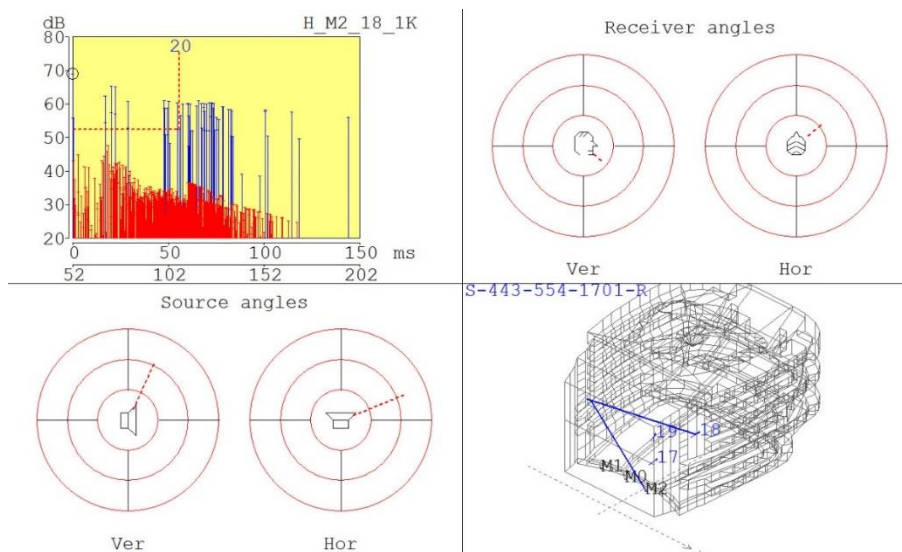


Figura 4.19. Reflectograma en la posición 18 en platea para una frecuencia de 1000 Hz.

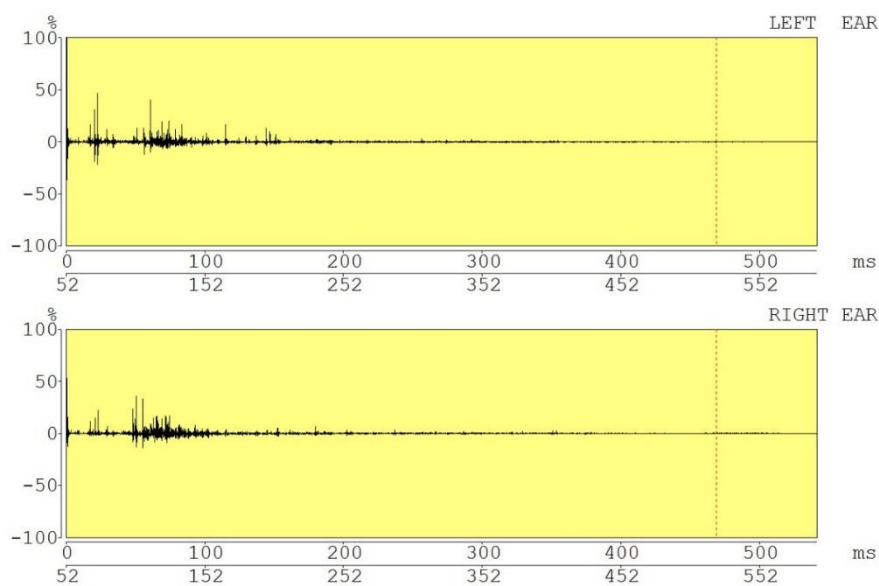


Figura 4.20. Respuesta al impulso en la posición 18 en platea.

En la Figura 4.21 se puede ver la distribución espacial en platea de algunos de los parámetros acústicos más significativos.



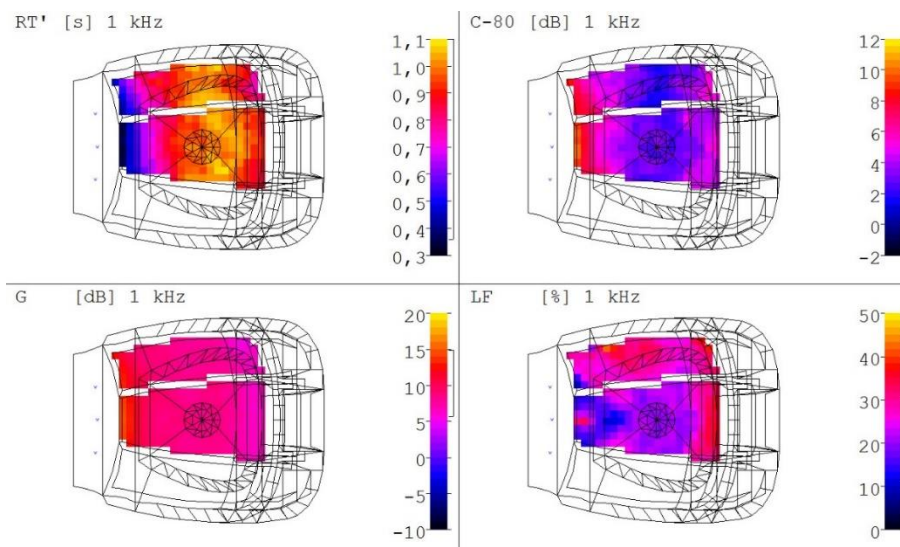


Figura 4.21. Distribución espacial en platea de algunos parámetros ISO 3382 (RT, C80, G y LF) para una frecuencia de 1000 Hz.

La gran cantidad de datos aportados por la simulación permitió un análisis detallado y profundo del campo acústico de la Sala Ginastera. En el apartado que sigue se sintetizan los resultados de dicho estudio.

## 5. ESTUDIO ACÚSTICO EN BASE AL MODELO DIGITAL

En lo que sigue se muestra un resumen del análisis de los parámetros acústicos físicos definidos por la norma ISO 3382 en condiciones controladas.

### COMPORTAMIENTO ACÚSTICO GENERAL

#### TIEMPO DE REVERBERACIÓN GLOBAL

Los valores de TR simulados y medidos fueron similares y adecuados para un teatro de ópera de acuerdo a la literatura especializada (Figura 4.9). La falta de reverberación percibida en platea, que se manifestó en las encuestas, no estaba ocasionada por una carencia en el valor global de la reverberación.

#### CALIDEZ

La razón global para bajas frecuencias  $-BR_{Global-}$ , medido a sala desocupada, fue de 1,01. El  $BR_{global}$  simulado en el modelo virtual fue de 1,02. Ambos valores cumplen con la condición impuesta de  $BR_{global} > 1$  (Barron: 1995; Bradley y Soulodre, 1995), pero resultan algo escasos frente a la recomendación de Hidaka y Beranek (2000), que sugieren que el BR debe situarse entre 1,1 y 1,45 en salas con TR de 1,8 s o menores,

y entre 1,1 y 1,32 en teatros de ópera. Era lógico suponer, sin embargo, que el BR aumentara a sala ocupada.

#### IVEL DE PRESIÓN SONORA SPL E INTENSIDAD ESTANDARIZADA $G_{10}$

Los oyentes manifiestan percibir falta de sonoridad en platea. Esta carencia no se corresponde con los niveles acústicos de presión medidos (Figura 4.22). Sin embargo, en las simulaciones con cámaras de escenario similares a las utilizadas durante los conciertos se detectó muy poca energía temprana en platea.

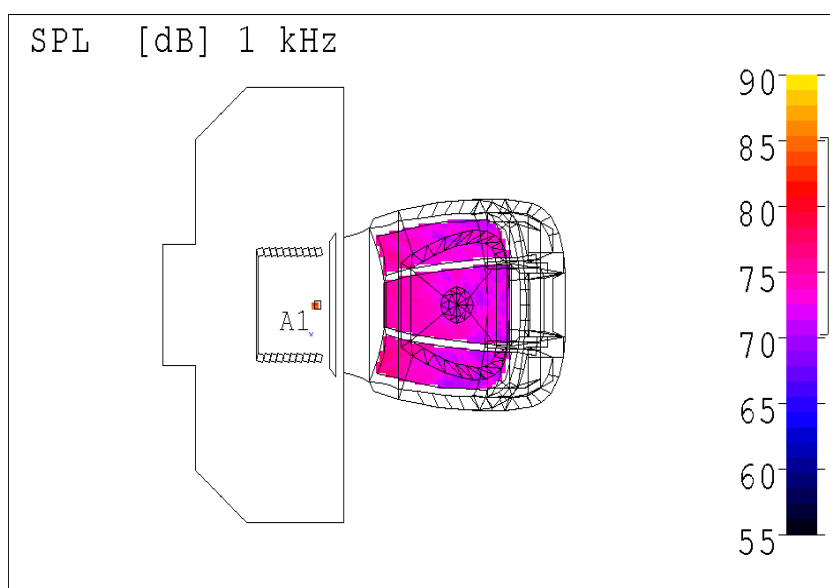


Figura 4.22. SPL en platea con cámara de escenario absorbente.

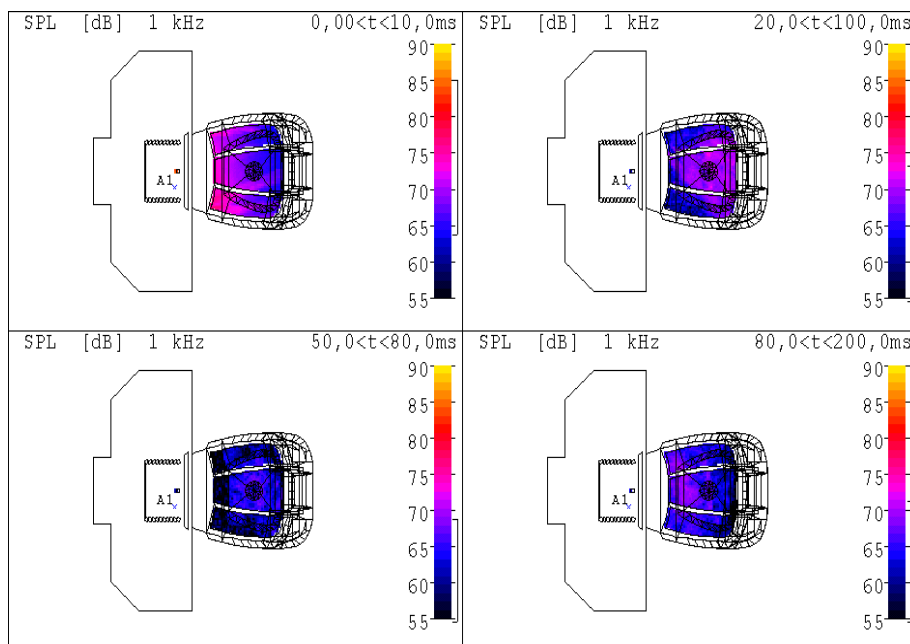


Figura 4.23. SPL en platea con cámara de escenario absorbente ponderado a través de diferentes ventanas temporales.

El análisis de la evolución del nivel sonoro en platea, ponderado a través de diferentes ventanas temporales, da cuenta de la escasa sonoridad referida por los oyentes consultados. Este fenómeno se analizó en detalle en cada punto seleccionado de la sala.

En cuanto al factor de sonoridad relativa  $G_{10}$ , los valores simulados con cámara de escenario absorbente quedaron comprendidos entre -1,5 y 1,7 dB (Figura 4.24). Los recomendados por Yoichi Ando son  $G_{10} = (4 \pm 1)$  dB (Ando, 1998).

Cabe aclarar que los valores globales de SPL y  $G_{10}$  son fuertemente dependientes del diseño de la cámara de escenario. El criterio de diseño para dicha cámara será, llegado el momento, el de alcanzar los valores recomendados en la literatura especializada con la menor dispersión espacial posible.

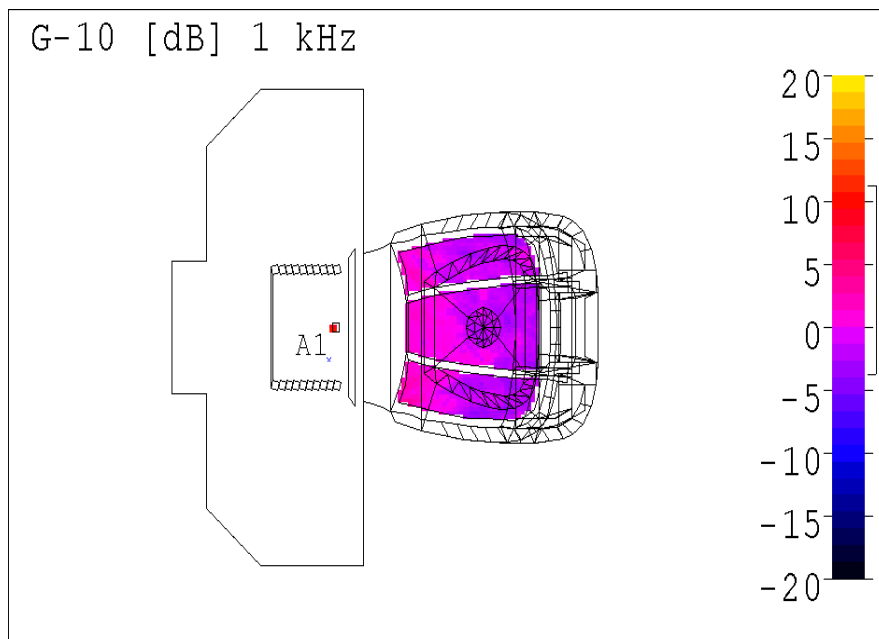


Figura 4.24. G10 en platea con cámara de escenario absorbente.

#### ENERGÍA LATERAL TEMPRANA LEF2

La Fracción de energía lateral temprana (LEF2) en platea, medida con cámara de escenario absorbente, se puede ver en la Figura 4.25.

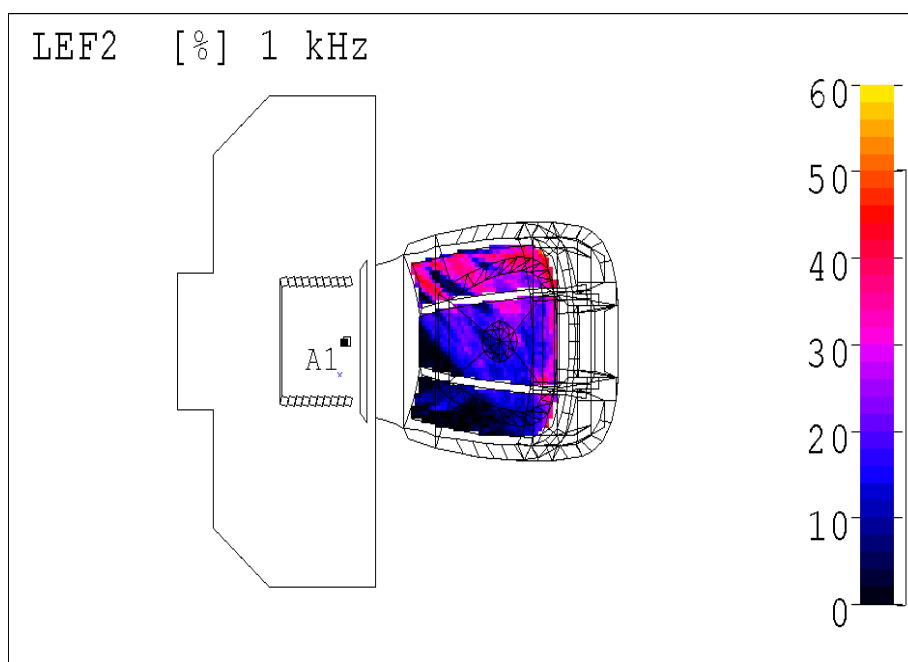


Figura 4.25. LEF2 en platea con cámara de escenario absorbente y fuente desplazada.

Los valores de la LEF2 en la platea central quedaron comprendidos entre 2% y 25%, valores muy bajos, más aún si se toma en consideración que la fuente está desplazada lateralmente hacia la izquierda. La evolución temporal de la LEF2 pone en evidencia la escasez de energía lateral temprana en platea, que se correlaciona con los resultados de la encuesta de opinión, en la que los oyentes manifestaron oír un “sonido plano y no envolvente” en platea.

En contraposición, la Fracción de energía lateral temprana (LEF2) en la bandeja 3, simulada con cámara de escenario absorbente, presenta los valores que se pueden ver en la Figura 4.26.

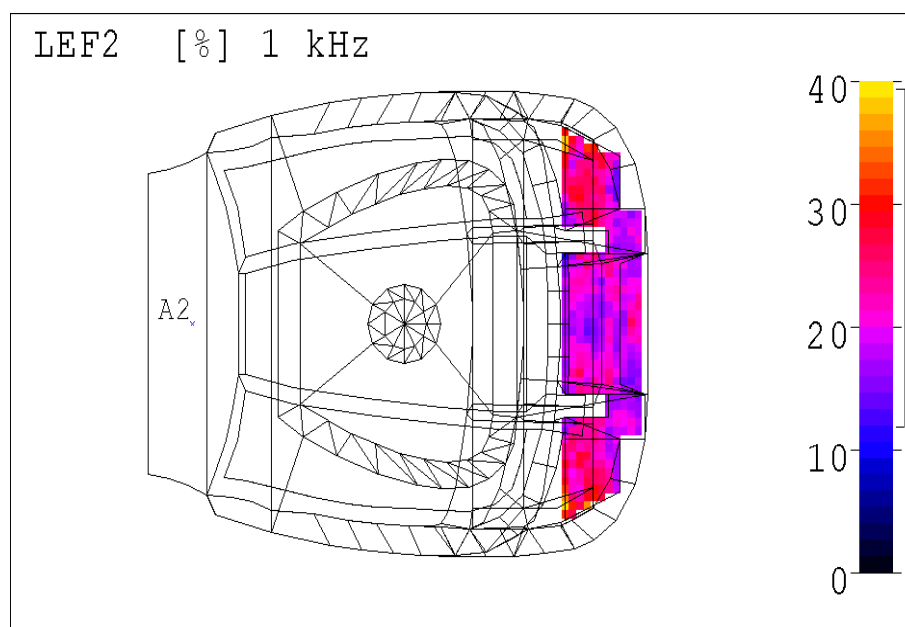


Figura 4.26. LEF2 en platea con cámara de escenario absorbente.

Los valores de LEF2 en la bandeja 3 están comprendidos entre 18% y 40%, más altos que en platea y dentro de los recomendados en la literatura especializada. En este caso la fuente se colocó centrada en el escenario, por lo cual los valores de LEF2 presentan un desvío sistemático negativo respecto de los de la Figura 4.25 en platea. La evolución temporal de LEF2 también muestra una correcta distribución temporal de la energía lateral, que se correlaciona eficazmente con las respuestas positivas de los oyentes en la encuesta de opinión (muchos de los consultados mencionaron el carácter “envolvente” del sonido en la bandeja superior).

### ECOS EN ESCENARIO

En el escenario se percibieron varios ecos perfectamente audibles, que interfieren en la interpretación musical tanto de algunos instrumentos (trompeta, percusión, flautín) como de los cantantes (datos compilados a través de comunicaciones personales).

En una simulación *ad-hoc* para detectar las superficies causantes de tales ecos, se encontró que los más nocivos ocurren a 141 y 172 ms después del sonido directo (Figura 4.27). Estas reflexiones cumplen con las condiciones de audibilidad del criterio de Haas (Haas, 1951).

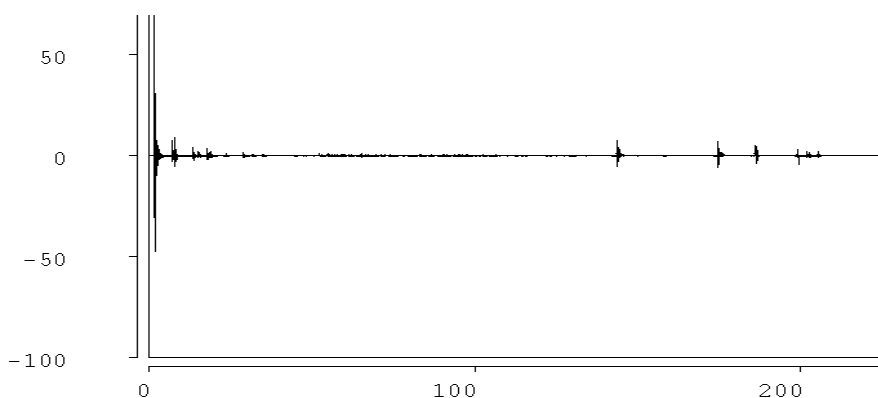


Figura 4.27. Respuesta al impulso en el escenario. Se pueden ver los ecos a 141 y 172 ms.

El eco a 141 ms se compone de dos reflexiones simétricas que recorren la trayectoria que se muestra en la Figura 4.28.

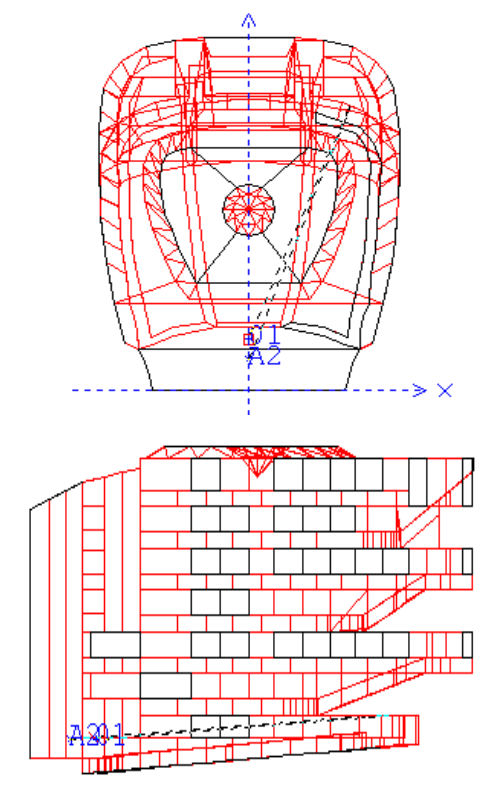


Figura 4.28. Trayectoria de la reflexión causante del eco a 141 ms.

El eco a 172 ms se compone de una reflexión que sigue el camino que se detalla en la Figura 4.29.

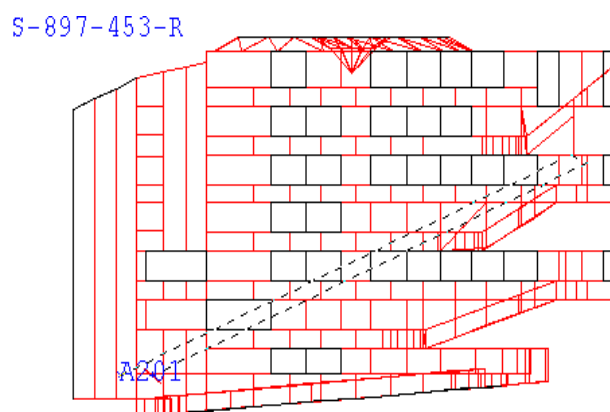


Figura 4.29. Trayectoria de la reflexión causante del eco a 172 ms.

La aparición de potentes fuentes acústicas en la parte posterior de la sala se puede ver con claridad en la distribución de fuentes virtuales que se muestra en la Figura 4.30.

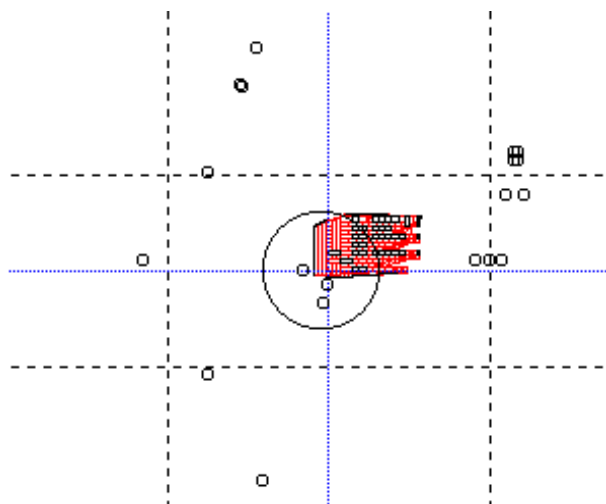


Figura 4.30. Esquema de la ubicación de las fuentes virtuales en el plano Y-Z.

#### **ANÁLISIS DE LAS PRIMERAS REFLEXIONES EN TRES PUNTOS DE LA SALA**

Para evaluar con mayor detalle el comportamiento de la sala fue necesario analizar cuidadosamente algunos puntos determinados en los planos de audiencia. Se eligieron para ello dos ubicaciones en platea, una en el plano medio cerca del escenario -posición 11, fila 6, asiento 1-, otra más alejada y desplazada lateralmente -posición 19, fila 18, asiento 17-, y una en la tercera bandeja -posición 44-.

Con relación a la platea, se había detectado en la prospección auditiva una reflexión de gran intensidad proveniente del tímpano sobre el proscenio. Obviamente esta reflexión aislada actúa con módulo y fase sobre el sonido directo, provocando interferencias constructivas y destructivas periódicas en el espacio. El fenómeno fue mencionado por numerosos oyentes calificados cuando la fuente acústica se ubicaba tanto sobre el proscenio como en el foso de orquesta.

En lo que sigue se analizan en detalle los comportamientos acústicos en las posiciones referidas según el esquema de Hidaka y Beranek (Hidaka y Beranek, 2000), excitadas con una fuente omnidireccional ( $DI = 0$ ) con un SPL de 94,4 dB a 1 m y a 1 kHz, ubicada en el centro del proscenio.

#### **POSICIÓN 11 EN PLATEA**

El detalle de las posiciones de la fuente y del oyente se puede ver en la Figura 4.31.



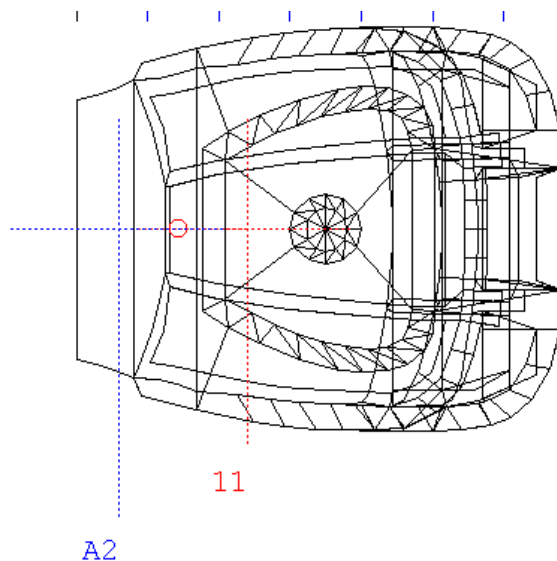


Figura 4.31. Posiciones de la fuente A2 y del oyente 11.

El reflectograma simulado en condiciones de medición, con el telón cortafuego en posición, muestra varias reflexiones intensas provenientes del telón cortafuego, Figura 4.32.

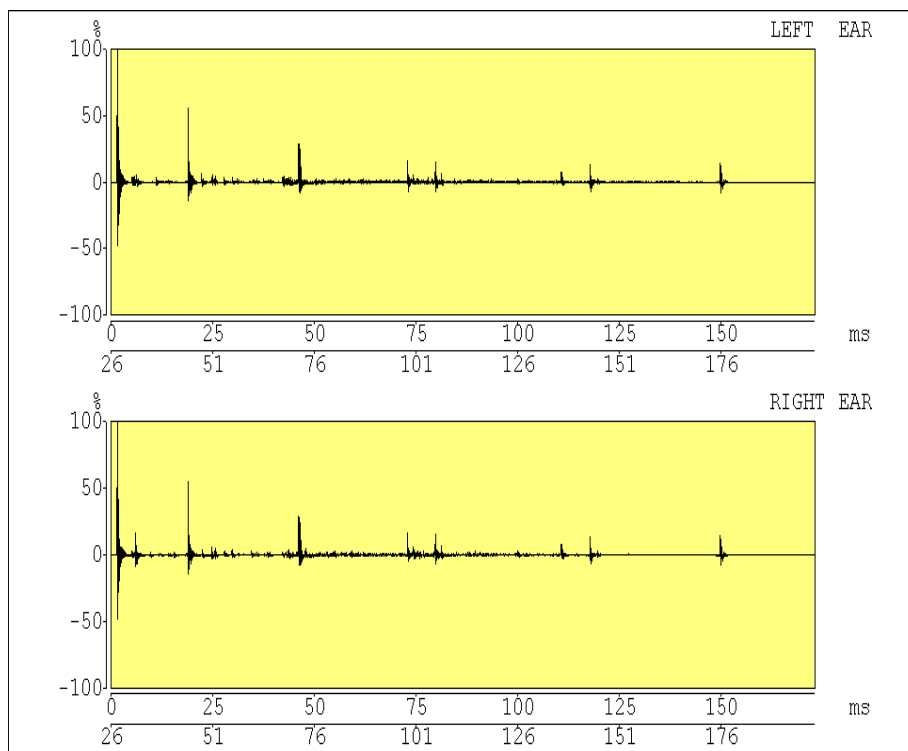


Figura 4.32. Respuesta al impulso. Fuente A2, posición 11, con telón cortafuego en posición.

Para identificar claramente el aporte de la sala e independizarla del telón reflectante, se volvió a simular la medición anterior con un telón absorbente (Bradley: 1996), Figura 4.33.

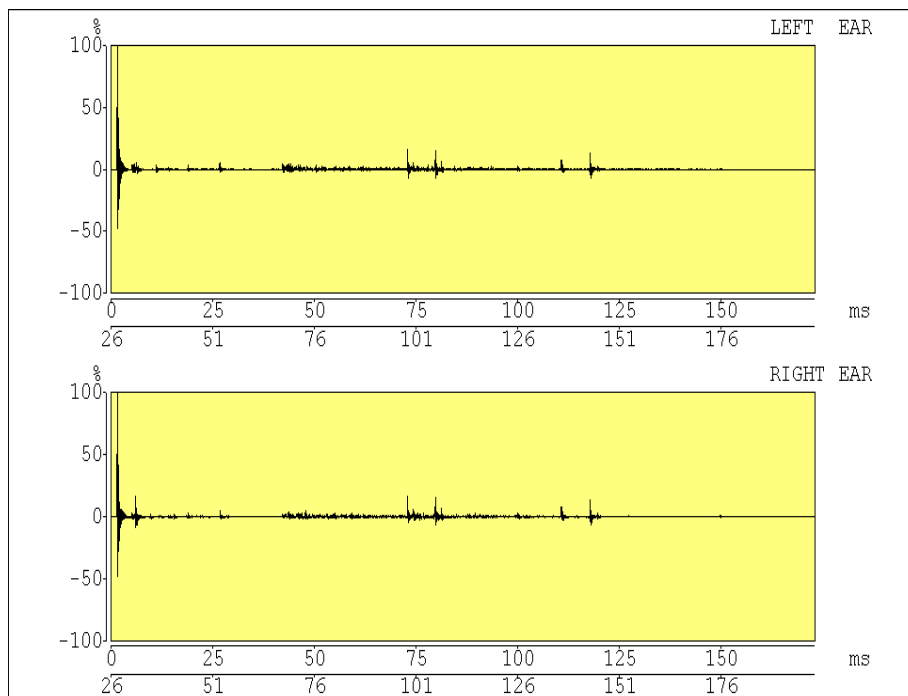


Figura 4.33. Respuesta al impulso. Fuente A2, posición 11, con telón absorbente.

La comparación entre las figuras anteriores permite detectar con claridad la contribución del telón reflectante, que actúa como una primera cámara elemental de escenario. Las fuertes reflexiones a 72 ms y 78 ms, que por otra parte son las primeras de importancia en llegar a la posición 11, provienen de la superficie sobre el escenario (tímpano). El análisis de rayos de la Figura 4.34 muestra con detalle el recorrido de la reflexión a 72 ms respecto del rayo directo.

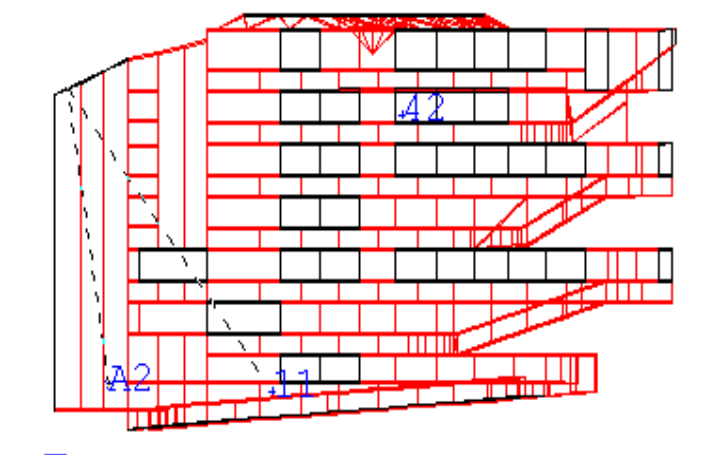


Figura 4.34. Recorrido desde la fuente A2 hasta la posición 11 con retardo de 72 ms.

El reflectograma de la Figura 4.33 permite establecer lo siguiente:

- El retardo de la primera reflexión ITDG, determinado en este caso por la reflexión que proviene del tímpano de la sala. Numerosos autores aconsejan mantenerlo por debajo de los 20 ms (Ando, 1997 y 1998; Bradley, 1996; Hidaka y Beranek, 2000b; Barron, 2000). Si supera los 30 ms la calidad acústica de la sala se resiente notablemente. El valor de ITDG = 72 ms resulta ser decididamente inadecuado.
- La cantidad  $N_E$  de reflexiones significativas en los primeros 80 ms (llamada *Textura* por Beranek) es muy escasa, con un valor de  $N_E = 2$ . En las buenas salas una butaca en el centro de la platea posee al menos 15 reflexiones importantes en los primeros 80 ms (Beranek, 1996; Hidaka y Beranek, 2000).
- La evaluación visual de los primeros 200 ms del reflectograma, aunque defina un criterio no cuantificable, es recomendada por gran cantidad de especialistas. Una sala de buen comportamiento acústico debe presentar un gran número de reflexiones tempranas, uniformes pero no igualmente espaciadas, sin que ninguna domine al conjunto. En la Figura 4.33 se ve claramente que no ocurre así en la posición 11 en platea.

El criterio espacial es de fundamental importancia en el diagnóstico acústico que nos ocupa. Para algunos autores (Schoroeder, 1979; Ando, 1979; Kuttruff, 1991; Ando, 1998) es el rasgo perceptual más importante. Los parámetros acústicos físicos que se correlacionan significativamente con el criterio espacial son la *Fracción lateral temprana* LEF y el *Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural* IACC.

Para la posición 11, la LEF2 es de 16,5%, un valor bajo para los estándares recomendados. En la Figura 4.35 se puede ver la distribución global del parámetro medido con el agregado de una cámara de escenario absorbente. Cabe destacar que la posición descentrada de la fuente tiende a aumentar el valor de LEF respecto del esperable para una fuente colocada en el centro del proscenio.

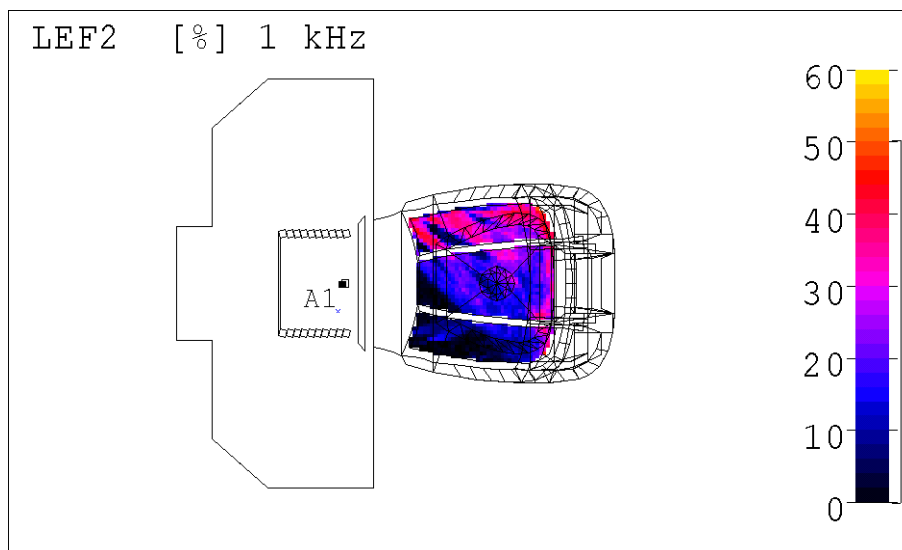


Figura 4.35. Fracción lateral temprana LEF con cámara de escenario absorbente.

De todos los parámetros físicos testeados recientemente en la bibliografía especializada, el *Factor de Espacialidad* [1-IACC] es el que mejor se correlaciona con la calidad acústica de una gran sala para música (Beranek, 1996). El valor de IACC obtenido para la posición 11 es de:

$$\begin{aligned} \text{IACC wideband} &= 0,94 \\ \text{IACC octaves 125-4kHz} &= \langle 1,00 \ 1,00 \ 0,95 \ 0,87 \ 0,94 \ 0,92 \rangle \end{aligned}$$

que corresponde a un Factor de Espacialidad [1-IACC] = 0,06. El valor recomendado por Ando, Barron e Hidaka es de [1-IACC] > 0,60, muy alejado del obtenido en la posición 11.

El análisis del recorrido de rayos y el de ubicación de las imágenes virtuales de cada reflexión permiten concluir que los bajos niveles de espacialidad se generan en las escasas reflexiones laterales tempranas de la sala. Para agravar la situación, las dos primeras reflexiones provienen del tímpano y no de una superficie lateral, generando imágenes frontales fuertemente correlacionadas (Figura 4.34).

La principal causa de esta carencia de reflexiones laterales tempranas en la platea se encuentra en el gran ancho de la sala, unido al diseño de los palcos y de las bandejas superiores: su escasa altura impide que el sonido ingresante sea devuelto por cada diedro pared trasera/cielorraso hacia la platea.

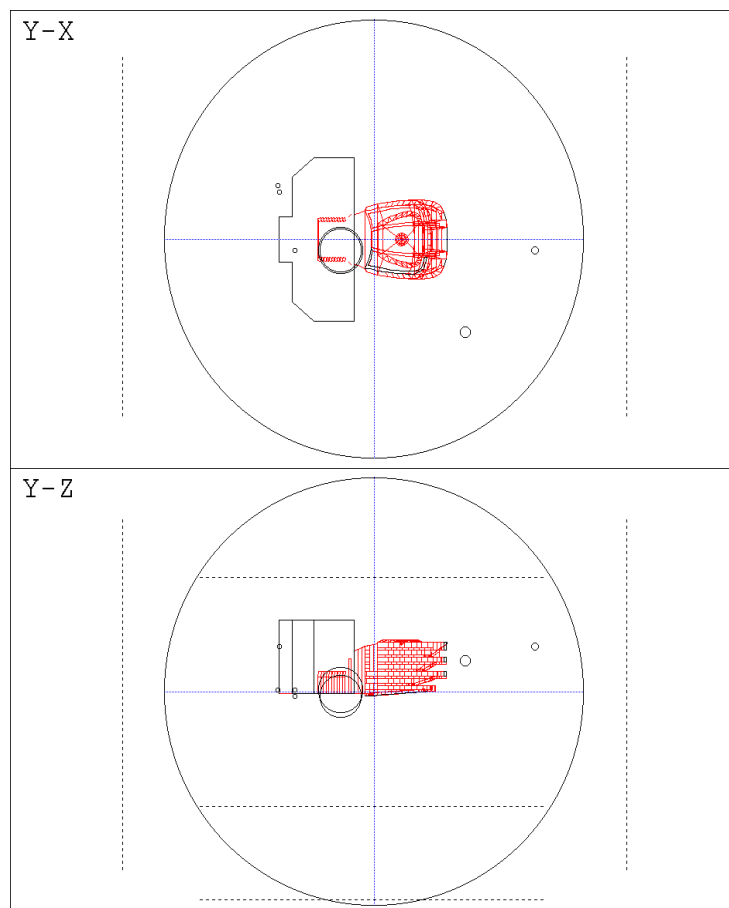


Figura 4.36. Imágenes virtuales vistas desde la posición 11 con cámara de escenario absorbente.

Si se aplican las hipótesis planteadas en esta tesis, al menos para la posición 11 el análisis no estándar del campo temprano da cuenta de las características percibidas en dicha butaca.

#### **POSICIÓN 19 EN PLATEA**

El detalle de las posiciones de la fuente y del oyente se muestra en la Figura 4.37.

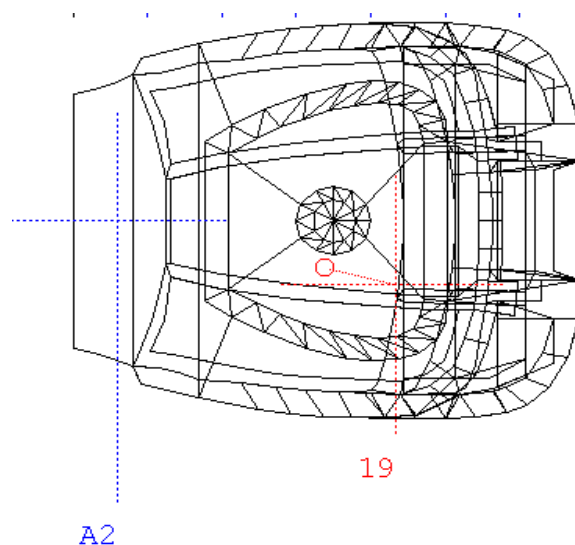


Figura 4.37. Posiciones de la fuente A2 y del oyente 19.

El reflectograma simulado con el telón absorbente (Bradley, 1996) se puede ver en la Figura 4.38.

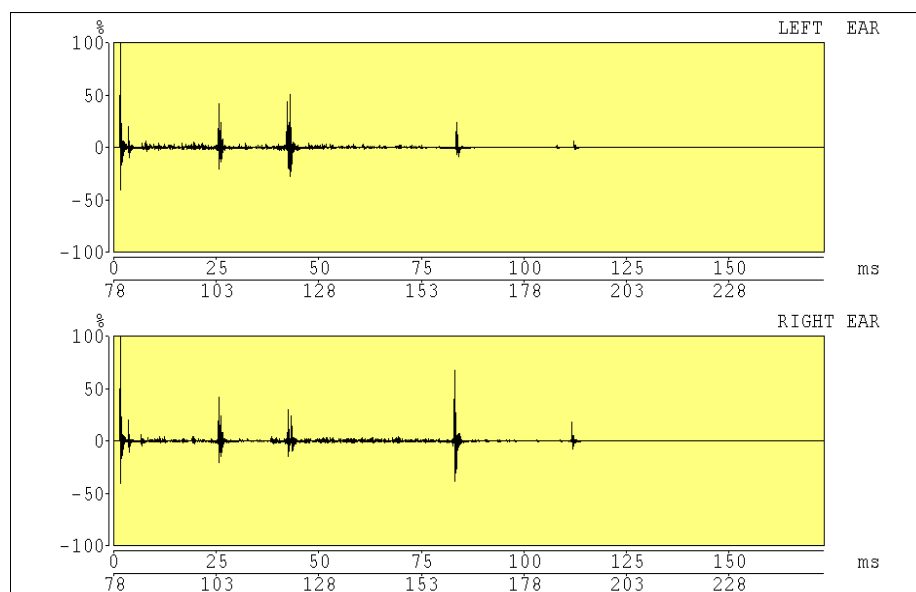


Figura 4.38. Respuesta al impulso. Fuente A2, posición 19, con telón cortafuego absorbente.

Las primeras reflexiones significativas se agrupan en dos paquetes muy apretados. El primero de ellos, con un retraso de alrededor de 26 ms, proviene de trayectorias que involucran las paredes laterales de los palcos de platea y sus cielorrasos correspondientes (Figura 4.39). Estas reflexiones aportan energía lateral temprana a la

posición 19, pero como los ángulos de arribo al oyente son muy pequeños, cercanos a  $5^\circ$ , su contribución a la impresión espacial es escasa (Ando, 1982 y 1997). En las conclusiones del apartado 3 se analizó en detalle este efecto, relacionado íntimamente con la difracción vinculada al efecto de “incidencia rasante” (*seat-dip*) de las butacas (Barron, 1995).

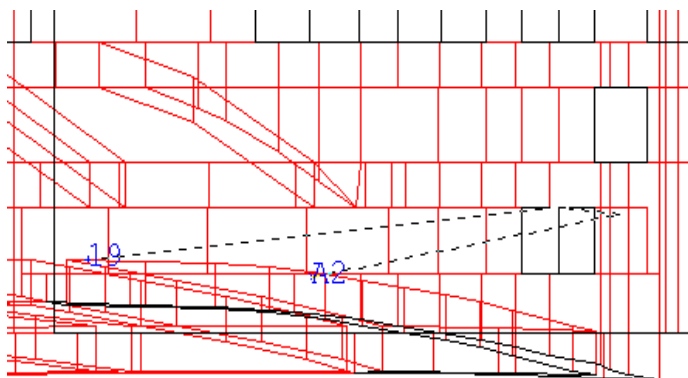


Figura 4.39. Recorrido desde la fuente A2 hasta la posición 19 con retardo de 28 ms.

El segundo paquete, agrupado alrededor de los 42 ms, proviene del cielorraso y del tímpano de la sala (Figura 4.40). Estas reflexiones, que llegan al oyente en su plano medio, tampoco aportan energía lateral significativa.



Figura 4.40. Recorrido desde la fuente A2 hasta la posición 19 con retardo de 42 ms.

De los reflectogramas anteriores se desprende que el retardo de la primera reflexión es de  $ITDG = 24$  ms, valor más cercano al límite superior de 20 ms aconsejado por los autores previamente citados.

La cantidad de reflexiones significativas en los primeros 80 ms (Beranek, 1996) es de  $N_E = 3$  para el oído izquierdo y de  $N_E = 4$  para el oído derecho, pocas con relación al mínimo de 15 recomendado. La evaluación visual de los primeros 200 ms del reflectograma no mejora respecto al de la posición 11.

Los criterios espaciales para la posición 19 dan un LEF2 = 18,0%, valor bajo para los estándares recomendados (pero superior al de la posición 11).

El valor de IACC es, en la posición 19:

IACC wideband = 0,36  
IACC octaves 125-4kHz = <0,97 0,96 0,89 0,55 0,43 0,20>

Por lo tanto el *factor de espacialidad* queda  $[1 - \text{IACC}] = 0,64$ , valor adecuado según Ando, Barron e Hidaka. Sin embargo es necesario tomar en cuenta que estamos evaluando un ecograma con muy poca energía temprana, condición que limita la utilidad de este parámetro. Las imágenes virtuales definidas desde la posición 19 se pueden ver en el gráfico de la Figura 4.41.

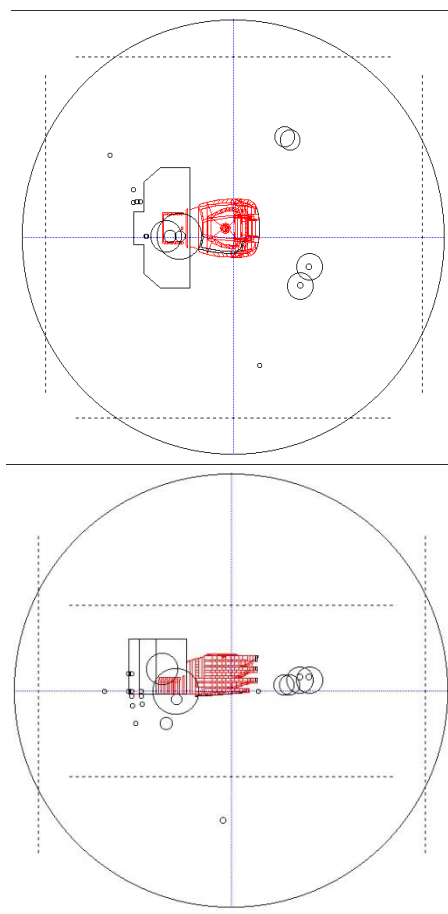


Figura 4.41. Imágenes virtuales vistas desde la posición 19 con cámara de escenario absorbente.



Aunque las fuentes virtuales siguen siendo escasas, son más abundantes que en la posición 11.

Las razones expuestas, sumadas al lento crecimiento temporal del nivel de presión sonora, un muy bajo valor de la intensidad estandarizada ( $G_{10} = -2,9$  dB) y del tiempo de decaimiento temprano (EDT = 0,62 s) explican las respuestas de los oyentes en las comunicaciones personales: en la posición 19 la sala suena “pobre”, aunque un poco mejor que en la posición 11.

### POSICIÓN 44 EN LA BANDEJA 3

El detalle de las posiciones de la fuente y del oyente se puede ver en la figura 4.42.

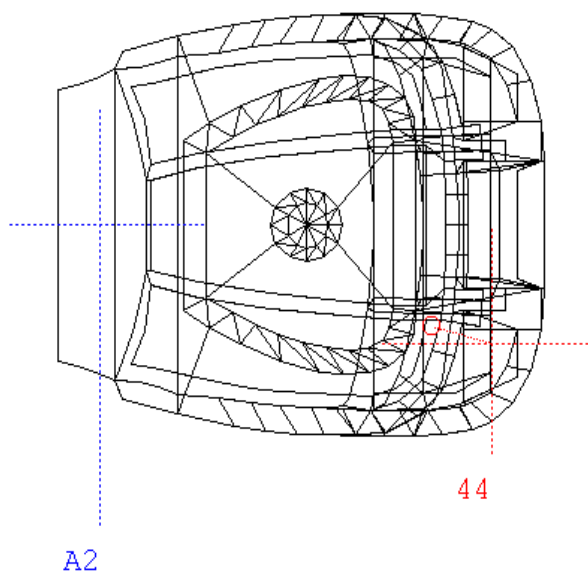


Figura 4.42. Posiciones de la fuente A2 y del oyente 44

La respuesta al impulso con el telón absorbente (esquema de Bradley, 1996) se muestra en la Figura 4.43.

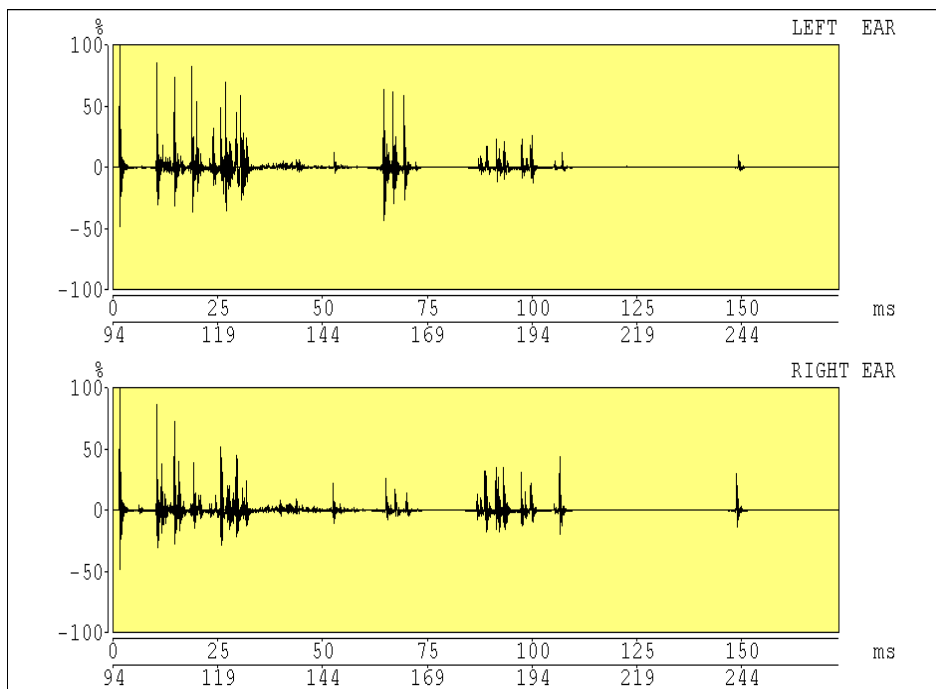


Figura 4.43. Respuesta al impulso. Fuente A2, posición 44, con telón cortafuego absorbente.

Las primeras reflexiones significativas están agrupadas en varios paquetes cerrados, el primero entre 9 ms y 30 ms y el segundo entre 52 ms y 74 ms. Ambos grupos quedan comprendidos en los primeros 80 ms posteriores a la llegada del sonido directo. Esta gran densidad de reflexiones se debe a la intervención del piso del escenario y del cielorraso de la sala. Por ejemplo, en la Figura 4.44 se aprecia el recorrido de la reflexión con un retardo de  $\Delta t = 13$  ms.



Figura 4.44. Recorrido desde la fuente A2 hasta la posición 44 con retardo de 13 ms.

El segundo paquete aporta gran cantidad de energía lateral, pues los recorridos involucran los laterales del proscenio y los antepechos de las distintas bandejas (Figura 4.45).

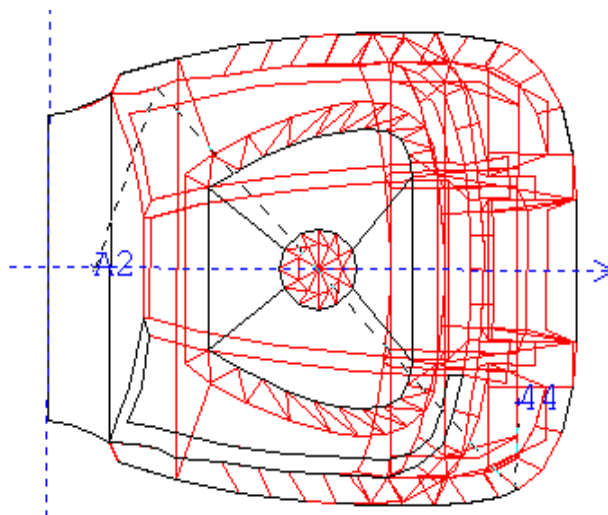


Figura 4.45. Recorrido desde la fuente A2 hasta la posición 44 con retardo de 53 ms.

La respuesta al impulso de la Figura 4.43 permite establecer que el retardo de la primera reflexión (ITDG), provocado por el rebote de la energía en el cielorraso de la sala, es de 9 ms, excelente para una sala de conciertos y ópera.

La cantidad  $N_E$  de reflexiones significativas en los primeros 80 ms (la *Textura* de Beranek) es de  $N_E = 13$ , cercano al recomendado por Hidaka y Beranek (2000).

La evaluación visual de los primeros 200 ms del reflectograma muestra un gran número de reflexiones tempranas, aunque no uniformes ni igualmente espaciadas.

Para la posición 44, la *Fracción lateral temprana* LEF2 llega a un valor de 28,6%, compatible con los estándares recomendados. En la Figura 4.46 se puede ver la distribución espacial de la LEF2 en la totalidad de la bandeja 3.

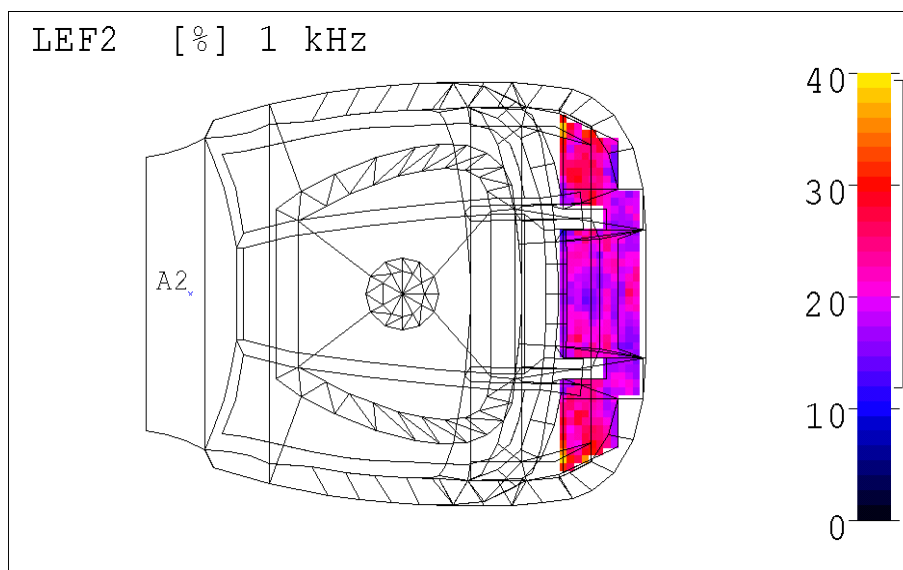


Figura 4.46. Fracción lateral temprana LEF con cámara de escena absorbente en bandeja 3.

En cuanto al *factor de espacialidad*, el valor de IACC obtenido para la posición 44 es de:

$$\begin{aligned} \text{IACC wideband} &= 0,26 \\ \text{IACC octaves 125-4kHz} &= \langle 0,97 \ 0,91 \ 0,63 \ 0,25 \ 0,31 \ 0,26 \rangle \end{aligned}$$

Por lo tanto queda un factor de espacialidad  $[1 - \text{IACC}] = 0,74$ , que cumple cómodamente con el criterio de Ando, Barron e Hidaka de ser mayor que 0,60.

El análisis del recorrido de rayos y el de ubicación de las imágenes virtuales de cada reflexión permiten concluir que los altos niveles de espacialidad percibida se generan en las profusas reflexiones tempranas de la sala dirigidas hacia su parte superior, tal como se puede apreciar en el gráfico de sus imágenes virtuales (Figura 4.47). Las reflexiones tempranas en los dos grandes planos del piso del escenario y del cielorraso se muestran sumamente efectivas.

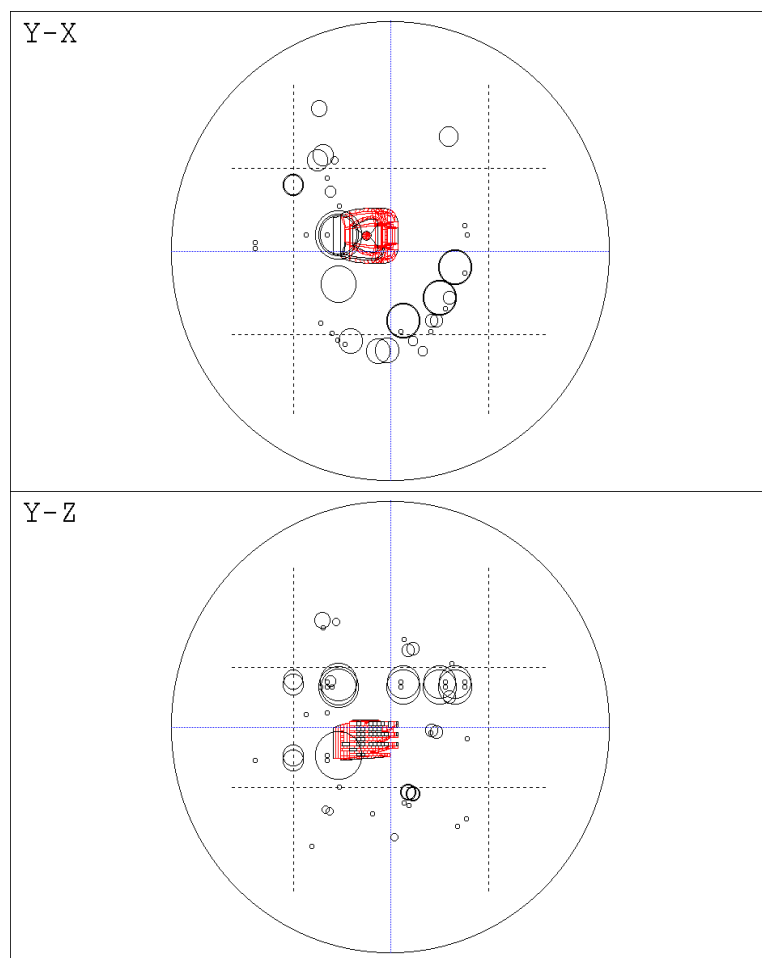


Figura 4.47. Imágenes virtuales percibidas desde la posición 44 con cámara de escenario absorbente.

Los muy buenos valores alcanzados por los parámetros acústicos en la posición 44, evaluados bajo el modelo propuesto en este trabajo, están altamente correlacionados con las opiniones de los oyentes consultados. La totalidad de las respuestas coincidieron en la evaluación positiva de la acústica en la tercera bandeja (comunicaciones personales).

## 6. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACÚSTICO: RESULTADOS

De lo expuesto en los apartados anteriores se pueden extraer las siguientes conclusiones:

### PARÁMETROS ESTADÍSTICOS GLOBALES

- Los parámetros acústicos globales (TR, SPL y  $G_{10}$ , BR) presentan valores adecuados para una sala de conciertos. Este hecho queda corroborado por la

excelente calidad acústica declarada por los oyentes consultados en las bandejas superiores de la sala. Los valores globales dan cuenta de una correcta relación entre el volumen y la absorción acústica y de una geometría general apropiada. De todos los parámetros globales, el más débil es sin duda la relación para bajas frecuencias (BR), situado en el límite inferior del rango de tolerancia.

- Los parámetros acústicos específicos de cada plano de audiencia, o de cada butaca en particular, son muy variables cuando se evalúa el campo acústico temprano. Existen zonas de comportamiento físico/acústico adecuado (incluso excelente, como ocurre en las bandejas superiores) y zonas de comportamiento físico/acústico deficiente (por ejemplo en la platea). Esta disparidad se genera en los diferentes patrones de distribución temporal y espacial de la energía acústica temprana, causadas por las reflexiones en las superficies que rodean la boca de escena, las bandejas, el piso y el cielorraso de la sala.

#### **PARÁMETROS TEMPORALES Y ESPACIALES**

- En las bandejas superiores los parámetros temporales físico/acústicos (ITDG, C80, NE y Factor de Textura) son casi óptimos, y los parámetros físico/acústicos espaciales (IACC, LEF) adecuados. Del análisis de los reflectogramas y de los recorridos de rayos se desprende que existe gran cantidad de energía temprana generada en las reflexiones provenientes de las superficies que rodean la boca de escena, del piso del escenario, del cielorraso de la sala y de los frentes de las bandejas. Esta energía llega desde diferentes direcciones, mucha de ellas no frontales, aumentando la sensación espacial percibida. Los valores acústicos físicos concuerdan con los perceptuales derivados de la encuesta y de las comunicaciones personales, en los que se declara amplia satisfacción con la acústica de la parte superior de la sala.
- En la platea la situación es completamente diferente. Los parámetros temporales físico/acústicos (ITDG, C80, NE y Factor de Textura) son decididamente inadecuados, al igual que los parámetros físico/acústicos espaciales (IACC y LEF). Se puede apreciar en los reflectogramas y en los recorridos de rayos la escasez de reflexiones tempranas por debajo de los 80 ms posteriores a la llegada del sonido directo. En relación a este punto Beranek (2006) expresa: “En las salas A+ existe una sustancial cantidad de reflexiones durante los primeros 80 ms, de aproximadamente la misma intensidad e irregularmente espaciadas. A su vez, el ITDG es pequeño, del orden de los 20 ms. En salas de gran tamaño se deben

proveer superficies reflectantes a fin de reducir este parámetro. Si se exceden los 35 ms se tiene una significativa reducción de la calidad acústica de la sala”.

- Para agravar el cuadro, las primeras reflexiones en llegar a la platea son muy intensas y provienen del tímpano y del cielorraso, generando interferencias muy acusadas con el rayo directo al intervenir en módulo y fase. Estas reflexiones, al arribar en el plano medio de los oyentes, no aportan energía lateral contribuyendo así a la sensación de espacio acústico “plano” y “poco envolvente”.
- La causa de este comportamiento se encuentra en la ausencia de reflexiones significativas que, generadas en las superficies de la sala, se dirijan hacia la zona de platea. Las superficies que rodean la boca de escena, el piso del escenario, el cielorraso y los frentes de las bandejas están orientadas hacia la parte superior de la sala. Los valores acústicos físicos concuerdan con los perceptuales derivados de las encuestas y de las comunicaciones personales.
- Por otra parte, aunque los valores globales de SPL y G10 en platea llegan a alcanzar niveles adecuados, un análisis detallado de su progresión temporal muestra la falta de energía en el campo temprano correlacionado con la sonoridad percibida. Se explica así la falta de sonoridad comentada por numerosos oyentes.
- Otro elemento a destacar, reiterado en varias comunicaciones personales, es la “dureza” o “falta de textura” del sonido en platea. Esta característica es habitual en salas con reflexiones generadas en superficies planas que poseen picos espectrales cercanos a los 1.000 Hz. Beranek (Beranek, 2006) comenta al respecto: “Se sabe que las grandes superficies lisas le confieren una especie de «deslumbramiento acústico (glare)» al sonido”.

#### **RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LA PLATEA**

- El comportamiento en baja frecuencia de la platea de la Sala Ginastera merece un comentario más detallado. Requiere, en principio, un análisis desde la teoría ondulatoria, que el modelo por computadora no puede realizar. Se tiene, no obstante, gran cantidad de información aportada por los datos estadísticos globales, el análisis de los ángulos de llegada de la energía a las butacas, y la inspección de la geometría de las butacas mismas.
- Los datos estadísticos informan que la reverberación global a frecuencias por debajo de 250 Hz, en relación con la correspondiente a frecuencias medias, es baja, mientras que el BR apenas supera la unidad. En este contexto, una ubicación en platea puede responder correctamente en bajas frecuencias solamente si el ángulo

preponderante de llegada de la energía supera determinado valor, estimado en  $15^\circ$  por West y Sessler (1964) y en  $30^\circ$  por Schultz y Watters (Schultz y Watters, 1964). De lo contrario la difracción provocada por la geometría de las filas de butacas da lugar al efecto de “incidencia rasante” (seat-dip). Dadas las características de las butacas de la Sala Ginastera, es lógico suponer una atenuación de -3,5 dB a 200 Hz para sonido rasante, en particular durante los primeros 80 ms después de la llegada del sonido directo (calculado a partir de Ando, 1982 y 1997). En consecuencia, si se combinan estos factores se observa que:

- El tiempo de reverberación a bajas frecuencia es similar al de frecuencias medias ( $BR \cong 1$ ).
- Los ángulos de llegada a platea son muy pequeños, menores a  $15^\circ$  (rasantes).
- Probablemente ocurra una fuerte atenuación por debajo de los 200 Hz provocada por la difracción en las butacas.
- Las reflexiones no rasantes que llegan a la platea dentro del límite de los 80 ms provienen del tímpano y del cielorraso. Carecen de energía lateral y sus características -retardo y nivel- las convierten en causa de coloración y de heterogeneidad acústica. Tampoco aportan la energía temprana de baja frecuencia necesaria para compensar el efecto de la incidencia rasante.
- Estos factores contribuyen a reducir la “calidez acústica” de la platea. Barron considera que para compensar el efecto del sonido rasante el BR debe ser por lo menos de 1,4 (en la sala se midió un BR de 1,01). Este autor manifiesta que “... los bajos abundantes y plenos son considerados generalmente como la «marca» de las salas de buena acústica...” (Barron, 1995).
- En las bandejas superiores el ángulo de arribo vertical es, en promedio, superior a los  $20^\circ$ , suficiente para evitar el enmascaramiento por difracción de las bajas frecuencias presentes en la sala. Sólo en esta situación el BR global de la sala no resulta insuficiente, lográndose la “calidez percibida” declarada por los oyentes consultados. Es necesario enfatizar la intervención decisiva del plano del piso del escenario al proveer energía temprana de espectro prácticamente plano que permite conservar casi intacto el espectro de las fuentes acústicas en las bandejas superiores.



## 7. DIAGNÓSTICO. CONCLUSIONES

El análisis acústico tradicional de la platea de la Sala Ginastera, basado en el modelo de Sabine y en los parámetros de la norma ISO-3382, no resultó eficaz para revelar las causas físicas de la baja calidad acústica mencionada en las encuestas.

Por el contrario, el análisis del campo acústico temprano, en línea con las hipótesis centrales de esta tesis, permitió establecer una serie de factores potencialmente eficaces para describir, en principio, las causas físicas de la baja calidad acústica en la platea.

La verificación del modelo propuesto será posible luego de realizar una intervención en el campo acústico temprano de la sala. El caso ofrecerá una oportunidad única para probar experimentalmente, en un modelo en escala 1:1, las hipótesis principales de esta investigación. En particular, se podrán someter a prueba las siguientes conjeturas:

- Un aumento en la cantidad de reflexiones laterales tempranas, con sus retardos e intensidades ubicados dentro del *límite de Haas*, se correlaciona con un incremento en la sonoridad percibida por los oyentes.
- El parámetro *Retardo de la Primera Reflexión* ITDG, además de asociarse con la percepción de la *Intimidad* del campo acústico percibido, es relevante para el establecimiento de la *Textura Sonora* del campo acústico temprano.
- Las direcciones de arribo de las reflexiones laterales tempranas ubicadas dentro del *límite de Haas* dan cuenta de una parte sustancial de los valores de *impresión espacial* percibida por los oyentes.

La aproximación deberá ser minimalista, pues ningún cambio podría por sí solo corregir los defectos apuntados, que en algunos casos son contrapuestos entre sí. En el capítulo 5 de esta tesis se describe el diseño de la intervención, la propuesta presentada a las autoridades del Teatro Argentino de La Plata y la evaluación final de este estudio de caso.

**REFERENCIAS**

- Ando, Yoichi (1982). "Perception of coloration in sound fields in relation to the autocorrelation function". *Journal of the Acoustical Society of America*, 71, 616-629.
- Ando, Yoichi. (1979). "Subjective preference tests for sound fields in concert halls simulated by the aid of a computer". *Journal of Sound and Vibration*, 65, 229-239.
- Ando, Yoichi y otros (1997). "Acoustic Design of a Concert Hall Applying the Theory of Subjective Preference, and the Acoustic Measurement after Construction". *Acustica & Acta Acustica*, 83, pp. 635-643.
- Ando, Yoichi (1998). *Architectural Acoustics. Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. New York: Springer Verlag.
- Barron, Michael (1995). "Bass sound in concert auditoria". *Journal of the Acoustical Society of America* 97 (2), pp.1088-1098.
- Barron, Michael (2000). "The current state of acoustic design of concert halls and opera houses". *Actas del II Congreso Iberoamericano de Acústica*. Madrid: FIA.
- Basso, Gustavo (2016). "Acoustical design of the new canopy for the Ginastera Hall of the Teatro Argentino of La Plata". *Proceedings of The International Symposium on Musical and Room Acoustics ISMRA 2016*. La Plata: AdAA.
- Beranek, Leo (1996). *Concert Halls and opera houses: How they sound*. New York: Acoustical Society of America.
- Bradley, John y Soulodre, Gilbert (1995). "Subjective evaluation of new room acoustic measures". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (1), pp. 294-301
- Bradley, John (1996). "Some effects of orchestra shells". *Journal of the Acoustical Society of America*, 100 (2), pp. 889-898.
- Haas, Helmut (1951). "Über den einfluss eines einfahechos auf die hörsamkeit von sprache". *Acustica*, 1, pp.49-58. Traducción al inglés: "The influence of a single echo on the audibility of speech". *J. Audio Eng. Soc.*, 20, pp. 146-159 (1972).
- Hidaka, Takashuki y Beranek, Leo (2000). "Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas". *Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 368-383.
- Kuttruff, Heinrich (1991). *Room Acoustics*. Londres: Elsevier Applied Science.
- Schoroeder, Manfred (1979). "Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion." *Journal of the Acoustical Society of America*, 65, pp. 958-963.
- Sánchez Quintana, Rafael (2000). "Diseño de la sala de Opera del Teatro Argentino de La Plata". *Memorias del II Congreso Ibero Americano de Acústica*. Madrid: FIA.
- Schultz, T. J. y Watters, B. G. (1964). "Propagation of sound across audience seating". *Journal of the Acoustical Society of America*, 36, pp. 885-896.
- West, J. E. y Sessler, G. M. (1964). "Sound transmission over theatre seats". *Journal of the Acoustical Society of America*, 36, pp. 1725-1732.

## **CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE CASO 1. TEATRO ARGENTINO DE LA PLATA**

### **PARTE 2. INTERVENCIÓN**

#### **RESUMEN**

En este capítulo se describe el proceso de rediseño acústico de la Sala Ginastera del Teatro Argentino de La Plata. Se expone la metodología aplicada, en base a la descripta en el Capítulo 1, y se muestra cómo se emplearon las principales hipótesis de este trabajo en la configuración del campo acústico temprano en la platea. Se describe el diseño de los dispositivos de corrección del campo temprano y se detallan los procedimientos de análisis, teóricos y experimentales, que permitieron evaluar la eficacia de las modificaciones.

#### **1. PROPUESTAS DE INTERVENCIÓN**

##### **ANÁLISIS DE LAS POSIBLES VÍAS DE INTERVENCIÓN**

La falta de sonidos graves en la platea de la sala debería resolverse, de acuerdo al modelo estándar de Sabine, reduciendo la cantidad de absorción en baja frecuencia que son, en la Sala Ginastera, las butacas y las áreas enteladas de entrepalcos. Además del gran costo monetario involucrado en semejante recambio, como a la fecha del estudio no se había declarado el fin de la obra, una intervención en esos términos no era posible. Más importante aún, de lo concluido en el capítulo anterior se desprende que dicha operación no hubiera resuelto los defectos acústicos detectados.

De acuerdo al modelo propuesto en este trabajo, la intervención a realizarse debía cumplir con los siguientes requisitos:

1. Agregar energía temprana en los primeros 80 ms posteriores a la llegada de la señal directa a la platea.
2. Generar gran cantidad de reflexiones laterales tempranas con intensidades y fases adecuadas (en lo posible, cerca del límite superior de Haas).
3. Aumentar el ángulo medio de arribo de las ondas sonoras en platea.
4. No deteriorar la calidad acústica existente en los niveles superiores.

Ante la imposibilidad de modificar los antepechos de palcos y bandejas, de aumentar la altura entre palcos y bandejas, de cambiar la geometría general de la sala o de modificar su tiempo de reverberación global, se decidió intervenir sobre la geometría responsable del campo acústico temprano, es decir el escenario, la zona del proscenio y el foso de orquesta.

Para conciertos de música sinfónica se planteó construir una cámara de orquesta especialmente diseñada para corregir la acústica del escenario y de la platea.

Para espectáculos de ópera se propusieron diseños acústicos específicos por título, que incluyen la adaptación del foso de orquesta, de las escenografías y de las puestas (*régies*).

Parte central de la propuesta fue el diseño y construcción de un gran reflector acústico sobre el foso de orquesta, pieza clave tanto para música sinfónica como para ópera, que permitiera corregir los defectos acústicos detectados en la platea de la Sala Ginastera modificando radicalmente su campo acústico temprano. Dicho reflector constituirá una aplicación directa de los postulados planteados en esta tesis.

## **EFFECTOS DE LA INSTALACIÓN DE UN REFLECTOR ACÚSTICO SOBRE EL FOSO DE ORQUESTA**

### **INCORPORACIÓN DE REFLECTORES A LA CÁMARA TRADICIONAL**

Una posible solución, para corregir la zona central y delantera de la platea, fue la incorporación de una formación de reflectores para disminuir el retardo de la primera reflexión ITDG y llevarlo a un valor igual o menor a 35 ms. Se simuló en el modelo digital la instalación de una formación de unidades rectangulares a 9 m sobre el proscenio. Para acercar los resultados a los de una configuración estándar de concierto, se agregó en el escenario una cámara acústica reflectante tradicional.

Una perspectiva de la formación de reflectores se puede ver en la Figura 5.1.

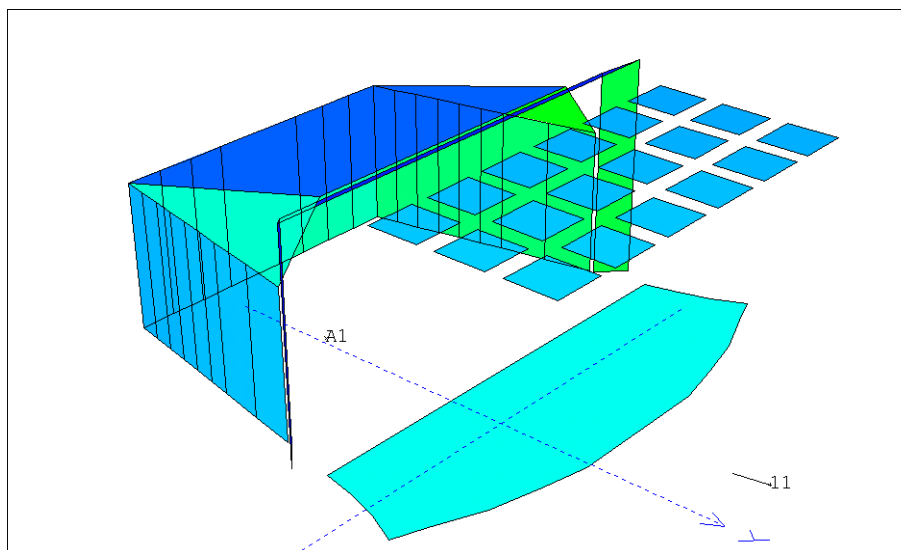


Figura 5.1. Cámara de escenario reflectante plana y formación de reflectores sobre el foso.

A continuación se analizan en detalle los resultados de la simulación con los reflectores sobre el foso de orquesta.

#### **ANÁLISIS DE LAS PRIMERAS REFLEXIONES EN PLATEA**

Se analizaron en detalle los mismos puntos de la platea escogidos para el diagnóstico del Capítulo 4, las posiciones 11 y 19. La sala fue excitada con las mismas fuentes omnidireccionales ubicadas en las mismas posiciones en el escenario.

*Posición 11 en platea con Fuente A2, sobre el centro del proscenio*

El reflectograma temprano simulado se observa en la Figura 5.3. En la Figura 5.2 se reprodujo el reflectograma obtenido antes de colocar los reflectores.

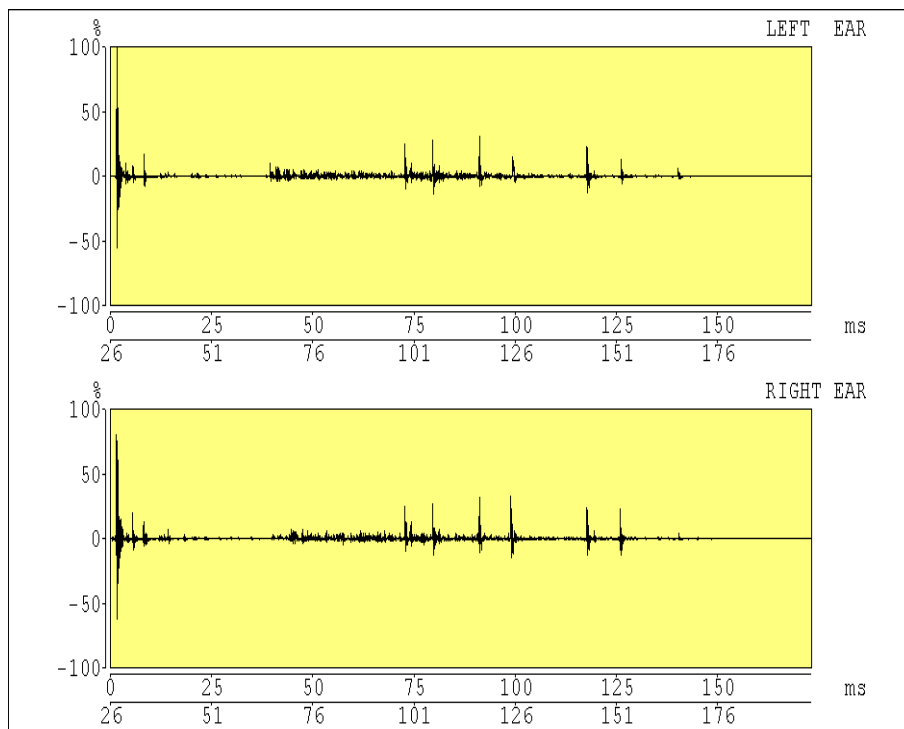


Figura 5.2. Respuesta al impulso. Fuente A2, posición 11, con cámara reflectante.

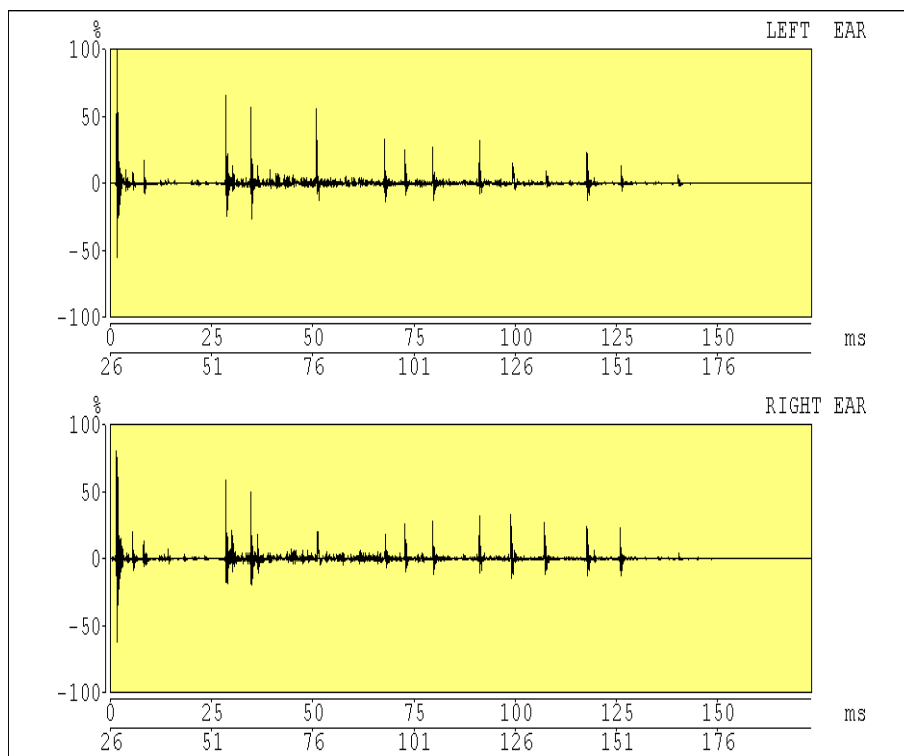


Figura 5.3 Respuesta al impulso. Fuente A2, posición 11, con cámara reflectante y reflectores sobre el foso.

La inclusión de la formación de reflectores mejora notablemente el reflectograma en el centro de la platea. Aparecen fuertes reflexiones tempranas y la secuencia es más uniforme. La primera reflexión, provocada en un reflector de la formación, aparece a los 27 ms (Figura 5.4).

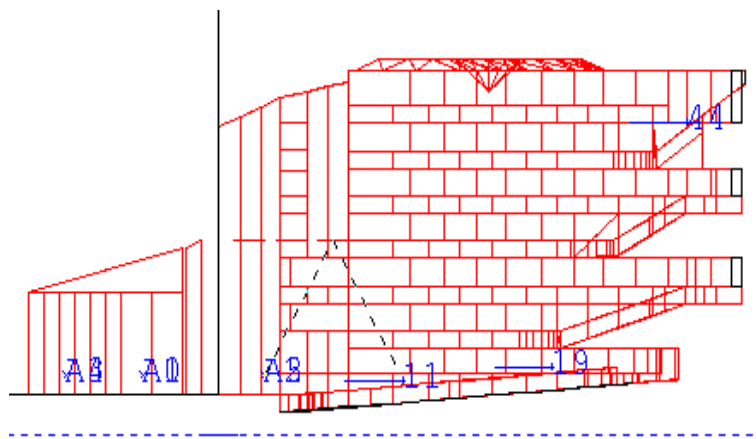


Figura 5.4. Recorrido desde la fuente A2 hasta la posición 11 con un retardo de 27 ms.

El recorrido de la segunda reflexión significativa, retrasada 34 ms respecto del sonido directo, se puede ver en la Figura 5.5.

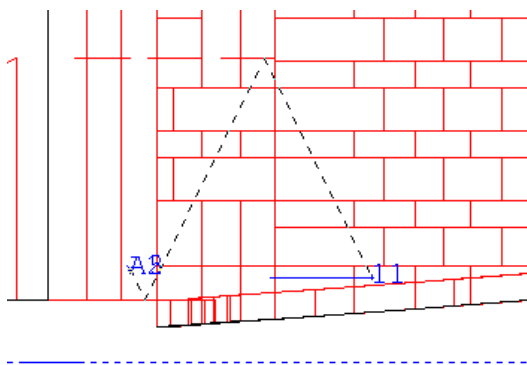


Figura 5.5. Detalle del recorrido desde la fuente A2 hasta la posición 11 con un retardo de 34 ms.

La Figura 5.5 pone en evidencia una de las contribuciones más importantes de la formación de reflectores: permite que el gran plano del piso del escenario contribuya con sus reflexiones de espectro plano a la zona de platea. En las situaciones previas este gran plano sólo resultaba efectivo en las bandejas superiores.

El reflectograma de la Figura 5.3 demuestra la eficacia de los reflectores en este caso:

1. El retardo de la primera reflexión ITDG = 27 ms resulta ahora, por primera vez, adecuado -por debajo del límite de 35 ms recomendado-.
2. La cantidad de reflexiones significativas en los primeros 80 ms aumentó sustancialmente, de  $N_E = 2$  con la cámara tradicional a  $N_E = 10$  con cámara más los reflectores.
3. La evaluación visual de los primeros 200 ms del reflectograma muestra mayor cantidad de reflexiones tempranas.

En cuanto a los criterios espaciales, la eficiencia lateral LEF2 alcanzó un 25%, y el IACC fue de:

$$\begin{aligned} \text{IACC wideband} &= 0,44 \\ \text{IACC octaves 125-4kHz} &= \langle 0,98 \ 0,93 \ 0,68 \ 0,61 \ 0,64 \ 0,71 \rangle \end{aligned}$$

Por lo tanto el *factor de espacialidad*  $[1 - \text{IACC}]$  llega a 0,56, valor mucho mejor que sin el reflector y muy cercano al óptimo según los criterios de Ando, Barron e Hidaka ( $[1 - \text{IACC}] > 0,60$ ). Recordemos que antes de colocar el reflector se tenía:

$$\begin{aligned} \text{IACC wideband} &= 0,94 \\ \text{IACC octaves 125-4kHz} &= \langle 1,00 \ 1,00 \ 0,95 \ 0,87 \ 0,94 \ 0,92 \rangle \end{aligned}$$

que definía un factor de espacialidad  $[1 - \text{IACC}] = 0,06$ .

En síntesis, la formación de reflectores mejora notablemente el comportamiento acústico temporal de la posición 11 en platea cuando la fuente se ubica en el proscenio, y logra aumentar los valores relacionados con los criterios acústicos espaciales.

#### *Posición 11 en platea con Fuente A3, dentro de la cámara de escenario*

El reflectograma temprano simulado con los reflectores en posición se observa en la Figura 5.7. En la Figura 5.6 se reprodujo el reflectograma obtenido con una cámara tradicional.



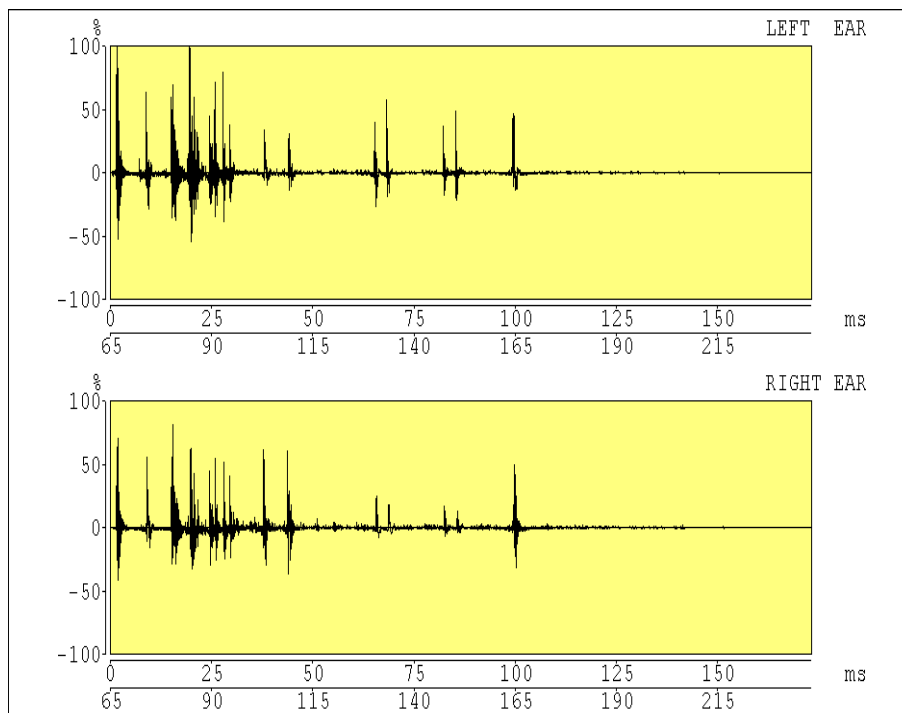


Figura 5.6. Respuesta al impulso. Fuente A3, posición 11, con cámara reflectante.

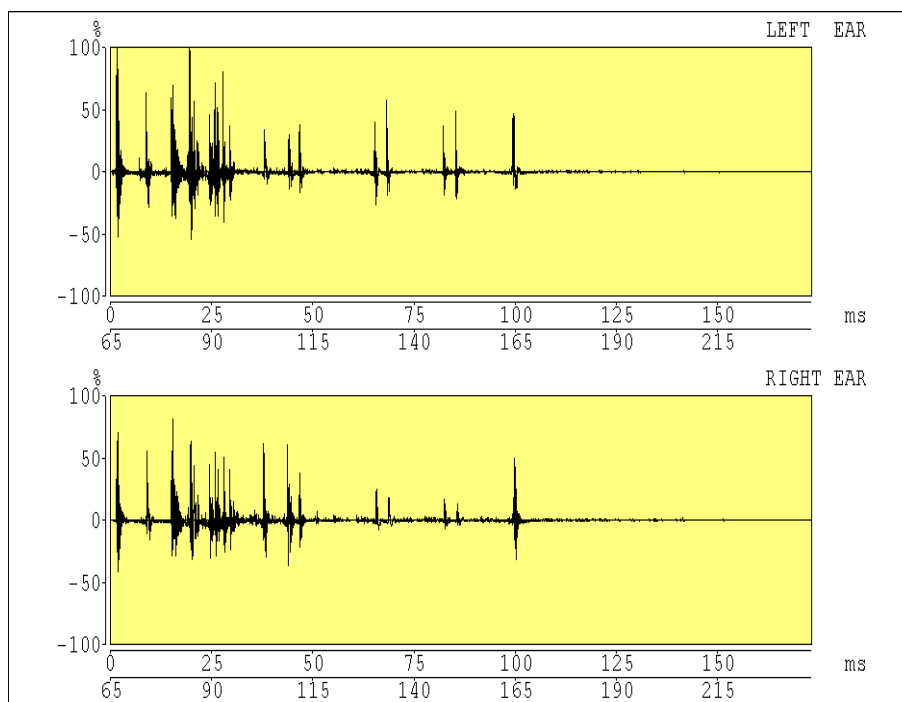


Figura 5.7. Respuesta al impulso. Fuente A3, posición 11, con cámara reflectante y formación de reflectores.

En este caso, con la fuente colocada bien dentro de la cámara reflectante, el efecto de la formación de reflectores no es tan pronunciado como en la situación anterior. Ha mejorado, no obstante, la uniformidad de la secuencia temporal.

El análisis realizado para la posición 19 ofreció resultados similares.

### **CONCLUSIONES SOBRE LA INCORPORACIÓN DE LA FORMACIÓN DE REFLECTORES SOBRE EL PROSCENIO**

Los *parámetros acústicos globales* (TR, SPL y  $G_{10}$ ) mejoran en su distribución espacial al sumarse una formación de reflectores a la cámara de escenario tradicional.

La acción de la formación sobre los parámetros acústicos específicos depende de la ubicación de cada butaca en particular y de la posición de la fuente acústica. Es especialmente eficaz en la platea central y delantera de la platea si la fuente se coloca cerca del proscenio, mejorando significativamente los parámetros temporales físicos (ITDG,  $C_{80}$ ,  $N_E$  y Factor de Textura). En contraposición, cuando la fuente se coloca cerca del fondo de la cámara, la acción de los reflectores disminuye.

En cuanto a los *parámetros físicos espaciales* (IACC y LEF), la formación de reflectores mejora sustancialmente el campo acústico en la platea, descrito previamente como de sonido “plano y no envolvente”.

El comportamiento en baja frecuencia mejora sólo en aquellas butacas cuyos ángulos de llegada en el plano vertical aumentan a partir de la reflexión en los reflectores. Esto ocurre a condición de que la formación de reflectores devuelva una cantidad considerable de energía a frecuencias por debajo de 250 Hz.

Una vez comprobada teóricamente la eficacia del agregado de una formación de reflectores, comenzó la etapa de diseño del dispositivo.

## **2. DISEÑO DEL GRAN REFLECTOR ACÚSTICO SOBRE EL FOSO DE ORQUESTA**

La formación de reflectores debe cumplir estrictamente con las siguientes condiciones:

- Cubrir acústicamente de modo homogéneo la totalidad del área de platea con las fuentes ubicadas sobre el proscenio o sobre la plataforma practicable que cubre el foso.
- Permitir la comunicación acústica entre los músicos ubicados sobre el proscenio y los ubicados en el interior de la cámara.
- Aumentar el ángulo promedio de llegada de la energía temprana a la platea, a fin de disminuir la “incidencia rasante” (*seat-dip*) por difracción en las butacas.
- Aumentar considerablemente la cantidad de energía lateral temprana que llega a la platea.

- Aumentar la cantidad de reflexiones (textura) dentro de los primeros 80 ms en platea.
- Aumentar la reverberación temprana (EDT) a bajas frecuencias. El coeficiente de reflexión de la formación de reflectores deberá ser elevado y plano a frecuencias por debajo de 500 Hz. Esta condición es de gran importancia dada la escasa calidez descrita en la platea. Si los reflectores no cumpliesen con esta condición desbalancearían espectralmente aún más la sala.
- Agregar difusión de alta frecuencia dirigida hacia la platea de la sala.
- No deteriorar acústicamente los niveles superiores de la sala.

Se descartan de entrada los reflectores tradicionales de gran tamaño, pues su función de transferencia se reduce notablemente a bajas frecuencias, precisamente las que se deben preservar (Basso, 2016)..

### MARCO TEÓRICO

Si se observa el esquema que se muestra en la Figura 5.8 se puede deducir, de acuerdo a la teoría de difracción clásica, que en la zona por debajo de la frecuencia límite inferior  $f_g$  las reflexiones son atenuadas a causa de la difracción relacionada con el tamaño del reflector (Rindel, 1991).

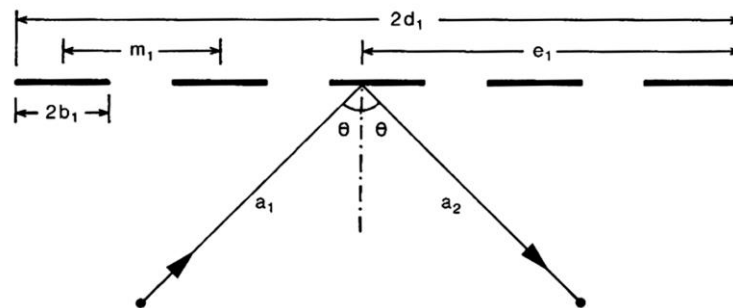


Figura 5.8. Esquema general de una reflexión en un arreglo periódico - Imagen tomada de J. H. Rindel (Rindel, 1991, pp. 8).

La frecuencia  $f_g$  representa el límite inferior útil para un reflector simple:

$$f_g = 1/2 c a^* / (S \cos \theta) \quad (1)$$

En la que:  $f_g$  = frecuencia límite inferior

$c$  = velocidad del sonido

$S$  = superficie del reflector

$\theta$  = ángulo de incidencia

$a^*$  = distancia característica

Si  $a_1$  y  $a_2$  son las distancias al emisor y receptor,  $a^*$  se define como:

$$a^* = 2 a_1 a_2 / (a_1 + a_2) \quad (2)$$

Si la proyección de la formación de reflectores es paralela a la incidencia de la onda acústica, la atenuación debida a la difracción se puede obtener para un caso particular. En el caso de un conjunto (*array*) de reflectores rectangulares iguales situados en el plano  $x$ - $y$ , si las distancias  $a_1$  y  $a_2$  son grandes comparadas con la longitud de onda  $\lambda$  y con el tamaño de los reflectores individuales, se puede usar la aproximación de Kirchhoff-Fresnel. La intensidad del sonido reflejado puede expresarse como el producto del coeficiente de reflexión  $K$  por la intensidad reflejada por un reflector de superficie infinita (caso ideal).

$$\Delta L_{\text{difr}} = 10 \log K = 10 \log (K_1 K_2) \quad (3)$$

en la que  $K_1$  y  $K_2$  son los coeficientes de reflexión de la formación en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente. Un aproximación cruda establece que, para frecuencias por debajo de  $fg$ ,  $K = \mu^2$ , siendo  $\mu$  la densidad relativa de la formación de reflectores, definida como el área de reflectores dividida por el área total.

El coeficiente  $K_1$  se puede expresar de la siguiente forma:

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[ \left\{ \sum_{i=1}^I [C(v_{1,i}) - C(v_{2,i})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^I [S(v_{1,i}) - S(v_{2,i})] \right\}^2 \right] \quad (4)$$

en la que:

$$v_{1,i} = \frac{2}{\sqrt{\lambda a^*}} (e_1 - (i-1)m_1) \cos \theta$$

$$v_{2,i} = \frac{2}{\sqrt{\lambda a^*}} (e_1 - 2b_1 - (i-1)m_1) \cos \theta \quad (5)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda considerada e  $i$  es la fila involucrada en la dirección  $x$ .

$C$  y  $S$  son las integrales de Fresnel:

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi}{2} z^2\right) dz \quad S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi}{2} z^2\right) dz \quad (6)$$

El cálculo es análogo para la dirección  $y$ , debiéndose hallar el coeficiente  $K_2$  (en ese caso el número de filas  $M$  reemplaza a  $I$ , y así con las demás características geométricas en el eje  $y$ ). Rindel analiza reflectores cuadrados para simplificar el asunto: cada vector en el espacio  $C$ - $S$  representa la reflexión en cada uno de los paneles del reflector (un reflector de tamaño infinito estaría representado por un vector que conectaría los centros de las dos espirales de Cornu). A bajas frecuencias los vectores son más pequeños y tienden a sumarse en fase: la contribución de cada reflector individual deviene menos importante (Figura 5.9).

Para bajas frecuencias, por debajo  $f_g$ , una aproximación indica que  $K \approx \mu^2$ , siendo  $\mu$  la densidad relativa del sistema de reflectores definida como el área sumada de todos los reflectores dividida el área del sistema completo.

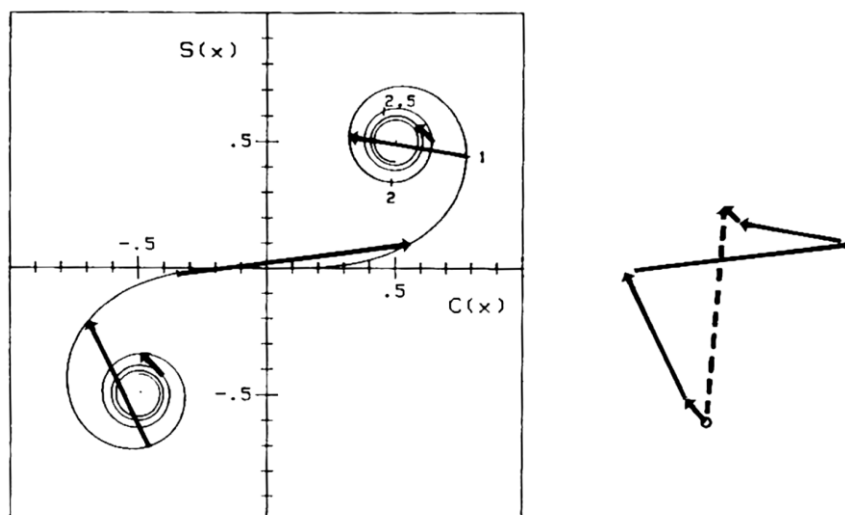


Figura 5.9. Interpretación de la rotación de fase del conjunto a partir de la espiral de Cornu - Imagen tomada de J. H. Rindel (Rindel, 1991, pp. 10).

En resumen, se puede concluir que para obtener reflexiones sobre una amplia gama de frecuencias es preferible usar muchos reflectores pequeños antes que unos pocos más grandes. Por debajo de la frecuencia límite la atenuación está determinada por la densidad relativa del arreglo.

En este estudio, en coincidencia con lo establecido por algunos autores (Rindel, 1991; Ando, 1998), se concluye que la eficacia en baja frecuencia es función de la densidad relativa y no del tamaño de los reflectores, mientras que la respuesta en alta frecuencia

está dominada por el diseño de cada reflector individual. En esta situación la frecuencia límite  $f_g$  da una buena medida del límite superior de eficacia de la formación.

En suma, se elige para el diseño una formación compuesta por gran cantidad de reflectores pequeños (de aproximadamente  $1,5 \text{ m}^2$ ) con una tasa de perforación  $d = 50\%$ . Para evitar que la vibración absorba energía de baja frecuencia se sugiere que el material posea un espesor mínimo de 8 mm. Cada reflector individual deberá curvarse alrededor de 80 mm hacia abajo para permitir que se solapen las reflexiones especulares de cada fila con la siguiente y así evitar las sombras acústicas en la audiencia.

La tasa de perforación del 50% asegura la llegada de suficiente energía a las bandejas superiores (sólo unos 3 dB menos que antes de instalar la formación de reflectores). De esa manera no se alterará significativamente el buen comportamiento acústico previo de esa parte de la sala.

El detalle del diseño preliminar de los reflectores individuales y de la formación completa se puede ver en las Figuras 5.10 y 5.11. La altura y la inclinación relativa de la formación se determinarán una vez diseñada la cámara acústica de escenario definitiva.

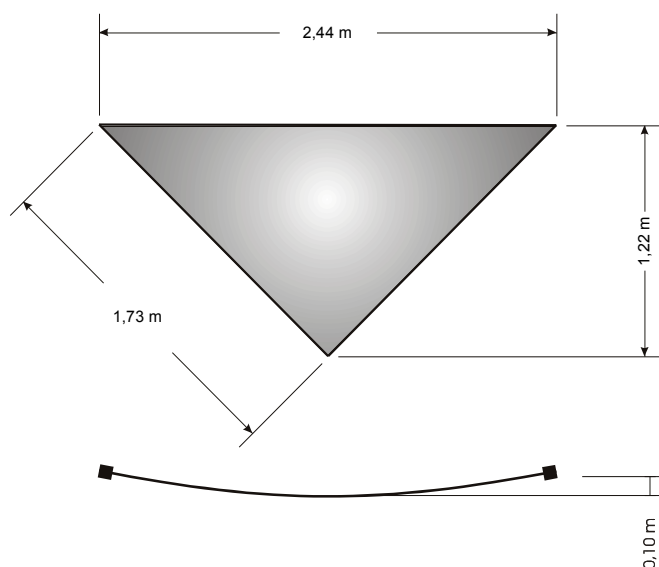


Figura 5.10. Detalle de un reflector individual.

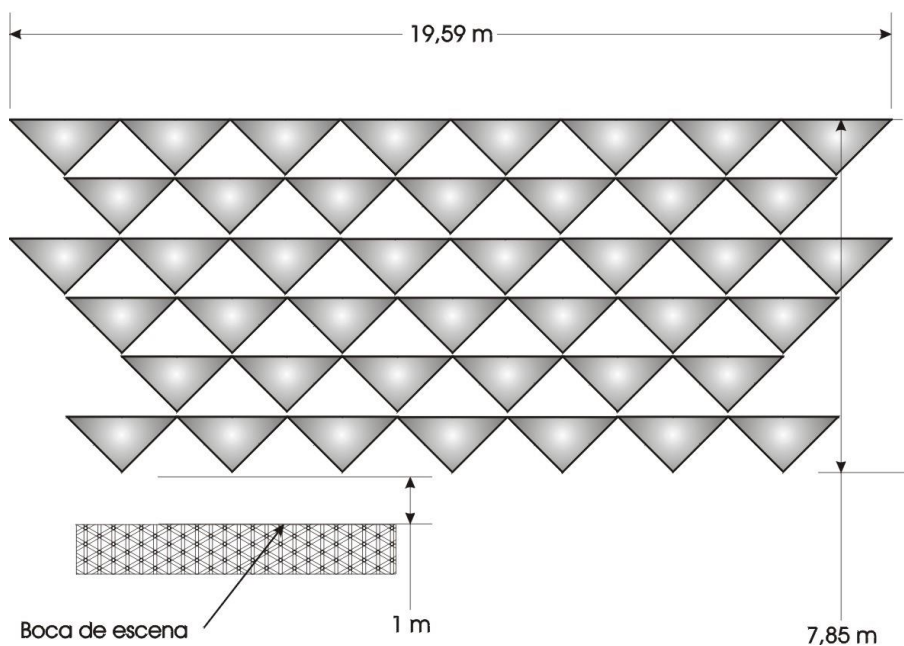


Figura 5.11. Detalle en planta de la formación de reflectores.

Yoichi Ando (Ando, 1982b) encontró que los picos y valles en la respuesta en frecuencia dependen de la geometría de los paneles y sugirió que las formas triangulares son las mejores. Por razones de factibilidad constructiva y por motivos estéticos, se decidió reemplazar el primer modelo de panel individual triangular con curvatura esférica por otro rectangular con curvatura cilíndrica. Lo que sigue describe el proceso de diseño completo del gran reflector.

#### **DISEÑO DEL REFLECTOR DE PANELES RECTANGULARES CON CURVATURA CILÍNDRICA**

De acuerdo con el desarrollo de Magne Skålevik, un conjunto (*array*) de reflectores funciona como una combinación de tres situaciones diferentes (Figura 5.12).

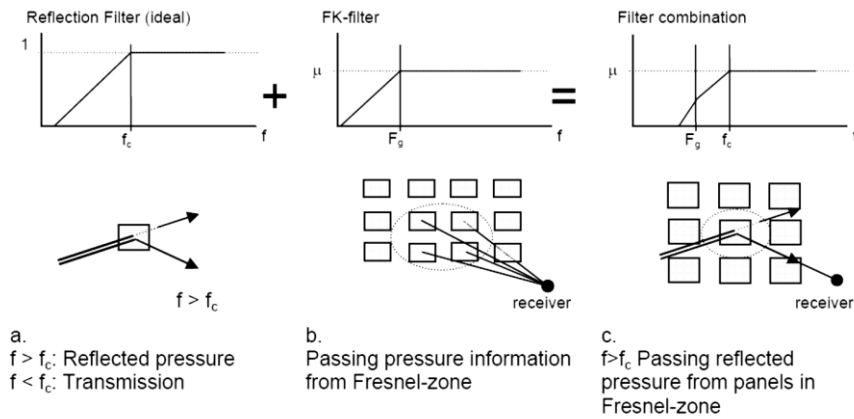


Figure 1. Frequency response as a serial combination of two filters

Figura 5.12. Imagen tomada de M. Skålevik (Skålevik, 2007, pp.1)

Las dos frecuencias límite,  $F_C$  y  $F_g$ , pueden ser calculadas con el método de elementos de contorno (*Boundary Element Method BEM*). El sistema se comporta como un modelo de dos filtros pasa-alto de primer orden en serie, uno que describe la habilidad de cada panel para reflejar las ondas, el filtro por reflexión, y otro que describe la capacidad del arreglo para transmitir sonido por difracción tal como indica un filtro Fresnel-Kirchhoff. La pendiente en frecuencia de ambos filtros es de 6 dB/oct (Skålevik, 2006).

El filtro por reflexión actúa porque, por encima de  $F_C$ , la presión en la superficie del panel duplica a la presión incidente. Por debajo de  $F_C$ , en el modo de transmisión, el panel es demasiado pequeño como para afectar a la onda, que se propaga por difracción.

*El filtro por reflexión y la frecuencia  $F_C$*

Trabajos teóricos han demostrado que, para discos circulares de radio  $a$  (Skålevik, 2007):

$$F_C = 3c/(8a) \sim 128/a$$

Para otras geometrías, la densidad panel/borde  $\epsilon = L/S$  parece ser un buen predictor:

$$F_C \sim 64 \cdot \epsilon$$

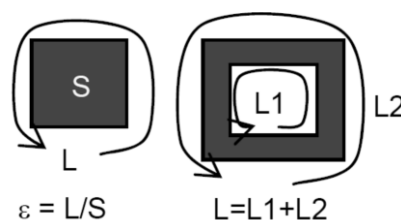


Figura 5.13. Imagen tomada de M Skålevik (Skålevik, 2007, pp.2).



Para ángulos de incidencia diferentes a la normal, hay evidencia de que  $F_c$  varía poco entre  $0^\circ$  y  $15^\circ$ , pero luego crece significativamente (Skålevik, 2007).

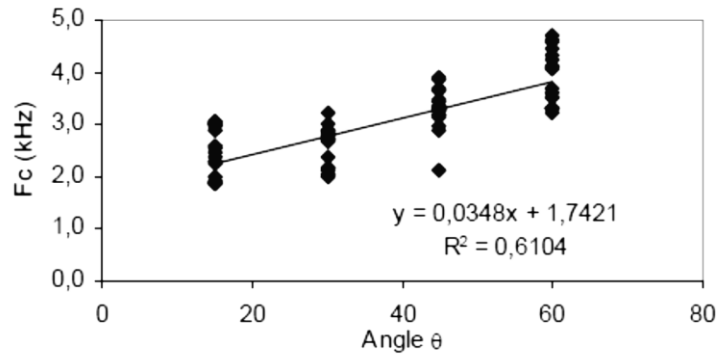


Figura 5.14. Variación de  $F_c$  en función del ángulo de incidencia. Imagen tomada de M Skålevik (Skålevik: 2007, pp.6).

La respuesta en frecuencia de arreglos de paneles planos es muy despareja en la zona de  $F_c$ , y los desvíos pueden exceder  $\pm 3$  dB con relación a un filtro pasa altos ideal. Con el fin de salvar este inconveniente, los paneles individuales del reflector de la Sala Ginastera tendrán una curvatura cilíndrica.

#### *El filtro $F_k$ y la frecuencia $F_g$*

En la banda de paso el valor del filtro es  $20 \cdot \log(\mu)$ , en el que la densidad relativa del sistema de reflectores es  $\mu = S_{\text{panel}} / S_{\text{total}}$ .

El rango útil de frecuencias para un arreglo de tamaño  $X \cdot X$  [m], con  $N$  paneles cuadrados de  $x \cdot x$  [m], a una altura  $H$  [m], definido por sus frecuencias límite, es:

$$F_g = c \cdot H / (2 \cdot X^2)$$

$$F_c \sim 64 \cdot 4 / x$$

$$F_l = c \cdot H / (2 \cdot x^2) \quad \text{con } \mu = N \cdot x^2 / X^2$$

#### **PANELES INDIVIDUALES PARA LA SALA GINASTERA DEL TA**

Aplicando  $F_c = 64 \cdot \epsilon$  como límite inferior para la zona crítica, un arreglo de 50% a 7 m de altura formado por elementos de  $1,6 \cdot 1,6$  m, se obtiene un rango útil de 13,6 Hz a 930 Hz.

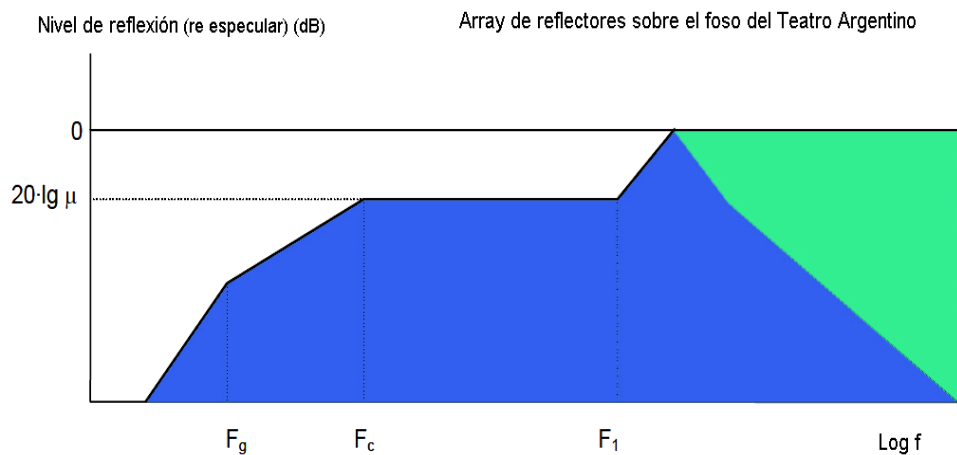


Figura 5,15. Respuesta espectral del gran reflector sobre el foso de la Sala Ginastera del TA.

Para el caso del TA, los valores de las frecuencias de corte calculadas fueron:

$$\begin{aligned}
 X - Y &= 17,5 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} & S_{ar} &= 87,5 \text{ m}^2 \\
 x &= 1,6 \text{ m} \\
 H &= 7 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_g &= c \cdot H / (2 \cdot X^2) & F_g &= 340 \text{ m/s} \cdot 7 \text{ m} / (2 \cdot 87,5 \text{ m}^2) & = & 13,6 \text{ Hz} \\
 F_c &\sim 64 \cdot 4/x & F_c &\sim 64 \cdot 4/1,6 \text{ m} & = & 160 \text{ Hz} \\
 F_1 &= c \cdot H / (2 \cdot x^2) & F_1 &= 340 \text{ m/s} \cdot 7 \text{ m} / (2 \cdot 1 \text{ m}^2) & = & 930 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Este diseño es efectivo para una Zona de Fresnel-Kirchhoff a -6 dB. Los valores de la respuesta espectral son adecuados por debajo de 900 Hz. Para frecuencias por encima de  $F_1$  se curvaron los paneles individuales para obtener reflexiones especulares de cobertura completa. El sistema, al estar cubierto al 50%, implica una transmisión aproximada de -3 dB por debajo de la transmisión en la sala original, sin el reflector. Este valor permite asegurar la preservación de la calidad del campo acústico en las bandejas superiores de la sala.

#### **RADIO DE CURVATURA DE LOS PANELES INDIVIDUALES DEL TA**

La red de difracción en un plano propuesta asegura un buen comportamiento espectral hasta la frecuencia  $F_1 = 900$  Hz. En cuanto al coeficiente de reflexión a frecuencias por encima de  $F_1$ , debe ser provisto por el material con el que se construyan los módulos individuales.

Para que la cobertura espacial de las reflexiones alcance la totalidad de la platea con respuesta espectral plana, cada panel individual se curvaría en sentido longitudinal (idealmente hubiera sido mejor una curvatura esférica en vez de la cilíndrica escogida, pero las dificultades constructivas llevaron a descartar esta variante).

En la Figura 5.16 se pueden ver las coberturas obtenidas con paneles planos y con paneles de sección cilíndrica de 5,5 m de radio de curvatura. En el esquema se ubicó el reflector a 8 m de altura sobre el piso del escenario.

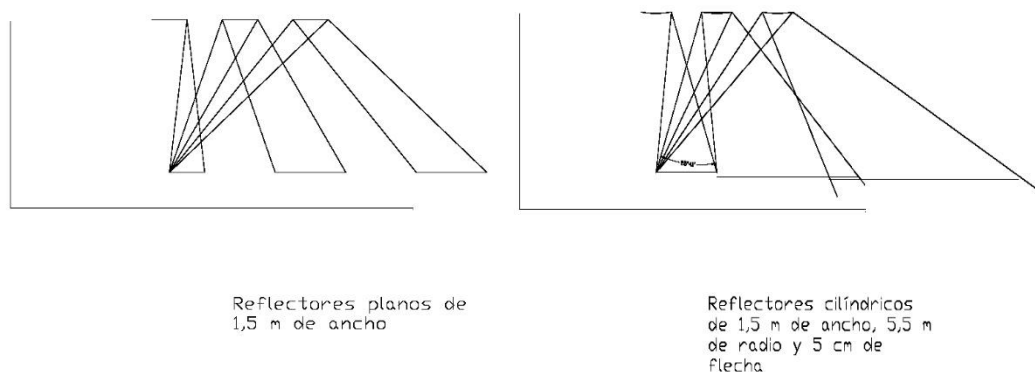


Figura 5.16. Cobertura longitudinal de los paneles cilíndricos con  $r = 5,5$  m.

La combinación de la red de difracción del reflector completo y de la reflexión especular de los paneles individuales permiten predecir un comportamiento espectral plano a partir de  $F_c = 160$  Hz, y un aceptable rendimiento en frecuencia entre  $F_g = 13,6$  Hz y  $F_c$ .

### ABSORCIÓN ACÚSTICA DE LOS PANELES INDIVIDUALES

Por razones estructurales los módulos no debían ser muy pesados. Para el diseño se midieron los coeficientes de absorción de varias alternativas constructivas en el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la CIC. La versión 2 de dichos paneles -sin estructura tipo “celda de abeja”- demostraron poseer un coeficiente de absorción adecuado a partir de 500 Hz.



Figura 5.17. Fotografías de las mediciones de los paneles en el laboratorio LAL-CIC – En la fotografía de abajo a la izquierda, los Ings. Nilda Vechiatti y Ariel Velis.

Una vez concluido el diseño base y decidido el material para los módulos, se trabajó con los integrantes de la Sección de Escenografía del Teatro Argentino y se fueron generando diferentes maquetas en el diorama de la sala. En la Figura 5.18 se puede ver una de dichas maquetas.



Figura 5.18. Maqueta preliminar con la cámara de escenario, las nuevas tarimas de orquesta y la formación de reflectores (Diseño y Producción Escenotécnica del Teatro Argentino).

Con el diseño final concluido, se elaboraron los planos generales y de detalle del proyecto. En el proceso participaron la Arq. María José Besozzi, de la Oficina de Diseño y Producción Escenotécnica y Juan Carlos Greco, Director Técnico del teatro. En las Figuras 5.19 y 5.20 se muestra parte de la documentación producida.

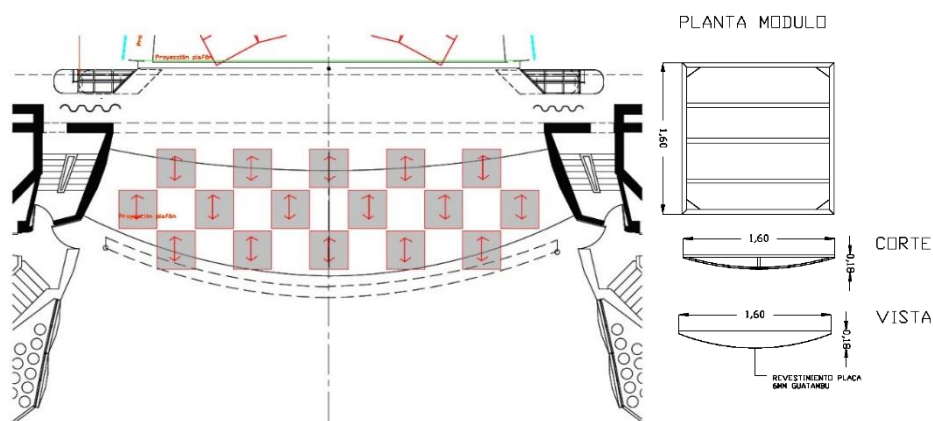


Figura 5.19. Planos desarrollados para la construcción del reflector (Oficina de Diseño y Producción Escenotécnica del Teatro Argentino).

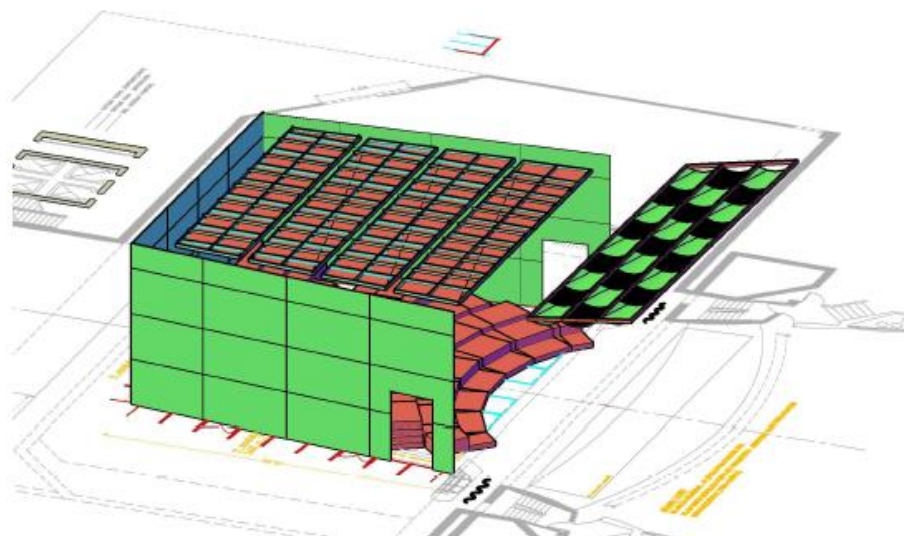


Figura 5.20. 3D del nuevo reflector (Oficina de Diseño y Producción Escenotécnica del Teatro Argentino).

#### COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DEL GRAN REFLECTOR – EVALUACIÓN EN EL MODELO DIGITAL

La evaluación de la eficacia del diseño sobre el campo acústico temprano en la zona de platea resulta esencial para corroborar la hipótesis central de esta tesis: si ésta es válida, se habrán corregido los defectos detectados. Si la intervención no cumple con los objetivos establecidos, la hipótesis central se hubiese refutado.

Antes de decidir la construcción del dispositivo, que involucraba un gran costo económico y de recursos para el teatro, se decidió evaluar su eficacia en el modelo digital. Se examinó únicamente el campo acústico de la sala en el marco de la hipótesis central del trabajo.

Para evaluar la efectividad de la intervención en el campo acústico temprano se tomaron pares de puntos fuente/receptor. Un análisis combinatorio mostró que para incluir la totalidad de las butacas en platea y todas las posibles ubicaciones de las fuentes en el escenario, hubiéramos necesitado la confección de 91.000 pares. Si se consideran 22 reflexiones tempranas por par, en total habría que analizar las rutas de 2.002.000 reflexiones individuales, tarea absolutamente impracticable.

Para reducir la complejidad del problema y lograr una evaluación eficaz, se concibió la siguiente estrategia:

- Se redujo la cantidad de puntos recepción tomando una de cada 10 butacas.

- Se redujo la cantidad de fuentes acústicas. Se dividió el escenario y el área del coro en 12 sectores para reducir la cantidad de puntos de emisión a considerar.
- Se aplicaron algoritmos de análisis basados en lógica borrosa -empleando el *Fuzzy Logic Toolbox* de MATLAB- para poder estimar los casos estadísticamente más favorables.
- El criterio de validación se basó tanto en el Índice de Calidad Acústica AQI (Beranek: 1996), como en la evaluación de la textura y cantidad de reflexiones dentro del límite de Haas en el campo acústico cercano desarrollados para esta tesis.

Los detalles del procedimiento no son relevantes para la comprensión del tema central de esta tesis. A continuación se muestran los resultados para algunos pares fuente/receptor característicos.

#### ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO EN EL CAMPO ACÚSTICO TEMPRANO

La intención fue agregar la mayor cantidad de reflexiones laterales dentro del límite superior del espacio de Haas (Figura 5.21), en lo posible con retardos e intensidades cercanas a la frontera *ensanchamiento de la imagen/eco*.

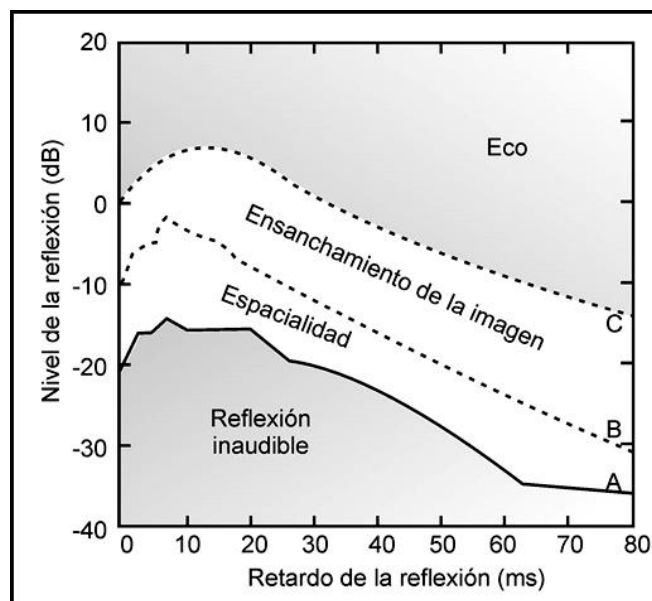


Figura 5.21. Espacio de Haas (Basso, 2009).

#### Análisis del par Fuente A1/receptor 17

A modo de ejemplo, en el análisis del par fuente A1/ receptor 17 en los primeros 100 ms, se pueden ver las reflexiones que ocupan ese intervalo antes y después de la instalación del reflector sobre el foso (Figuras 5.21 y 5.22).

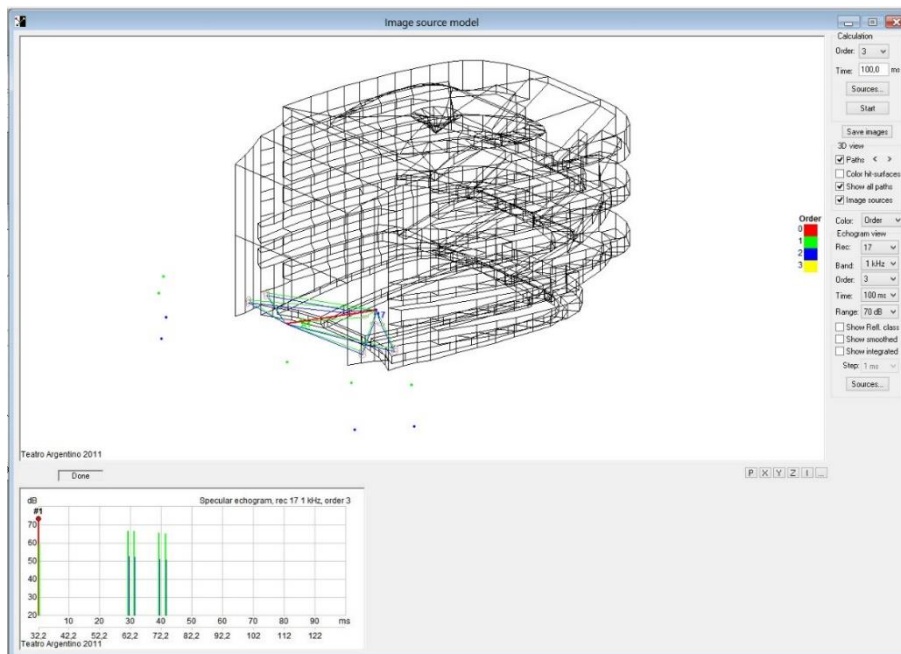


Figura 5.21. Reflexiones tempranas para el par A1/17 antes de la instalación del reflector sobre el foso.

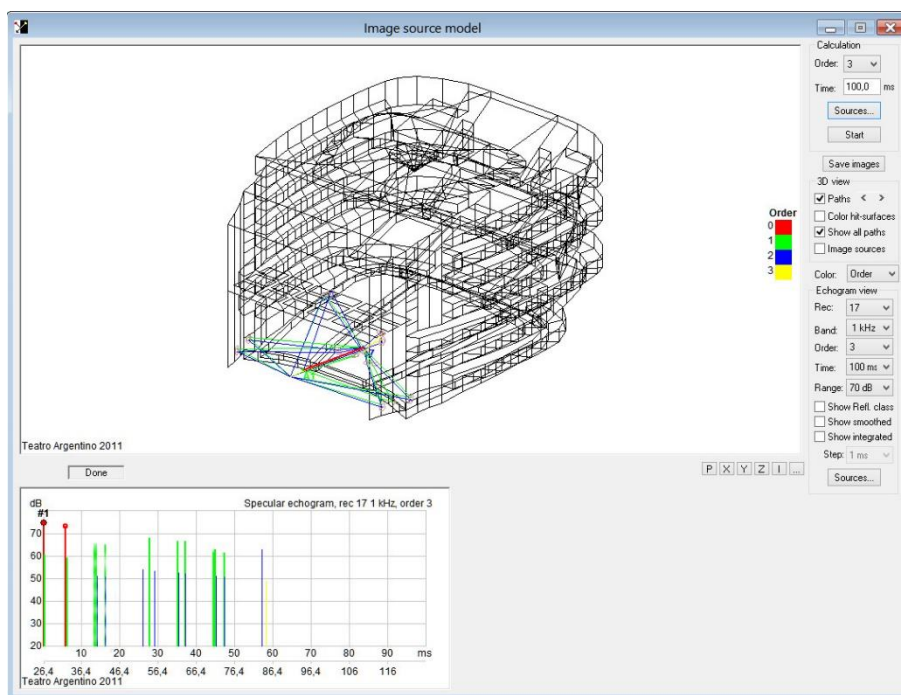


Figura 5.22. Reflexiones tempranas para el par A1/17 después de la instalación del reflector sobre el foso.

Si se ubican estas reflexiones en el espacio de Haas queda en evidencia la eficacia de la intervención realizada.



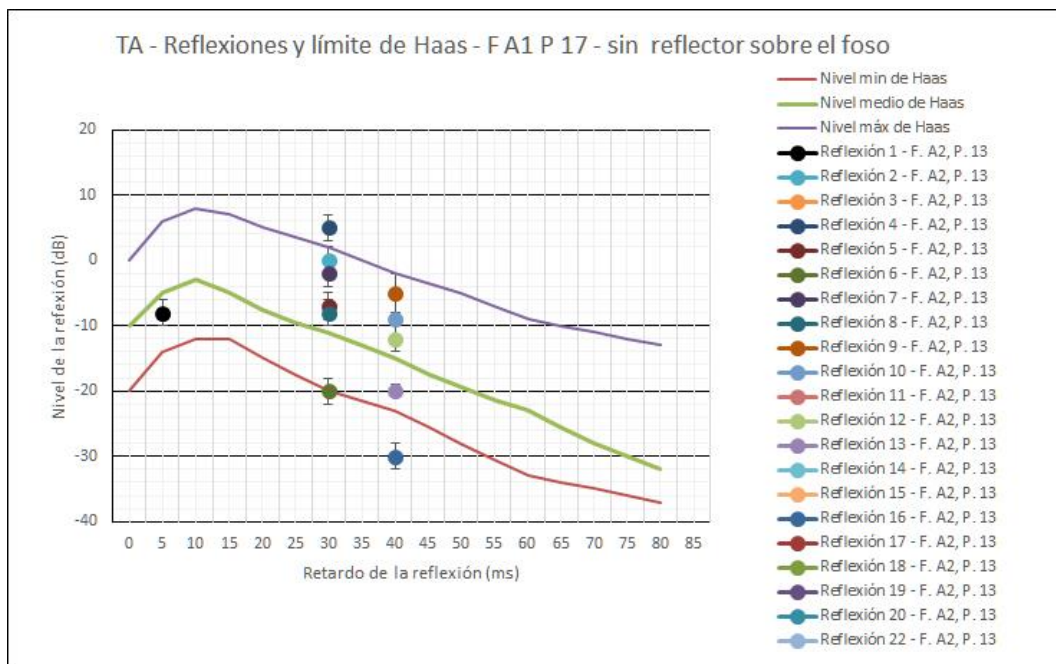


Figura 5.23. Ubicación de las primeras reflexiones en el espacio de Haas. Fuente A1, punto 17. Sin reflector sobre el foso.

En las Figuras 5.23 y 5.24, las cotas de error expresan la incertidumbre en el conocimiento de los coeficientes de absorción de los materiales en los que se reflejan las ondas, típicamente del  $(10 \pm 5)$  % del valor indicado en las tablas.

Antes de la instalación del reflector, el campo acústico temprano en platea para el par A1/17 presentaba una textura despareja, con dos grandes concentraciones de energía con retardos de 30 y 40 ms. Muy poca de esa energía se ubica dentro de límite superior de Haas (Figura 5.23). Estos datos coinciden con la mala calidad del sonido en platea que manifestaban los oyentes que presenciaron los conciertos de la Orquesta Estable entre los años 1999 y 2011.

El análisis estadístico mediante algoritmos de lógica difusa, aplicado a la totalidad de los pares fuente/receptor definidos en la platea, indicó que la cantidad de reflexiones tempranas significativas dentro de la franja límite de Haas fue del 16 % del total. Y la cantidad por fuera de la zona de seguridad del 22 %.

La situación cambia radicalmente con la instalación del reflector (Figura 5.24).

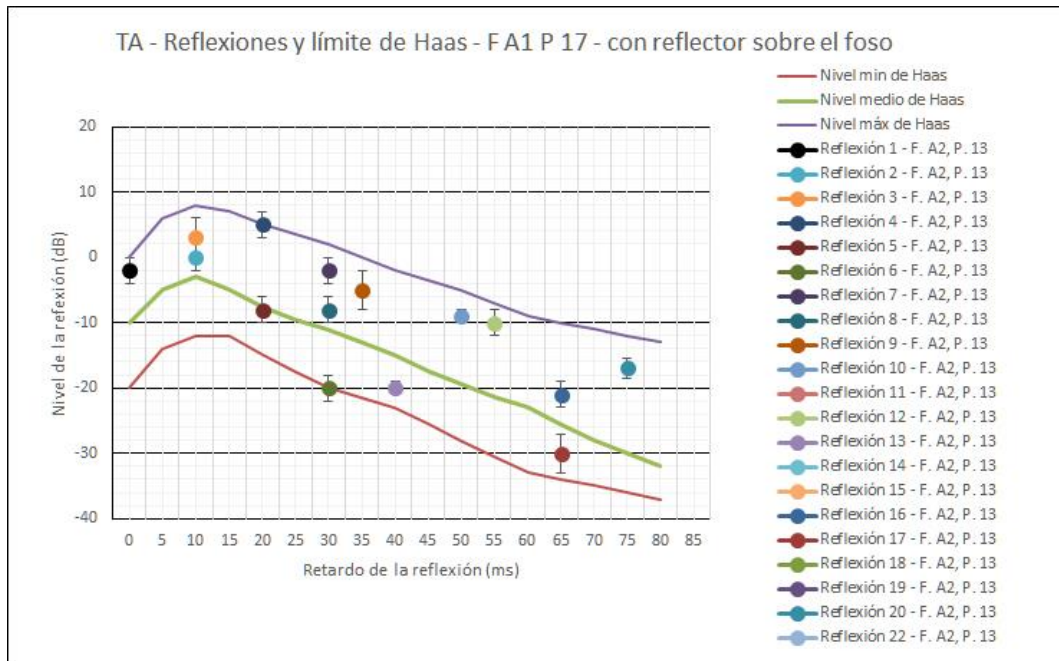


Figura 5.24. Ubicación de las primeras reflexiones en el espacio de Haas. Fuente A1, punto 17. Con reflector sobre el foso.

Ahora la distribución de reflexiones se ubica, en gran medida, en el límite superior del espacio de Haas, con ángulos de incidencia capaces de incrementar la sonoridad percibida -principal componente de la hipótesis central de este trabajo-. Del análisis estadístico mediante algoritmos de lógica difusa se obtuvo que la cantidad de reflexiones tempranas significativas dentro de la franja límite de Haas fue del 61 % del total. Y la cantidad por fuera de la zona de seguridad del 1,6 %.

El cambio en el comportamiento acústico de la platea también se puede evaluar analizando la distribución espacial de la energía lateral (Figuras 5.25 y 5.26).

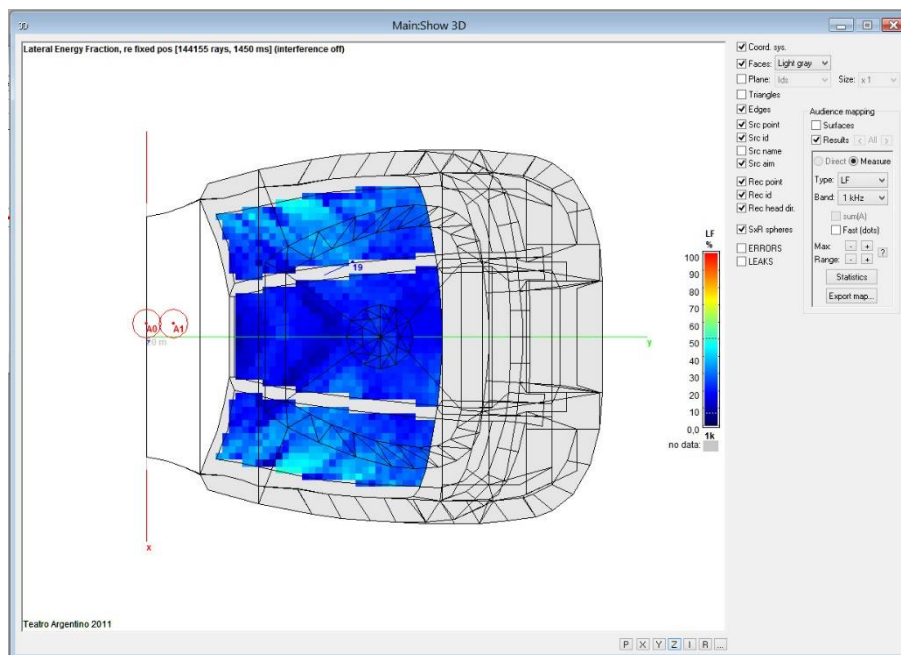


Figura 5.25. Distribución espacial de la energía lateral a 1000 Hz. Fuentes A0 y A1. Sin reflector sobre el foso.

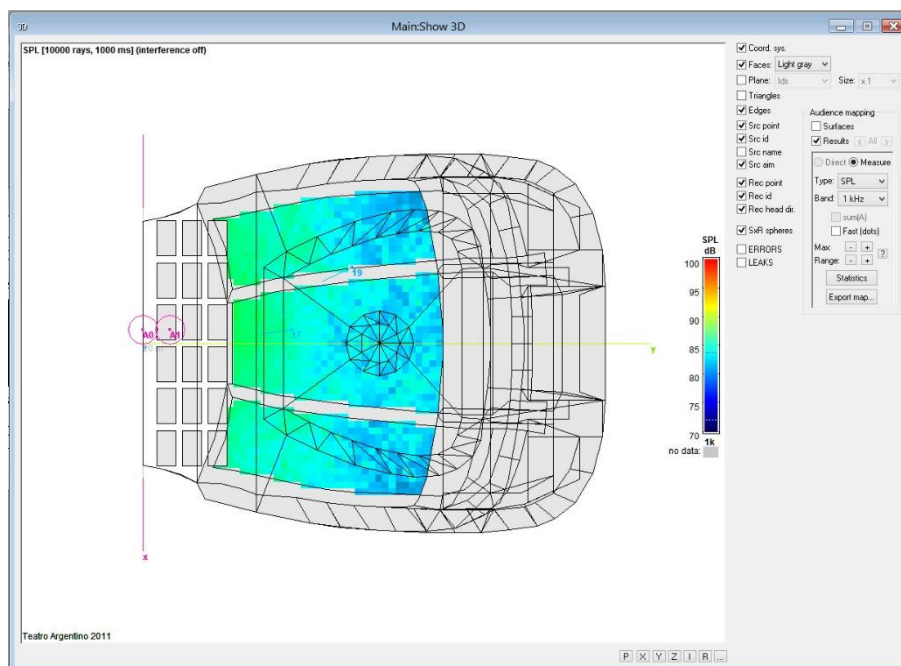


Figura 5.26. Distribución espacial de la energía lateral a 1000 Hz. Fuentes A0 y A1. Con reflector sobre el foso.

La comparación del examen punto a punto en todos los pares analizados, antes y después de la instalación del reflector acústico sobre el foso, muestra la aparición de una gran cantidad de energía ubicada dentro del límite de Haas. Con el reflector en posición, la mayoría de las reflexiones llegan con ángulos de incidencia que permiten

incrementar la sonoridad percibida. La textura dentro de los primeros 100 ms presenta una densidad relativa constante.

Si la hipótesis central de este trabajo es válida, la calidad acústica en la platea del teatro debería aumentar significativamente. Pero dicha validez sólo podrá ser verificada a partir de juicios de percepción realizados una vez construido el dispositivo.

### 3. CONSTRUCCIÓN DEL GRAN REFLECTOR SOBRE EL FOSO

Una vez concluida la etapa de diseño y verificada su eficacia teórica en el modelo digital, en agosto de 2011 comenzó la construcción del reflector en base al proyecto desarrollado.<sup>21</sup> En las Figuras 5.27 a 5.33 se puede ver parte del proceso de construcción e instalación del dispositivo.



Figura 5.27. Construcción de los paneles de madera en los talleres del TA.

---

<sup>21</sup> La decisión de construir el reflector fue tomada por las autoridades del teatro (gestión de Leandro Iglesias y Marcelo Lombardero) y contó con el invaluable apoyo del Director de la Orquesta Estable, Mtro. Alejo Pérez.



Figura 5.28. Construcción de la estructura de aluminio en los talleres del TA.



Figura 5.29. Instalación de malacates y tensores sobre el tímpano del proscenio.

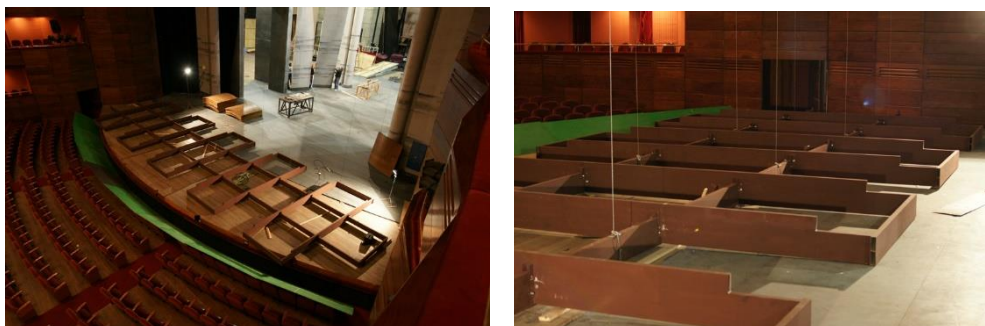


Figura 5.30. Armado del reflector sobre el pistón del foso.



Figura 5.31. Presentación y pintura de los módulos de madera.



Figura 5.32. Montaje de los módulos de madera.

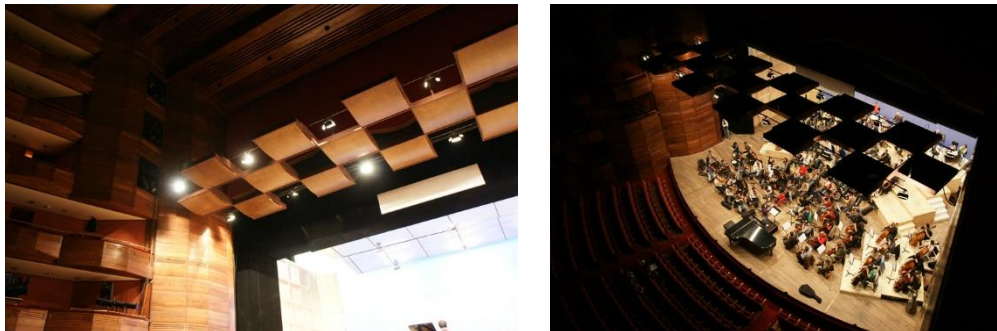


Figura 5.33. Vista en posición desde abajo y desde arriba.



Figura 5.34. Ensayo del 27/09/2011 para la *Missa Solemnis* de Beethoven (Orquesta y Coro Estables del TA, dirección de Alejo Pérez).

Una vez terminada la instalación, que quedó tal como se puede ver durante un ensayo en la Figura 5.34, pudieron comenzar las evaluaciones finales. Se realizaron numerosas mediciones físicas y una gran cantidad de encuestas de opinión a lo largo de cinco años de conciertos, recitales y espectáculos líricos.

#### **4. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DEL GRAN REFLECTOR – MEDICIONES Y EVALUACIÓN AUDITIVA**

##### **MEDICIONES EN LA SALA**

El día 26 de marzo de 2012 se realizaron mediciones acústicas completas, en base a la Norma ISO 3382, del campo acústico con el reflector en posición. Los valores obtenidos fueron similares, dentro del margen de error del sistema empleado, a los valores predichos por la simulación en el modelo digital.



Figura 5.35. Imágenes de las mediciones del 26 de marzo de 2012 en la Sala Ginastera del TA.

De los datos obtenidos se pudo deducir que:

- Se corrigió la ausencia de energía temprana entre la señal directa y la primera reflexión significativa en el intervalo de 0 ms a 80 ms.
- Aumentó considerablemente la *Fracción de energía lateral temprana*. En la posición 01 llegó a un valor de 35%, por sobre el mínimo de 30% recomendado en la bibliografía especializada.
- Aumento la energía temprana por debajo de 300 Hz.

Estos cambios en el campo físico/acústico dan cuenta de las conclusiones a las que se llegó mediante la evaluación auditiva que se expone más adelante.

#### **MEDICIONES DE RESPUESTA AL IMPULSO**

La comparación entre las respuestas al impulso tomadas antes y después de la instalación del reflector permite verificar la aparición de reflexiones de gran intensidad en el campo acústico temprano (Figuras 5.36 y 5.37).



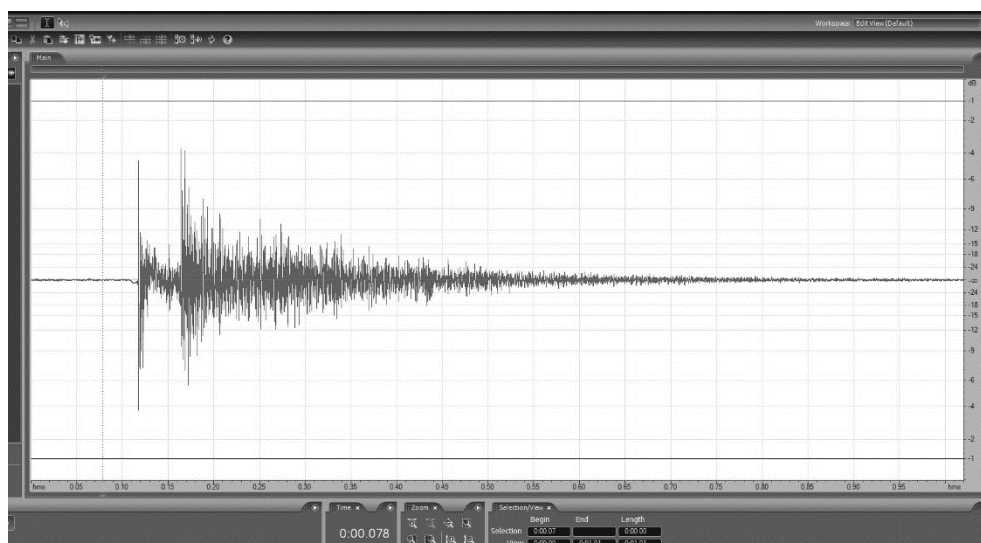


Figura 5.36. Respuesta al impulso obtenida el 22 de diciembre de 2010 en la posición 01 - antes de la instalación del reflector sobre el foso.

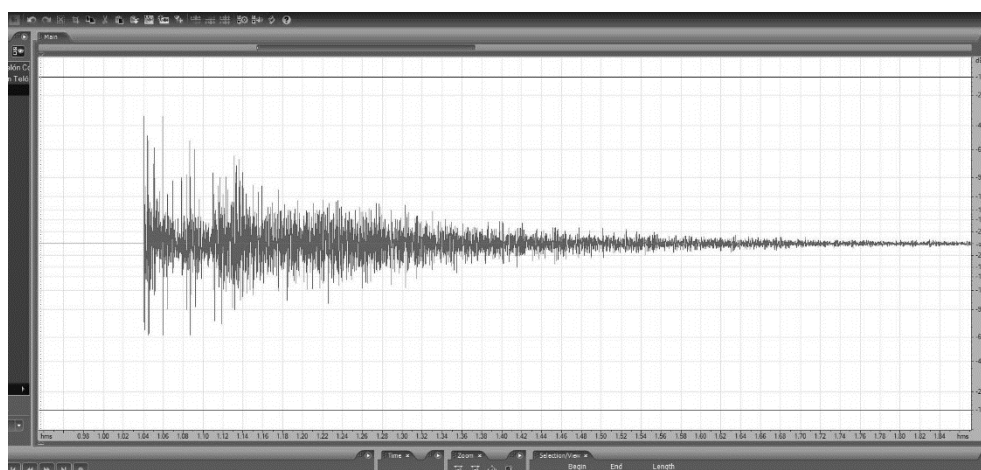


Figura 5.37. Respuesta al impulso obtenida el 26 de marzo de 2012 en la posición 01 - con el reflector sobre el foso en posición.

Durante las mediciones se pudo comprobar la gran sensibilidad del campo acústico en platea antes pequeños cambios en la altura e inclinación del reflector sobre el foso. Esa sensibilidad sería ampliamente aprovechada en numerosas puestas de ópera y música experimental.

### EVALUACIÓN AUDITIVA

Transcurridos más de cinco años desde su instalación, la evaluación auditiva del comportamiento del reflector en música sinfónica -resultado del análisis estadístico de una gran cantidad de encuestas realizadas a músicos, habitués y público general-, puede resumirse en los siguientes ítems:

- El efecto del reflector cubre acústicamente de modo homogéneo la totalidad del área de platea si la fuente se ubica en el proscenio sobre el foso. La inclinación longitudinal permite ajustar la cobertura en función de la formación orquestal de cada programa.
- Mejora la comunicación acústica entre los músicos ubicados sobre el proscenio. Se espera un incremento en el balance y el ensamble de escenario cuando se lo utilice junto a la nueva cámara de orquesta aún no terminada.
- Disminuye considerablemente el efecto de “incidencia rasante” (*seat-dip*) por difracción en las butacas.
- Aumenta la reverberación temprana a bajas frecuencias.
- Aumenta la sensación de estar “envuelto por el sonido” (*envelopment*) en la platea.
- No deteriora la calidad de los niveles superiores de la sala.

Los efectos perceptuales más destacados son el aumento en la presencia de frecuencias graves y la desaparición de la sensación de “sonido plano”. La textura y presencia de las cuerdas, ubicadas bajo el reflector, mejoró notablemente en la platea.

Como comparación, si se aumentara el número de contrabajos al doble, de 8 a 16 músicos, se incrementaría en sólo 3 dB el nivel sonoro de las señales de baja frecuencia, pero seguiría llegando tarde -80 ms después de la señal directa-, y la sensación general seguiría siendo pobre en relación a los sonidos graves y a la textura sonora en general.

Habiendo comprobado la eficacia acústica de la formación de reflectores para grupos instrumentales y vocales ubicados en el escenario y proscenio -música sinfónica, coral y de cámara-, en el Anexo I se analiza su comportamiento en diferentes puestas de óperas.

## 5. CONCLUSIONES

El caso de la Sala Ginastera del TA ofreció una oportunidad de excepción para testear la hipótesis central planteada en esta tesis. En resumen:

- Se realizó un diagnóstico físico que permitió confirmar los juicios de opinión de los habitués a la sala: el campo acústico en la platea no era de gran calidad para música sinfónica.
- Se analizó este comportamiento a la luz de la hipótesis central de la tesis, que postula la posibilidad de mejorar sustancialmente la calidad acústica de una sala operando únicamente sobre el campo temprano.

- Se aplicó la metodología enunciada en el Capítulo 1 de este trabajo. A partir de un modelo físico matemático y de simulaciones digitales se diseñaron pruebas experimentales cuyos resultados, a su vez, fueron contrastados con las predicciones obtenidas en los modelos digitales elaborados *ad-hoc*.
- Los resultados predichos se verificaron en el modelo digital.

Una vez obtenido el diagnóstico central y definidas las herramientas teóricas a aplicar, se diseñó y construyó un dispositivo que, actuando únicamente en el campo acústico temprano, permitió:

- Aumentar la cantidad de reflexiones laterales tempranas ubicadas dentro del “límite de Haas” en la platea.
- Mejorar la textura temporal de las señales aumentando la cantidad de reflexiones tempranas dentro de los primeros 80 ms a partir de la llegada del sonido directo.
- Corregir la falta de bajas frecuencias y la falta de impresión espacial en la platea sin deteriorar el sonido en los niveles superiores de la sala.

Tanto las mediciones físicas como los juicios de músicos, críticos y público, realizadas luego de gran cantidad de conciertos sinfónicos, sinfónicos corales y de diferentes puestas de óperas, permiten sostener la validez de la hipótesis central de este trabajo. A partir de la aplicación concreta de esta hipótesis, operando únicamente en el campo acústico temprano de la sala, se pudieron corregir los defectos señalados por las encuestas de opinión, mejorándose la sonoridad, la impresión espacial y el balance espectral percibido por los oyentes.

**REFERENCIAS**

- Ando, Yoichi (1982). "Perception of coloration in sound fields in relation to the autocorrelation function". *Journal of the Acoustical Society of America*, 71, 616-629.
- Ando, Yoichi (1998). *Architectural Acoustics. Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. New York: Springer Verlag.
- Basso, Gustavo (2009). "La percepción espacial del ambiente acústico". *Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética*. Bernal: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
- Basso, Gustavo (2016). "Acoustical design of the new canopy for the Ginastera Hall of the Teatro Argentino of La Plata". *Proceedings of The International Symposium on Musical and Room Acoustics ISMRA 2016*. La Plata: AdAA.
- Beranek, Leo (1996). *Concert Halls and opera houses: How they sound*. New York: Acoustical Society of America.
- Rindel, Jens (1991). "Design of New Ceiling Reflectors for Improved Ensemble in a Concert Hall". *Applied Acoustics*, 34, pp. 7-17
- Skålevik, Magne (2006). "Orchestra Canopy Arrays, some significant features". *Proceedings of the Baltic Nordic Acoustical Meeting BNAM*. Gothenburg: ICA.
- Skålevik, Magne (2007). "Low frequency limits of reflector arrays". *Proceedings of ICA 2007*. Madrid: ICA

## **CAPÍTULO 6. ESTUDIO DE CASO 2. SALA SINFÓNICA DE LA USINA DEL ARTE (CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES)**

El diseño de la Sala Sinfónica de la Usina del Arte permitió aplicar por primera vez el modelo, desarrollado en base a la hipótesis de esta tesis, al diseño acústico integral de una sala para música de grandes dimensiones y capacidad, caso que se encuadra dentro del tipo 3 de la lista de estudios de casos: "Salas diseñadas y construidas a partir de lo establecido por el modelo bajo estudio".

Como es usual en estos procesos, el resultado final es el producto del trabajo en equipo de un conjunto de arquitectos, ingenieros, músicos y asesores. El proyecto de la Usina del Arte estuvo dirigido por el Arq. Álvaro Arrese e integrado por los arquitectos Rodolfo Gassó, Juan Meoz y Sergio Richonnier. Participaron del diseño acústico el ing. Rafael Sánchez Quintana y el autor de este trabajo.

### **RESUMEN**

En este capítulo se describe el proceso de diseño y verificación acústica de la Sala Sinfónica de la Usina del Arte. Se detalla la metodología empleada, que sigue a grandes rasgos la descrita en el Capítulo 1, y se muestra cómo se aplicaron las principales hipótesis en la configuración del campo acústico temprano de la totalidad del área de público del espacio. Se describen las estrategias particulares que permitieron abordar la complejidad matemática del modelo y se detallan los procedimientos de análisis, teóricos y experimentales, que se usaron para evaluar la calidad acústica del diseño final. Por último, se ofrecen algunos ejemplos del uso musical que ha tenido la sala desde su inauguración.

### **1. METODOLOGÍA**

La metodología aplicada al caso de la Sala Sinfónica de la Usina del Arte es diferente a la usada en el Teatro Argentino, porque esta vez se trató de una sala a diseñar y construir desde el comienzo. Sigue, en esencia, la que se describió en el capítulo introductorio de esta tesis. En este caso particular se recorrieron las siguientes etapas:

- Se elaboró un modelo acústico digital de la Sala Sinfónica en base al modelo físico/matemático desarrollado en la investigación madre.

- Se diseñó el campo acústico interior centrando la atención en el campo acústico temprano -hipótesis central de esta tesis-, buscando maximizar la energía lateral temprana dentro del límite superior de Haas.
- Durante el proceso de construcción se midió periódicamente el campo acústico de la sala en obra en base a los parámetros definidos por la norma ISO 3382, con el fin de detectar cualquier posible desvío respecto del modelo.
- Se estimó la eficacia de la intervención en base al Índice de Calidad Acústica AQL (Beranek, 1996) y a la evaluación auditiva de interpretaciones musicales de diferentes géneros y estilos.

## 2. HISTORIA - PROCESO DE DISEÑO

El edificio original de La Boca fue diseñado por el arquitecto Juan Chiogna para contener una usina termoeléctrica de la Compañía Ítalo-Argentina de Electricidad (CIAE). Se lo construyó entre 1912 y 1916 y funcionó eficazmente hasta la década de 1990. Con la privatización de la empresa SEGBA la usina quedó sin uso y abandonada.

Entre agosto y setiembre del año 2000 el Gobierno Nacional y el de la Ciudad de Buenos Aires decidieron la recuperación del edificio para ubicar allí al Auditorio de la Ciudad de Buenos Aires.

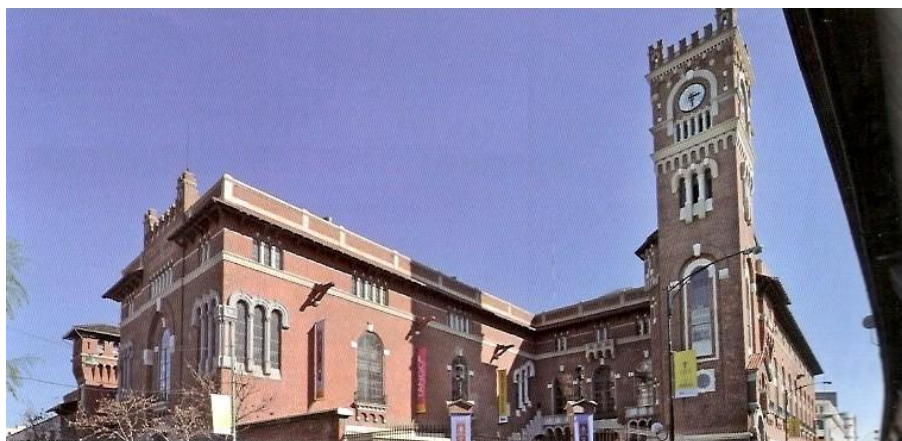


Figura 6.1. Foto de la Usina del Arte desde afuera.<sup>22</sup>

Lo que sigue es un extracto del capítulo "Una arquitectura para la música" en el libro *La Usina del Arte. Puesta en valor y reciclaje* (Basso, S. Quintana, 2014).

---

<sup>22</sup> Tomada de: <http://4.bp.blogspot.com/-kdgsUh49R4/UVogWBumRPI/AAAAAAAAAEwU/kgFOtY-caxY/s1600/Usina+artes.jpg>

Cuando en el año 2001 se planteó la posibilidad de construir un auditorio para música sinfónica en la ex Usina de La Boca -el primer auditorio de esas características en la ciudad de Buenos Aires y el segundo en el país- de inmediato surgieron dos interrogantes insoslayables: ¿era viable semejante destino en un sitio altamente contaminado por el ruido de camiones en las calles circundantes y a metros de una autopista muy transitada? y ¿las naves del viejo edificio podrían albergar en su interior a uno de los objetos arquitectónicos más complejos, al estar su geometría condicionada por la estricta física del sonido? De la respuesta a estas dos preguntas dependía la viabilidad del proyecto. La segunda de ellas fue contestada a partir del modelo desarrollado para esta tesis.

El sitio escogido para establecer las salas para música, en particular la Sala Sinfónica, debía poseer la geometría y las dimensiones necesarias para albergar un espacio para más de 1.200 espectadores con una acústica de primer nivel. Luego de analizar cuidadosamente la nave de calderas se concluyó que podría contener un auditorio de tipología “caja de zapatos” -es decir con una planta rectangular y altura constante- de dimensiones adecuadas. Algunas de las mejores salas para música sinfónica del mundo presentan esta configuración, por ejemplo el *Symphony Hall* de Boston, el *Musikverein* de Viena y el *Concertgebouw* de Ámsterdam. Pero, como contrapartida, también existen muchas salas con dicha tipología y con muy mala acústica.

Se pudo ubicar en la nave elegida un paralelepípedo de 45 m de largo, 23 m de ancho y 20 m de alto que, en un primer análisis, resultaba apto para contener una sala para unas 1.200 butacas y un escenario para una orquesta sinfónica con maderas a 4. Uno de los resultados más importantes del análisis fue que el espacio poseía el volumen necesario para alcanzar un tiempo de reverberación de 2 segundos a frecuencias medias, condición necesaria para conseguir el comportamiento acústico esperado.

Luego del necesario intercambio de ideas y, tras numerosas consultas con el equipo de arquitectos a cargo, se decidió implantar la sala en el espacio limitado por los muros de la nave de calderas. La principal objeción que se encontró tuvo que ver con el acceso del público, que debía ingresar desde los extremos de la sala, tanto por su extremo posterior como por detrás del escenario -el ingreso por los laterales no resultaba sencillo ni suficiente para tal cantidad de personas-. El Arq. Álvaro Arrese propuso entonces un sistema de rampas de acceso (el “Zigurat” que se puede ver en la Figura 6.2) que resolvía el problema del público, pero cuyo comportamiento acústico constituía una incógnita: habría que realizar un cuidadoso examen físico para responderla.

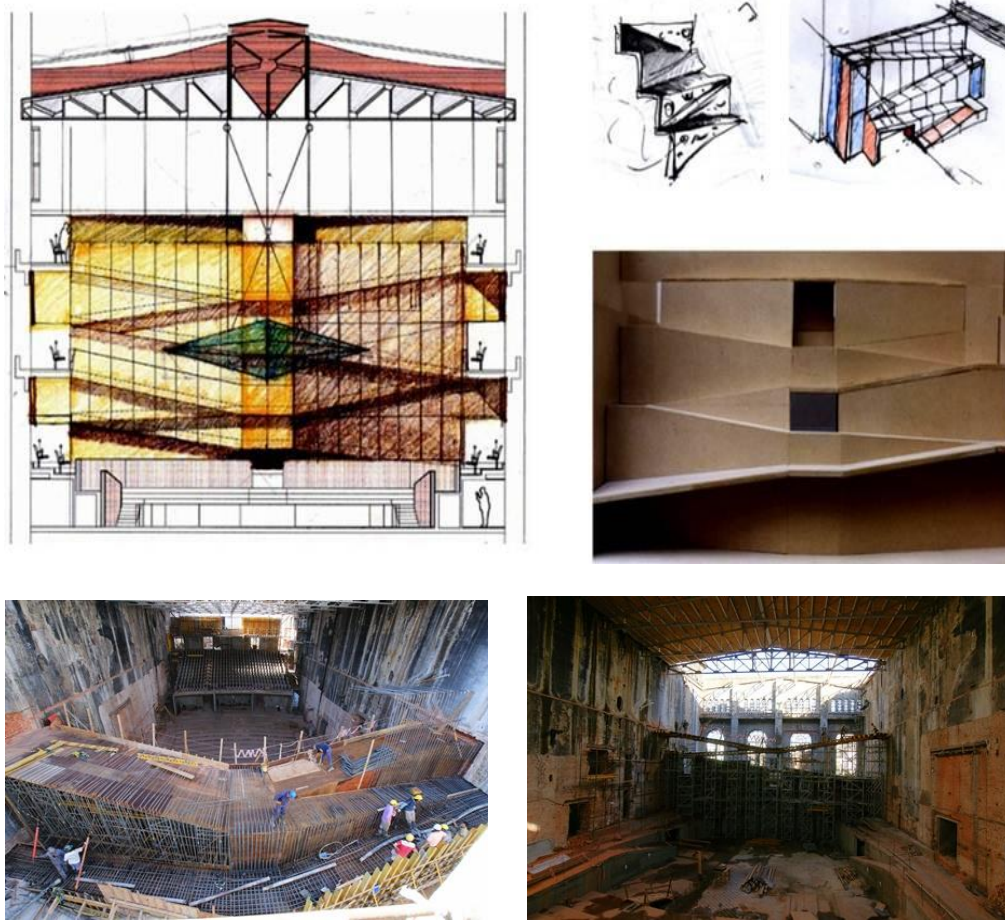


Figura 6.2. Rampa de acceso de público detrás del escenario ("Zigurat"). Dibujos de Álvaro Arrese, maqueta de trabajo y dos etapas de su construcción.

Para contestar sobre la viabilidad de las propuestas realizadas por el equipo de arquitectos, se desarrolló entonces un modelo acústico digital de la Sala Sinfónica, que fue empleado en el proceso de diseño y durante el control de obra en la etapa de construcción. Este modelo permitió simular en un espacio virtual cada modificación geométrica e inferir las consecuencias acústicas de los materiales propuestos para revestir el interior de la sala. En la Figura 6.3 se muestran algunos ejemplos del modelo desarrollado.



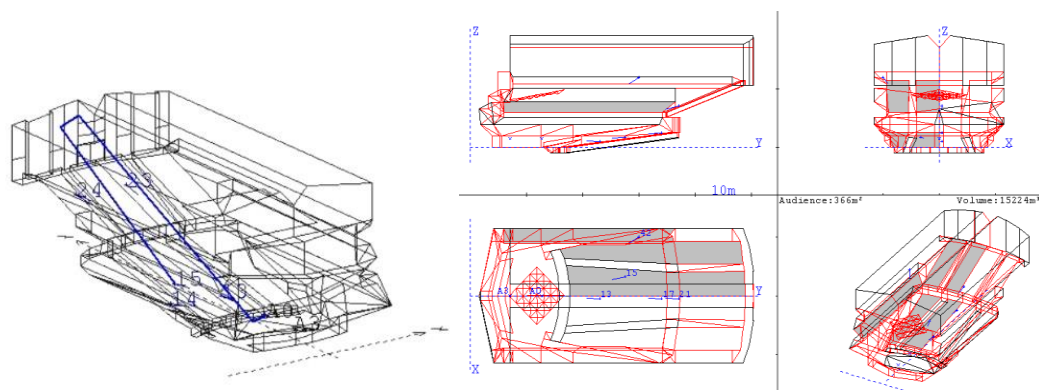


Figura 6.3. Imágenes del modelo acústico digital de la Sala Sinfónica en Catt-Acoustic- V8 (2007)

Del modelo digital se obtuvieron numerosas respuestas a las consultas planteadas durante el proceso de diseño. La más esperada fue, sin duda, la que interrogaba sobre la viabilidad acústica del Zigurat. Los resultados no sólo fueron favorables a la propuesta, sino que mostraron que la estructura de planos inclinados escalonados del Zigurat generaba un campo acústico temprano muy rico en reflexiones laterales tempranas y permitía una excelente comunicación sonora entre los músicos en el escenario.

Vale la pena aquí mencionar un dato histórico. Luego del trágico incendio de la discoteca *República Cromañón* la noche del 30 de diciembre de 2004, en la que murieron 194 personas, la mayoría adolescentes, se modificó el Código de edificación de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. A raíz de los cambios en el Código, las rampas del Zigurat ya no resultaron aptas para el acceso del público y se tuvieron que abrir puertas laterales para tal fin. Sin embargo se decidió conservar el Zigurat por el gesto arquitectónico que expresaba y por su excelente comportamiento acústico.

A partir del modelo digital se pudieron verificar los criterios principales de diseño de la sala, basados en la generación de una gran cantidad de energía lateral temprana sobre la audiencia, en la difusión de banda ancha de las ondas sonoras y en la distribución espacial homogénea en todas las butacas. La idea central fue que las reflexiones tempranas llegasen a cada espectador con un retardo, nivel sonoro y fase apenas por debajo del llamado “límite de Haas”. De alcanzarse este objetivo, se lograría un campo acústico muy nítido, en el que fuese posible oír cada detalle de los sonidos sobre el escenario, pero a la vez envolvente y con una gran definición espacial. Naturalmente, la sala no debía presentar los típicos defectos que se encuentran en casos similares, con mayor frecuencia que la deseada, como ecos, coloraciones, resonancias, distorsiones o lugares ciegos.

Una vez establecidos los aspectos geométricos generales de la envolvente principal, los detalles interiores fueron motivo de un cuidadoso análisis. Como se acordó conservar la pendiente a dos aguas de la cubierta de la nave y se detectó en la simulación la posible aparición de un eco proveniente del cielorraso, se decidió instalar un nervio en forma de V en la arista de encuentro de sus dos planos, cuya función era la de distribuir lateralmente la energía proveniente del escenario (Figura 6.4).

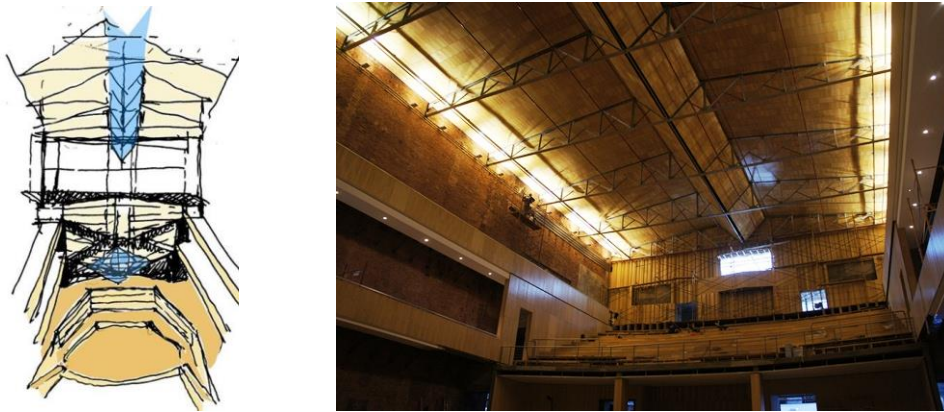


Figura 6.4. Superficies en V en el eje de simetría del cielorraso. Dibujo de Álvaro Arrese y vista en obra.

Las pasarelas laterales se espaciaron en altura para proveer reflexiones no frontales de baja frecuencia sobre la platea, mientras que la difusión sonora de media y alta frecuencia se reforzó a partir de revestimientos y dispositivos diseñados especialmente para tal fin (Figura 6.5).

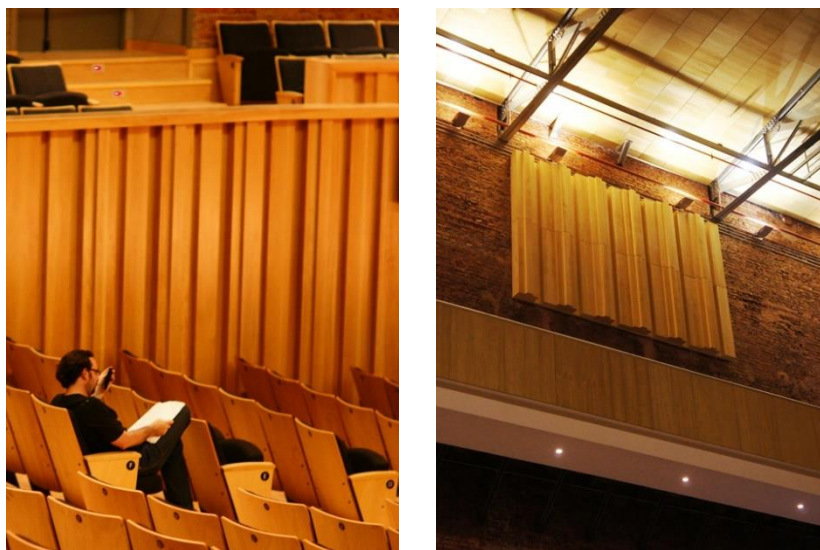


Figura 6.5. Revestimientos y dispositivos difusores de sonido.

Un elemento central en el diseño de la Sala Sinfónica es el gran reflector acústico, de altura e inclinación variable, sobre el escenario (Figura 6.6). Este dispositivo no sólo actúa como elemento de distribución de la energía acústica, permitiendo a la vez la ecualización de los niveles sonoros en la platea y la correcta audición y ensamble de los músicos en el escenario, sino que puede configurarse para adaptar la sala a las diferentes formaciones instrumentales que la van a usar -desde música de cámara hasta grandes espectáculos sinfónico-corales.

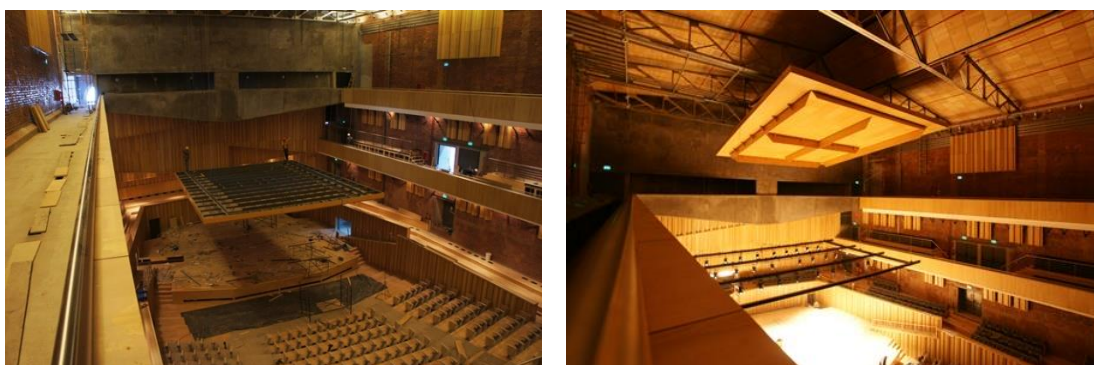


Figura 6.6. Montaje y vista en posición del gran reflector acústico sobre el escenario.

La sala cuenta además con otros elementos de acústica variable, como cortinados y paneles, cuya disposición final fue establecida a partir de pruebas con músicos en escena.

Una vez acordadas las estrategias para resolver los temas centrales -como los niveles de ruido y la tipología acústica más apropiada- y definidos los objetivos acústicos y musicales del auditorio, comenzó su construcción.

El control de obra fue constante durante todo el proceso -en los períodos de mayor actividad se llegaron a realizar verificaciones y mediciones semanales- y se pudo acompañar la instalación de cada material o dispositivo con la evaluación acústica correspondiente. En los casos más complejos, como la colocación de las butacas o del reflector sobre el escenario, se analizaron las consecuencias futuras sobre la obra completa a partir de modelos estadísticos y de simulaciones en el modelo acústico digital.



Figura 6.7. Mediciones acústicas de control de obra.

Los resultados de las mediciones bajo Norma ISO 3382 con la sala completa desocupada, realizados por primera vez el 31 de octubre de 2011, dieron valores de tiempo de reverberación comprendidos dentro de los propuestos en la etapa de diseño (alrededor de 2 segundos a frecuencias medias). Si a lo anterior le agregamos la inexistencia de defectos, como ecos o coloraciones, se puede afirmar que se lograron los objetivos acústicos globales propuestos.



Figura 6.8. Pruebas con músicos en la Sala Sinfónica.

A fines de 2011 comenzaron las pruebas de la sala sinfónica con músicos en el escenario, fundamentales para ajustar los elementos de acústica variable previstos en el diseño. Este proceso de “afinación”, realizado a oído y con la colaboración de músicos y de público especializado, continuó durante un largo período: cada recital o concierto aporta nuevos datos que deben ser procesados hasta alcanzar el resultado -el “sonido de la sala”- deseado.

La Sala Sinfónica se inauguró el 23 de mayo de 2012.

### 3. DISEÑO ACÚSTICO DE LA SALA SINFÓNICA

Durante el proceso de diseño se evaluaron gran cantidad de geometrías, que fueron ajustándose en base al proceso iterativo que se describe a continuación y a necesidades propias de la arquitectura. A modo de ilustración, en las Figuras 6.9 a 6.12 se muestran algunas de ellas.

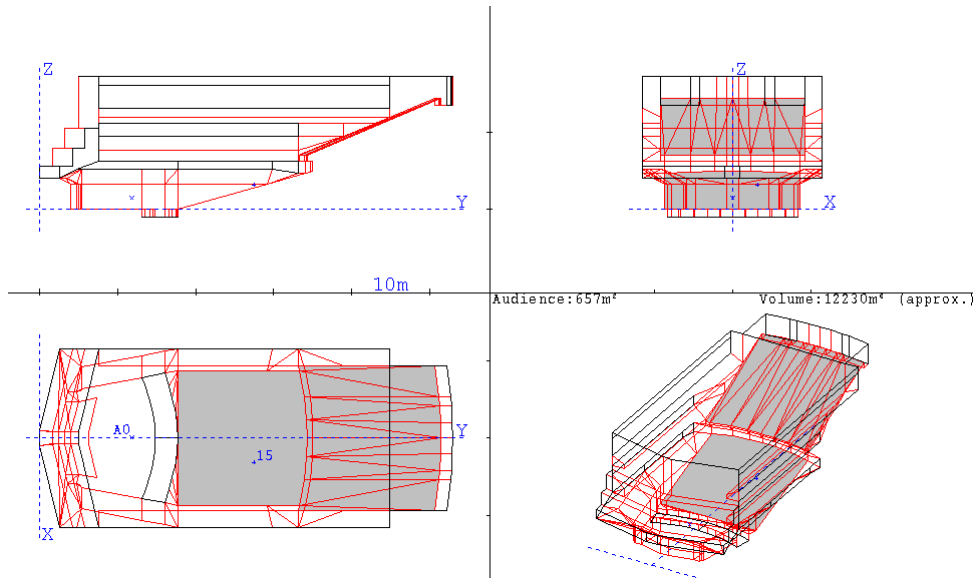


Figura 6.9. Modelo 1. Cielorraso plano - platea y pullman muy inclinados.

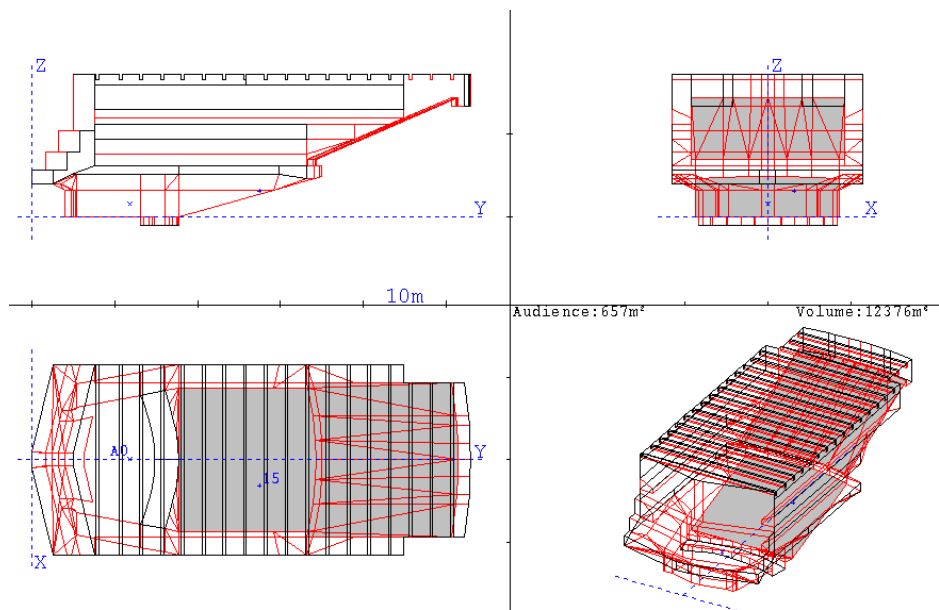


Figura 6.10. Modelo 5. Cielorraso plano con vigas transversales - platea y pullman muy inclinados.

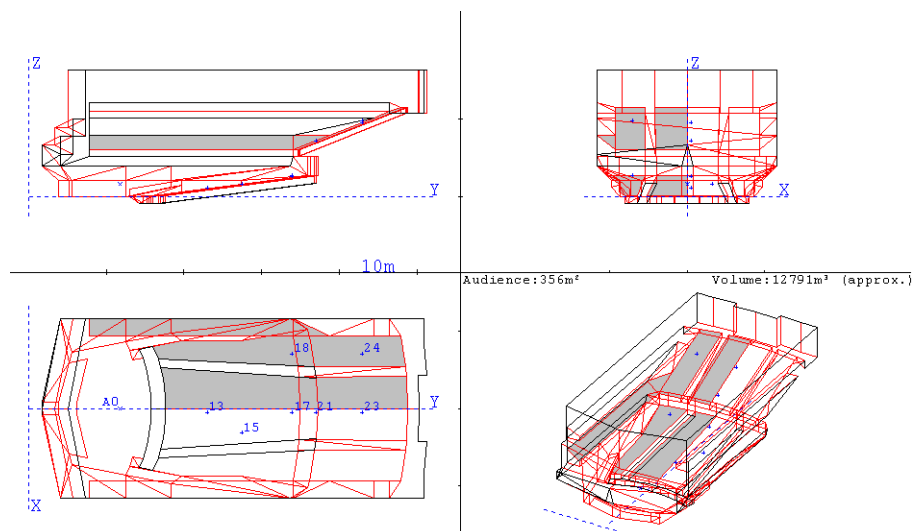


Figura 6.11. Modelo 8. Cielorraso plano - platea y pullman con inclinación reducida.

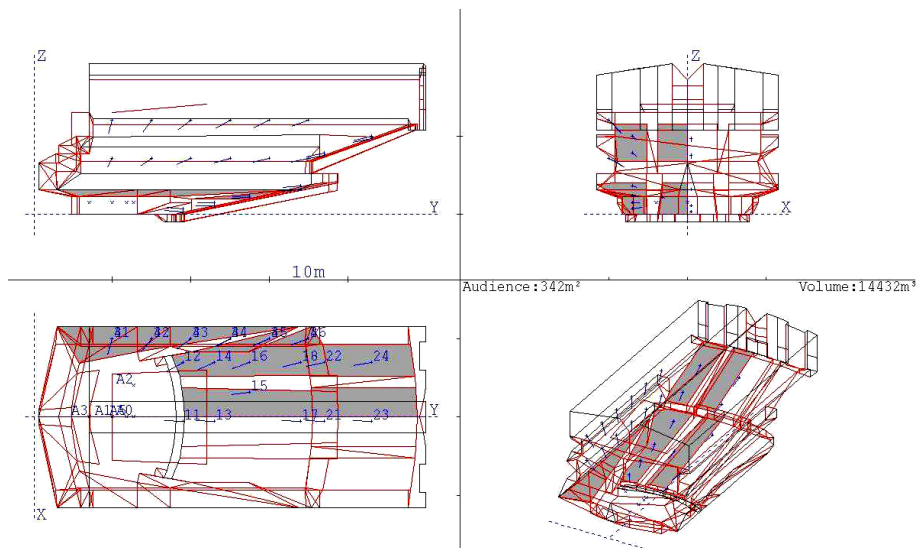


Figura 6.12. Modelo 11. Cielorraso a dos aguas con "V" central - platea y pullman con inclinación mínima.

### CONFIGURACIÓN DEL CAMPO TEMPRANO DENTRO DEL LÍMITE DE HAAS

Para ejemplificar el proceso de diseño acústico del campo acústico en base a la hipótesis central de esta tesis, llevando al límite de Haas el campo acústico temprano, veamos sintéticamente el análisis realizado en una etapa intermedia de su desarrollo.

### ANÁLISIS PARA UN SÓLO PAR EMISOR/RECEPTOR

En la Figura 6.13 se reproduce nuevamente el gráfico del espacio de Haas. El objetivo en este caso es que, dentro de los primeros 100 ms luego del arribo del sonido directo,

cada reflexión tenga una intensidad y un retardo tal que le permita ubicarse en la región de ensanchamiento de la imagen. Idealmente, para aumentar al máximo la impresión espacial y la sonoridad percibida, la reflexión debería caer tan cerca como resulte posible del límite *Ensanchamiento de la imagen/Eco*.

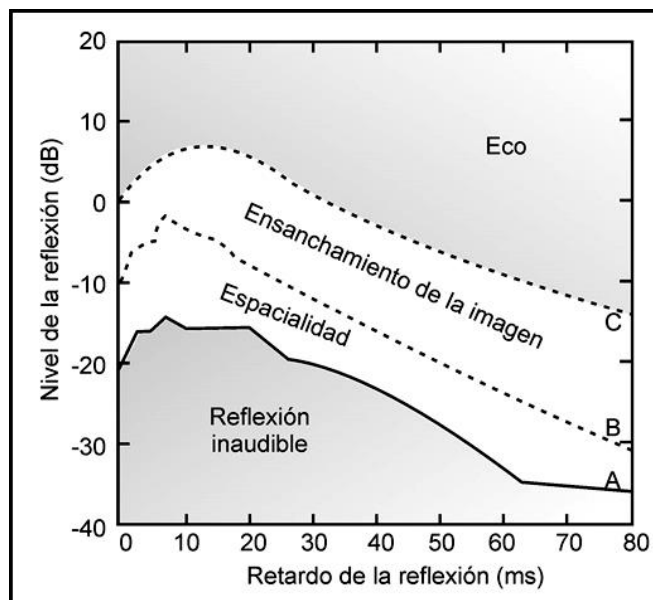


Figura 6.13. Espacio de Haas (Basso, 2009).

Si se simula en el modelo digital un punto de emisión omnidireccional en el escenario, desplazado hacia la izquierda del eje de simetría longitudinal de la sala, y un punto de recepción (ubicación 13, fila 4 en el eje de simetría), el sistema provee la secuencia de reflexiones en el campo temprano que se puede ver en la Figura 6.14. Como el tiempo se toma a partir de la llegada a la butaca 13 de la onda directa, el gráfico representa los primeros 100 ms desde ese instante.



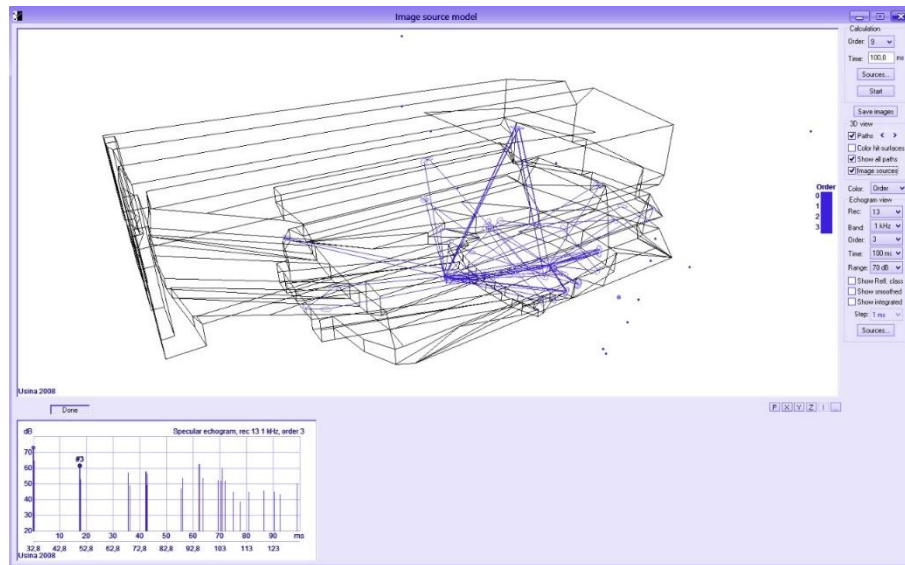


Figura 6.14. Modelo intermedio. Fuente A2, punto de recepción 13.

En el gráfico se representan cerca de 30 reflexiones diferentes. Para analizarlo en detalle se debe estudiar cada una de las reflexiones por separado. Por ejemplo, la Reflexión N° 19 -proveniente del zigurat- llega con un retardo de 75 ms y una reducción de 27 dB con relación a la señal directa (Figura 6.15).

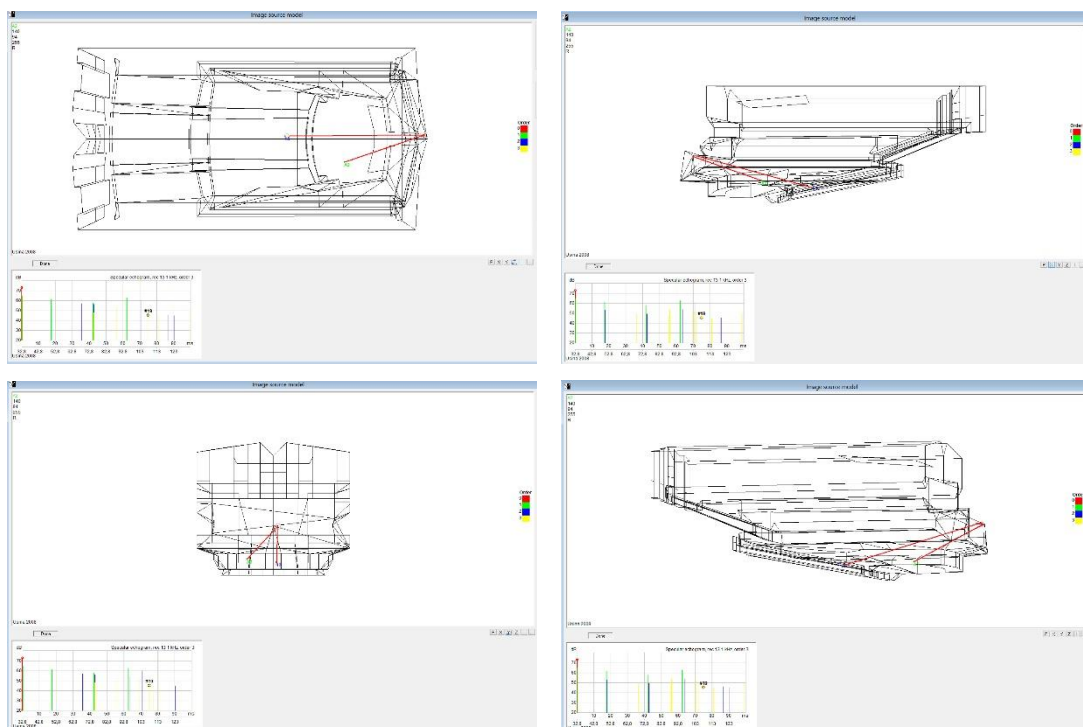


Figura 6.15. Modelo intermedio. Reflexión N° 19 -proveniente del zigurat-. Fuente A2, punto de recepción 13.

Para averiguar si la Reflexión N° 19 cumple con la condición de Haas hay que representarla en el espacio definido por la Figura 6.13 (Figura 6.16):

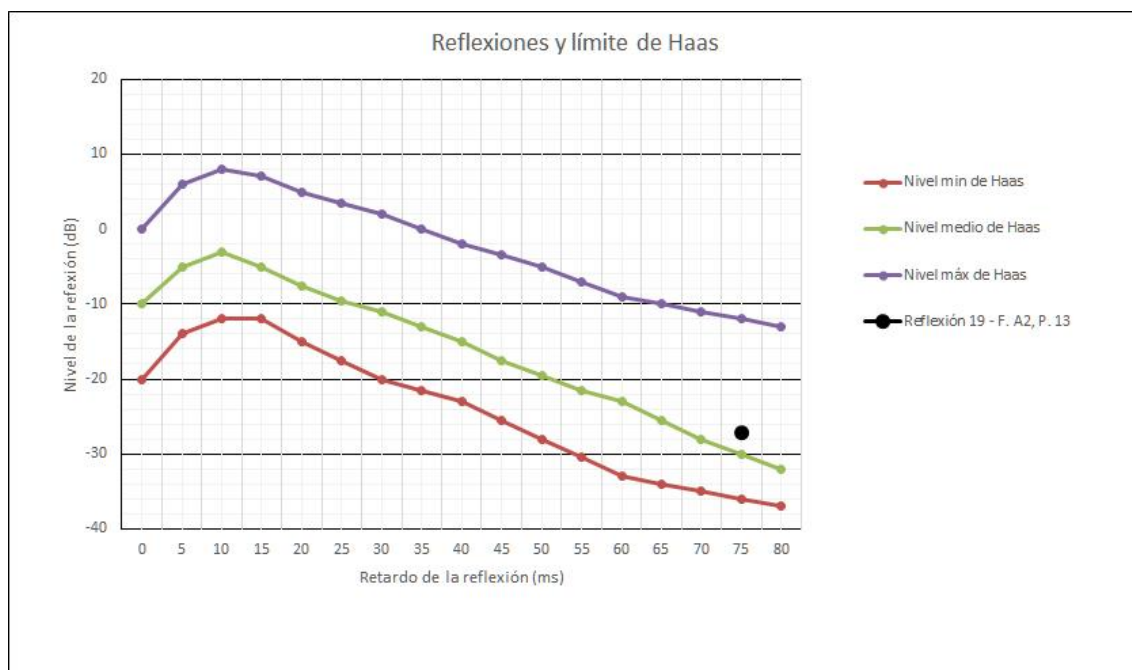


Figura 6.16. Modelo intermedio. Ubicación de la reflexión N° 19 en el espacio de Haas - fuente A2, punto 13.

La Reflexión N° 19 queda ubicada dentro de la zona de seguridad del Espacio de Haas: se va a integrar perceptualmente al sonido directo.

Además, como el ángulo vertical de llegada es mayor que el de la señal directa, será menos afectada por el efecto de incidencia rasante (*seat-dip*) conservando el espectro original de la fuente en baja frecuencia -se percibirán mejor los sonidos graves-.

Sin embargo, el quedar dentro de la zona de confort de Haas, no le agrega sonoridad adicional significativa a la onda directa. Si ésta es la intención, sería mejor llevar la reflexión cerca del límite superior, por ejemplo aumentando su nivel de presión sonora en 10 dB.

Se realizó un examen de todas las reflexiones entre la fuente A2 y el punto de recepción 13 en los primeros 100 ms para tener un panorama general del comportamiento del campo acústico temprano en este caso particular (Figuras 6.17 a 6.19).

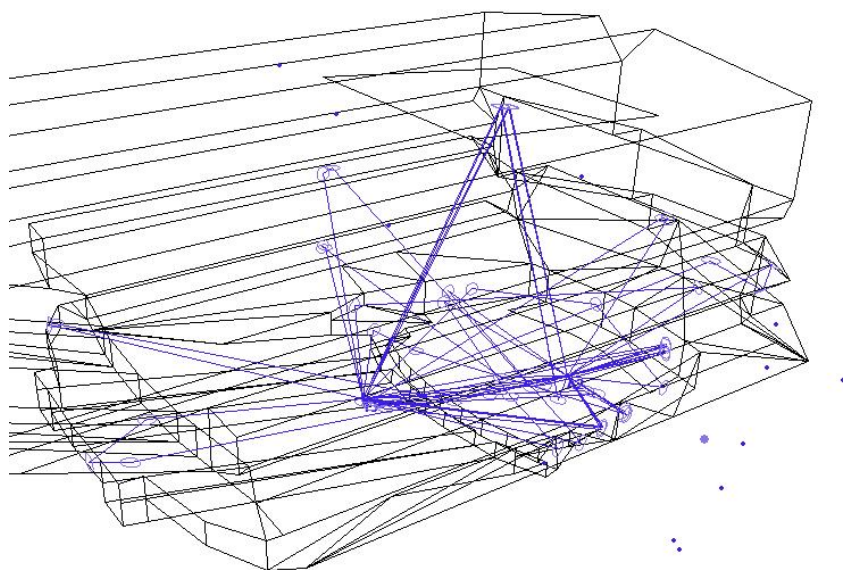


Figura 6.17. Modelo intermedio. Reflexiones entre la fuente A2 y el punto de recepción 13 en los primeros 100 ms.

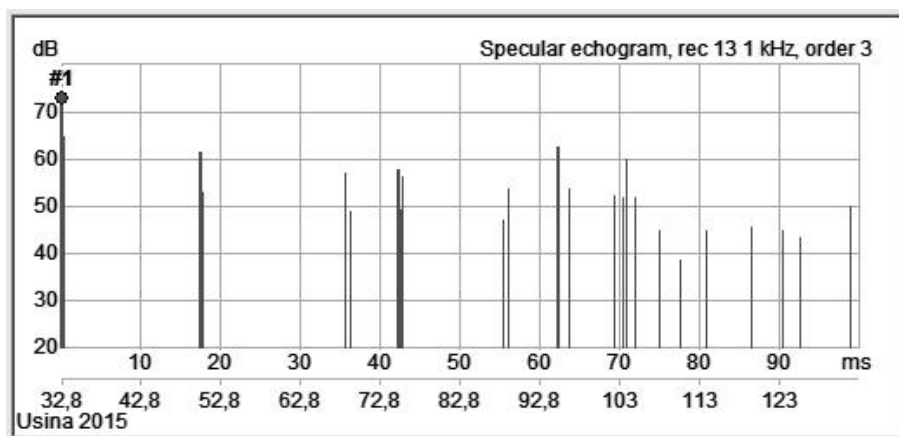


Figura 6.18. Modelo intermedio. Ecograma entre la fuente A2 y el punto de recepción 13 en los primeros 100 ms.

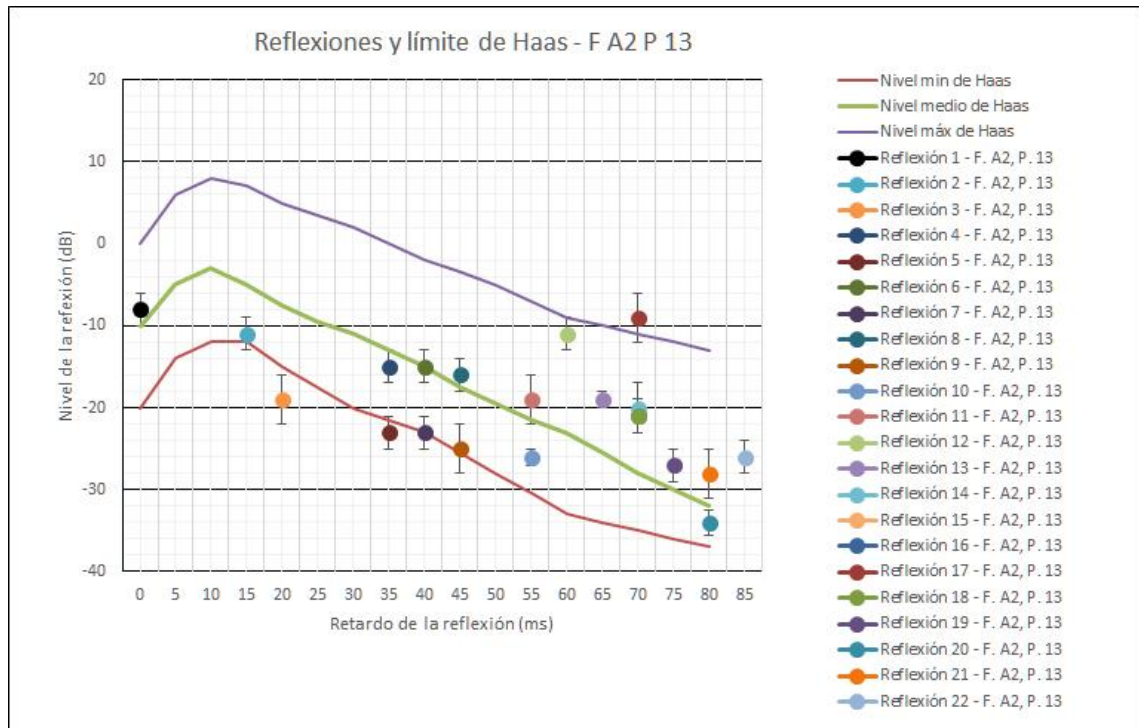


Figura 6.19. Modelo intermedio. Ubicación de las primeras 22 reflexiones en el espacio de Haas. Fuente A2, punto 13.

Las cotas de error expresan la incertidumbre en el conocimiento de los coeficientes de absorción de los materiales en los que se reflejan las ondas, típicamente del  $(10 \pm 5) \%$  del valor indicado en las tablas.

Se observa que sólo dos reflexiones se apartan peligrosamente de la zona de seguridad, la 3 y la 17.

La Reflexión 17 queda por encima del límite de Haas y podría percibirse separada del sonido directo. Cuando se analiza el origen de esta reflexión se puede ver que la causa el gran reflector móvil sobre el escenario (Figura 6.20).

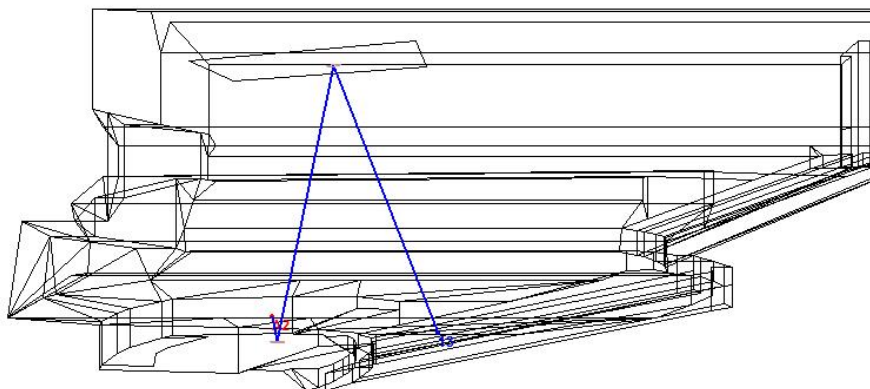


Figura 6.20. Modelo intermedio. Origen de la Reflexión 17 - fuente A2, punto 13.

Como el reflector podrá desplazarse verticalmente y pivotar sobre su eje horizontal, la solución es sencilla: se lo puede bajar 2,5 m para adelantar 15 ms la reflexión 17 y ubicarla en la zona segura, o se lo puede inclinar lo suficiente para que esa reflexión directamente no ocurra.

La Reflexión 3 es diferente, porque queda por debajo del límite inferior de Haas y podría producir coloración espectral, especialmente molesta si proviene desde un costado con un ángulo cercano a los  $45^\circ$  (Figura 6.21).

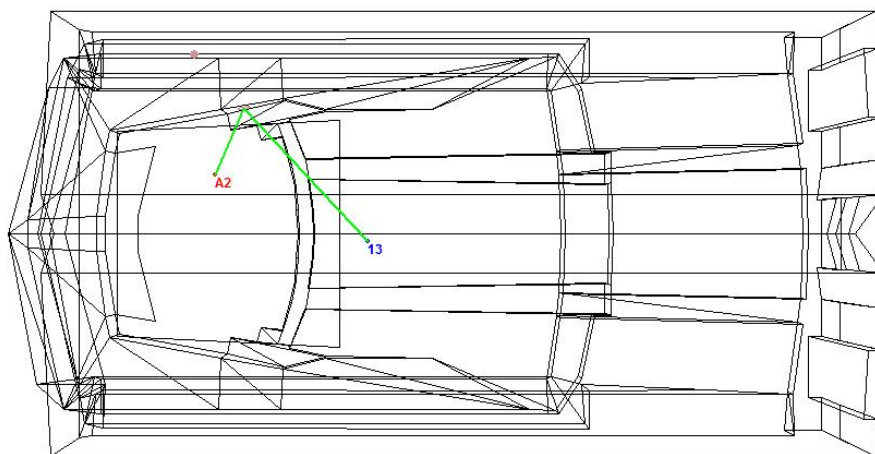


Figura 6.21. Modelo intermedio. Origen de la reflexión 3 - fuente A2, punto 13.

En este caso la solución no es sencilla: habría que modificar el ángulo del lateral del escenario o reemplazar la reflectividad de esa superficie. La primera opción implica un

complejo replanteo de la geometría de la sala, con todas sus consecuencias arquitectónicas. La segunda presenta a su vez dos posibilidades: reducir la energía de la reflexión colocando un material absorbente -alternativa que contradice nuestra intención de aprovechar al máximo el rendimiento sonoro de los instrumentos musicales- o redistribuir la energía incidente en un abanico de reflexiones no especulares mediante la colocación de dispositivos acústicos difusores. Este último fue el camino que escogimos para resolver esa superficie en particular (Figura 6.22).



Figura 6.22. Difusor en la pared lateral del escenario.

Resuelto el sistema para el par A2/13, fue necesario analizar otros pares fuente/receptor. Por ejemplo, la secuencia de reflexiones para la misma fuente A2 y la ubicación 16, sobre un lateral a mitad de la platea, se puede ver en la Figura 6.23.

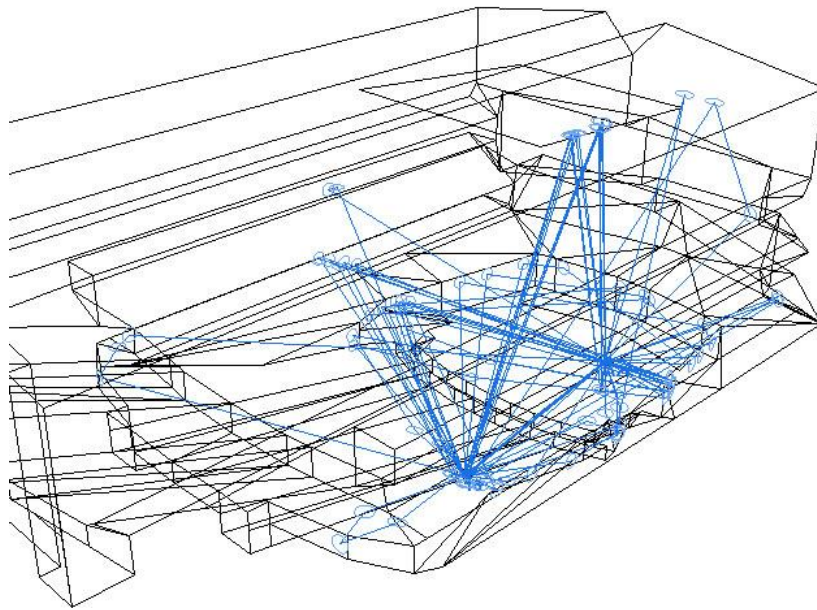


Figura 6.23. Modelo intermedio. Reflexiones entre la fuente A2 y el punto de recepción 16 en los primeros 100 ms.

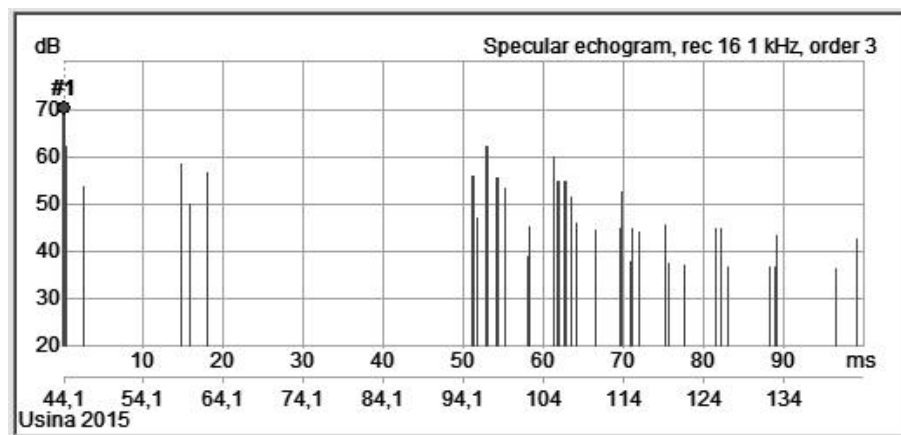


Figura 6.24. Modelo intermedio. Ecograma entre la fuente A2 y el punto de recepción 16 en los primeros 100 ms

Si se grafican en el espacio de Haas las reflexiones que ocurren entre la fuente A2 y el punto de recepción 16 en los primeros 100 ms, se puede tener un panorama general del comportamiento del campo acústico temprano en este caso particular (Figura 6.25).

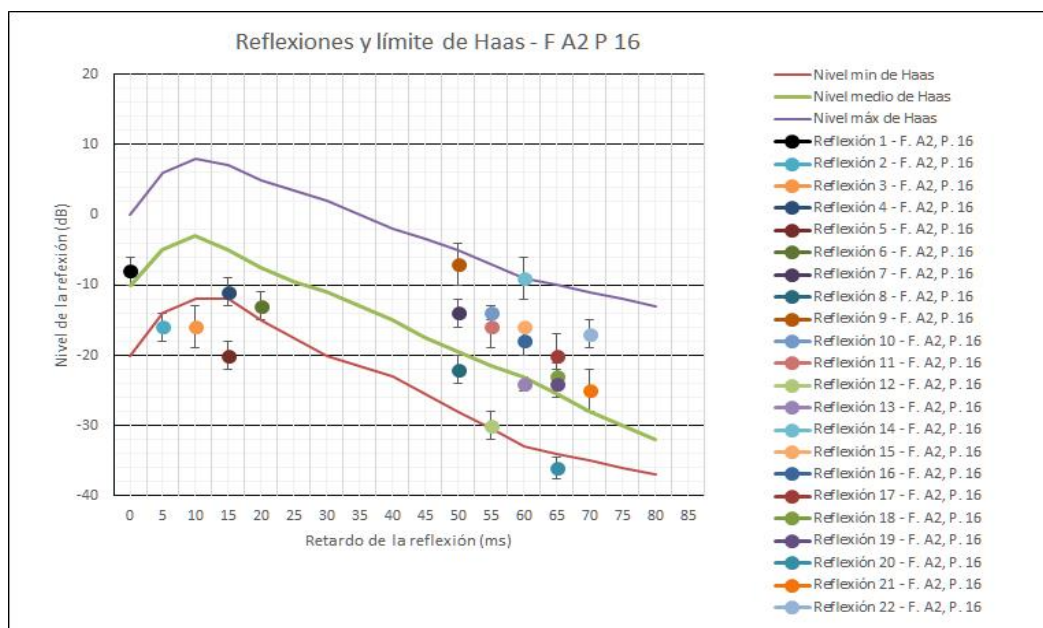


Figura 6.25. Modelo intermedio. Ubicación de las primeras 22 reflexiones en el espacio de Haas Fuente A2, punto 16.

En este caso la situación empeora: además de aparecer tres reflexiones en la zona de riesgo de coloración espectral, se puede ver una región temporal de 30 ms en la que no existe ninguna reflexión. El campo acústico cercano se divide en dos zonas: la primera va desde la llegada del sonido directo y los primeros 20 ms, y la segunda aparece después de transcurridos 50 ms. La distribución temporal de la energía era inadecuada y debía ser corregida.

#### ESTRATEGIA PARA RESOLVER LA COMPLEJIDAD DEL SISTEMA

Para evaluar la eficacia de un diseño habría que realizar el análisis anterior para todos los posibles pares fuente/receptor de la sala. En el caso de la Usina, con 1200 butacas y un escenario preparado para una orquesta de 90 músicos, la combinatoria total sería de 108.000 posibles pares. Si se consideran 22 reflexiones tempranas por par, en total habría que analizar las rutas de 2.376.000 reflexiones individuales. Como cada análisis debería ser similar a los dos que ya describimos, no es necesario ampliar sobre la imposibilidad de semejante programa de trabajo.

El análisis individual de cada reflexión, además de resultar inviable a causa de la cantidad involucrada, presenta otro problema de difícil o imposible solución: cambiar la geometría o la absorción de una superficie en función de una reflexión específica en un par fuente/receptor puede modificar las condiciones del campo temprano de otros pares



fuente/receptor. Cada modificación debería verificarse, por lo tanto, en el resto de los pares llevando a un proceso iterativo casi circular.

Para reducir la complejidad del problema y lograr un método de diseño eficaz, se concibió la siguiente estrategia:

- Se redujo la cantidad de puntos recepción tomando 1 cada 10 butacas: de 1.200 se pasó a 120 puntos a analizar.
- Se redujo la cantidad de fuentes acústicas. Se dividió el escenario y el área del coro en 12 sectores para reducir la cantidad de fuentes acústicas a considerar.
- Se aplicaron algoritmos de análisis basados en lógica borrosa -empleando el *Fuzzy Logic Toolbox* de MATLAB- para poder estimar los casos estadísticamente más favorables.
- El criterio de aceptación se basó tanto en el Índice de Calidad Acústica AQI de Beranek (1996), como en la evaluación de la textura y cantidad de reflexiones dentro del límite de Haas en el campo acústico cercano desarrollados para esta tesis.

Veamos a continuación una síntesis de los resultados que se obtuvieron durante el análisis realizado en una etapa intermedia del proceso de diseño de la Sala Sinfónica.

#### CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD ACÚSTICA AQI (BERANEK) EN EL MODELO INTERMEDIO

Mediante el procedimiento anterior se obtuvieron los parámetros medios correspondientes a la Norma ISO 3382-1997. Los valores del Factor de Espacialidad Temprano  $1-IACC_{E3}$ , del Retardo de la Primera Reflexión  $t_1$ , de la Intensidad Estandarizada  $G_{mid}$ , de la Reverberación Temprana EDT y de la Razón para Bajas Frecuencias BR se obtuvieron por simulación. El Índice de Difusión SD se estimó en 0,5 (Tabla 6.1).

Parámetro	$1-IACC_{E3}$	$t_1$ [ms]	$G_{mid}$ [dB]	EDT (TR)[s]	BR	SD
Valor medio del parámetro Simulado	0,65	17	6	1,5	0,97	(0,5)
AQI del modelo simulado	- 0,2	0	- 0,05	- 0,4	- 0,2	- 0,2

Tabla 6.1. Modelo intermedio. Valores empleados para calcular Índice de Calidad Acústica AQI.

El Índice de Calidad Acústica obtenido fue  $AQI = -1,05$ , que corresponde a la categoría C+ (“mediocre”) en la clasificación de Beranek. Este valor es similar al del *Barbican Concert Hall* de Londres, que en la actualidad está siendo profundamente remodelado por su acústica deficiente.

Del análisis estadístico mediante algoritmos de lógica difusa se obtuvo que la cantidad media de reflexiones tempranas significativas dentro de la franja límite de Haas fue sólo del 8 % del total. Y la cantidad media por fuera de la zona de seguridad del 2,7 %.

Además de obtener un puntaje bajo dentro de los sistemas de evaluación estándar (AQI), el modelo intermedio de la sala tampoco cumple con las condiciones en el campo temprano definidas en la hipótesis central de este trabajo.

Luego de numerosos cambios en la geometría y en las características acústicas de las superficies interiores -consensuadas con el equipo de diseño arquitectónico-, testeados en sesiones que duraron cada una cerca de un día de cálculo en computadoras de gran potencia, se llegó a una versión en la que se alcanzaron valores cercanos a los óptimos tanto en el sistema estándar de evaluación como en el definido por este trabajo.

#### **MODELO ACÚSTICO DEFINITIVO DE LA SALA DE CONCIERTOS**

El modelo N° 12 presentó valores cercanos a los óptimos en el sistema AQI de Beranek. Como en los casos anteriores, mediante la simulación en computadora (modelo de imágenes virtuales y trazado de rayos) se analizaron las características temporales y espectrales del campo reverberante en dos butacas características de la sala. Luego se repitieron los análisis en 120 butacas en diferentes ubicaciones de la platea y de las bandejas. Se utilizaron 12 fuentes omnidireccionales ubicadas en diferentes posiciones en el escenario y en la bandeja de coro.

Condiciones de la simulación:

- Software *Catt-Acoustic- V8* (2007/2011)
- Sala con ocupación completa (100 %)
- Audiencia sobre butacas de tapizado medio.
- Grandes superficies (escenario, cielorraso, paredes, etc.) con absorción y difusión acústica según cada material.
- Resto de las superficies con absorción residual (Beranek 1998).
- Difusión global media (Coef. Lambert = 20 % a 500 Hz).
- 100.000 rayos por octava
- Tiempo de corte de la simulación = 3.000 ms

El modelo final, obtenido luego de una gran cantidad de simulaciones en las que se testeaban pequeños cambios en la arquitectura del recinto, se puede ver en las Figuras 6.26 a 6.28.

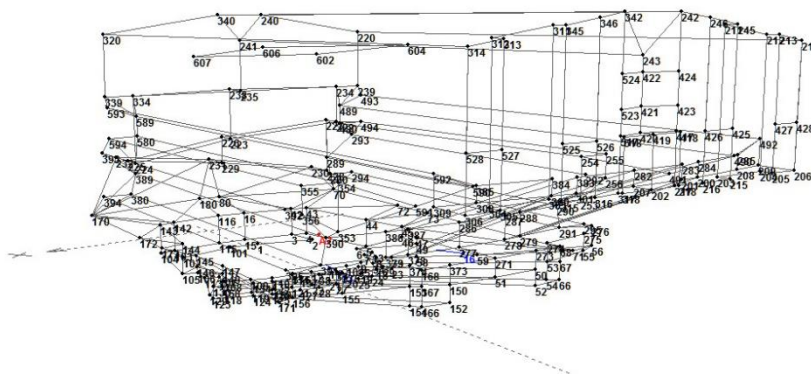


Figura 6.26. Modelo final. Piloto digital del diseño definitivo de la Sala de Conciertos.

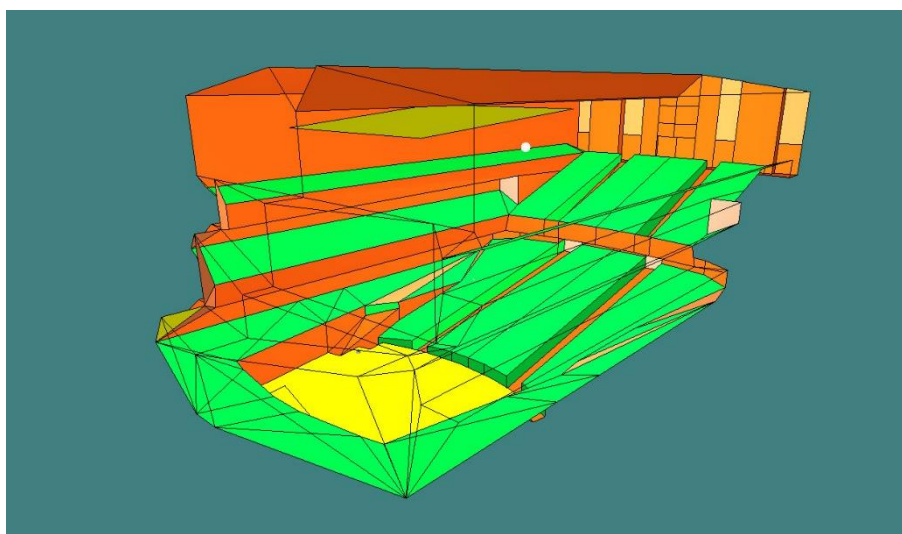


Figura 6.27. Modelo final. 3D del modelo digital de la Sala de Conciertos.

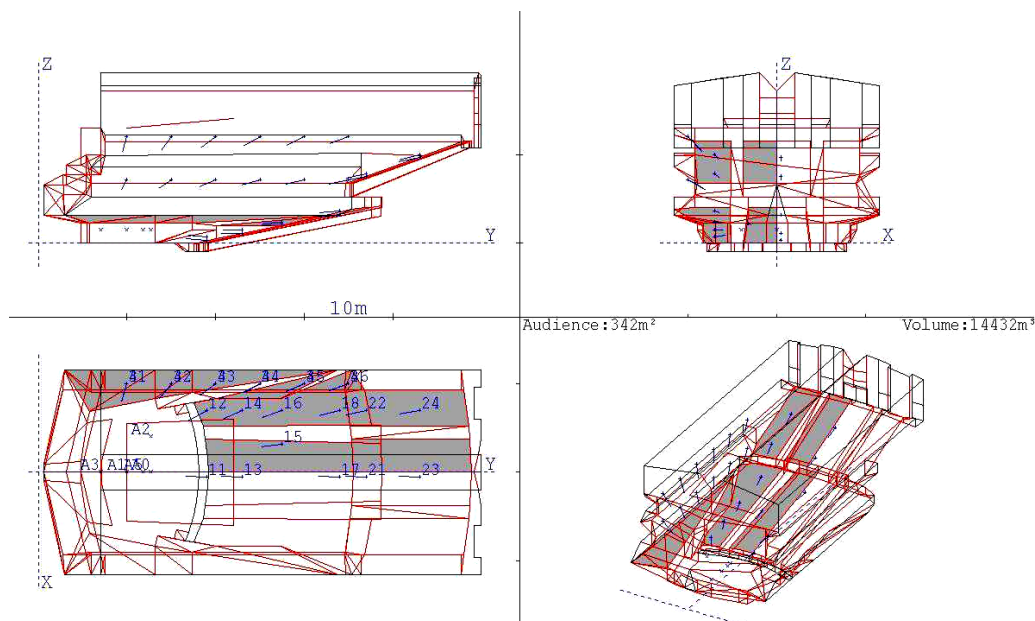


Figura 6.28. Modelo final. Vistas del diseño definitivo de la Sala de Conciertos.

### RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DEL MODELO ACÚSTICO DIGITAL

En las figuras que siguen se muestran los resultados en algunas posiciones a modo de ejemplo. La butaca 15 corresponde a la ubicación promedio 102 en el sistema de Beranek (1996).

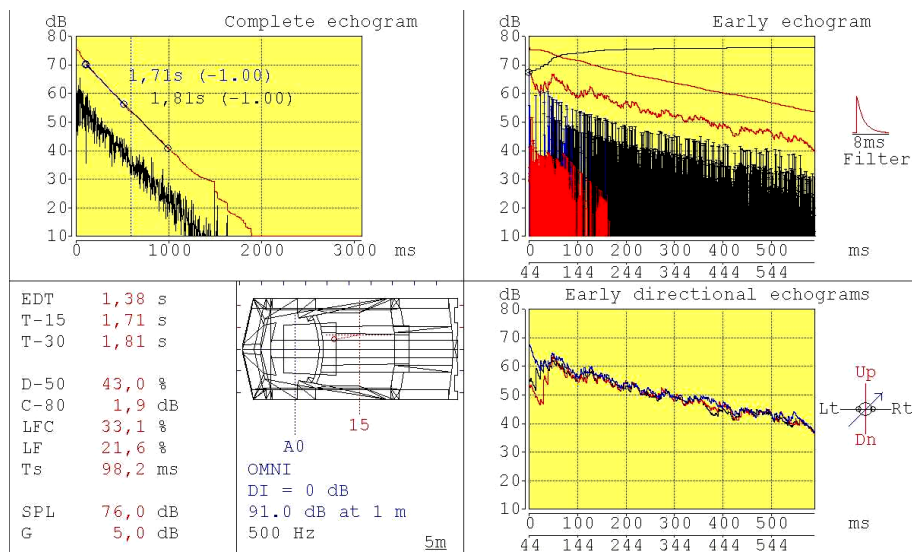


Figura 6.29. Modelo final. Ecogramas de la simulación acústica para el par A0/15 (butaca 102 en el sistema de Beranek).

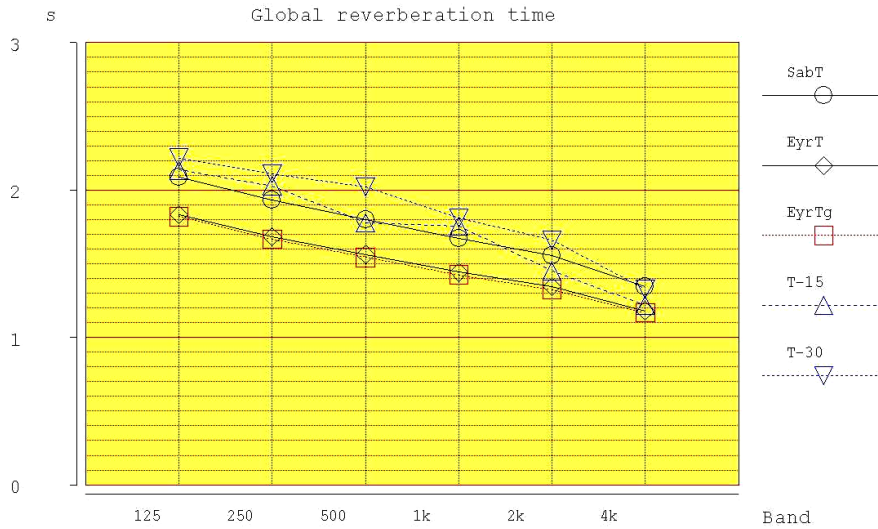


Figura 6.30. Modelo final. TR global de la de la Gran Sala de Conciertos (en negro: cálculo estadístico -Sabine y Eyring-; en color: simulación por trazado de rayos e imágenes virtuales).

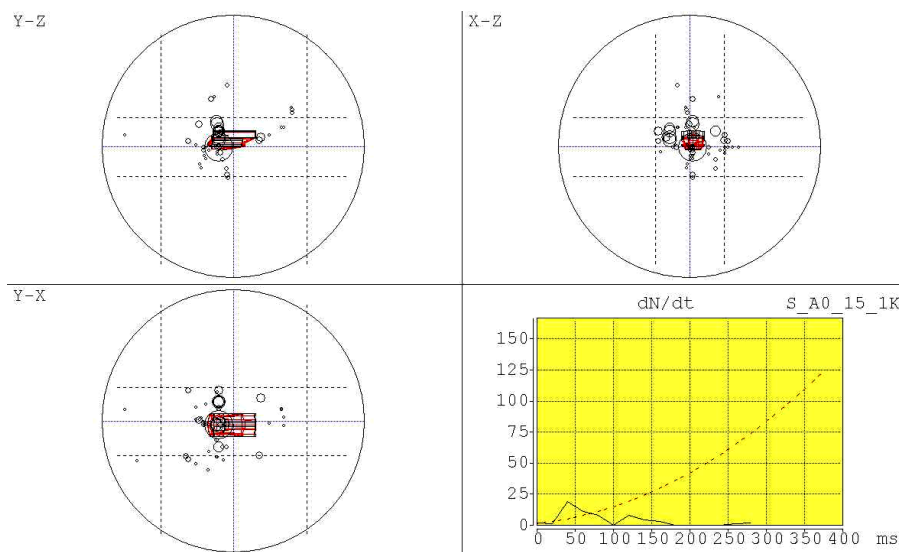


Figura 6.31. Modelo final. Imágenes virtuales en la butaca 15, par A0/15 (butaca 102 de Beranek).

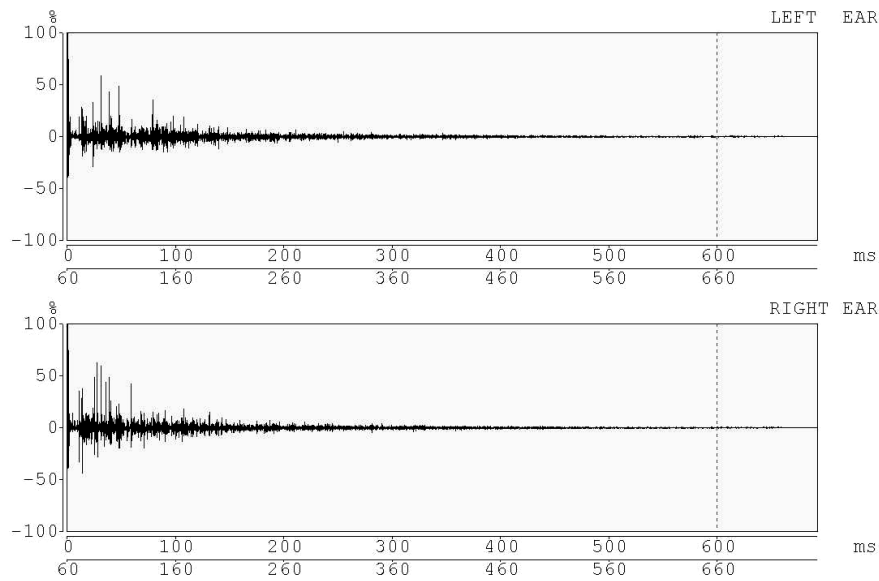


Figura 6.32. Modelo final. Respuesta al impulso en la butaca 15, par A0/15 (butaca 102 de Beranek).

De los resultados se desprende que el tiempo de reverberación es adecuado para la función de música sinfónica. La estructura de la reverberación es aproximadamente exponencial y la Reverberación Temprana (EDT) presenta valores satisfactorios. El valor definitivo de EDT es función de la altura y de la inclinación del gran reflector sobre el escenario.

El Retardo de la Primera Reflexión (ITDG) de 14 ms también es adecuado y la textura temporal óptima.

A continuación se analizó la distribución espacial de la energía acústica (Figuras 6.33 a 6.35).

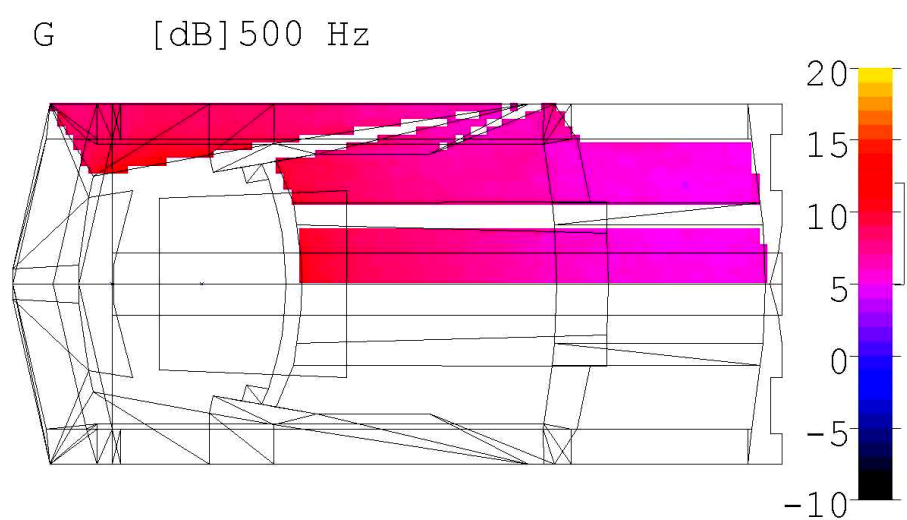


Figura 6.33. Modelo final. Distribución espacial de la intensidad acústica relativa (G) a 500 Hz. Fuente A0.

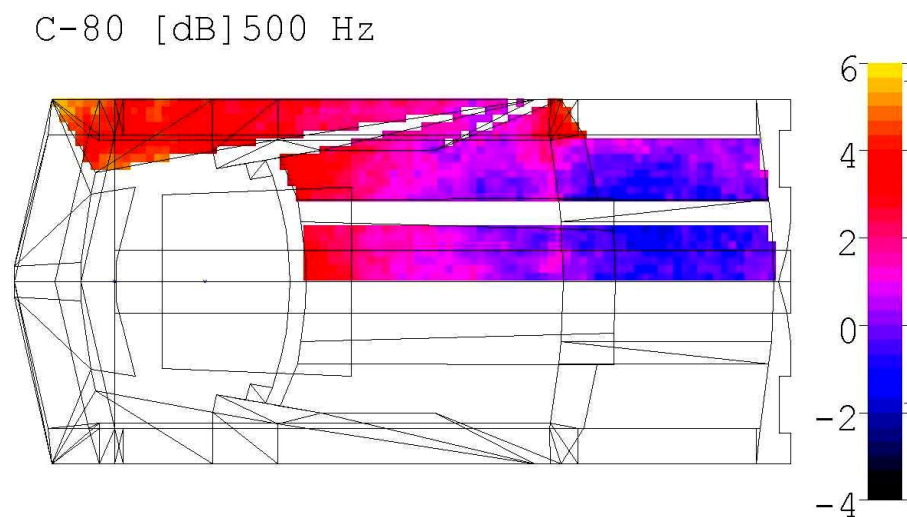


Figura 6.34. Modelo final. Distribución espacial de la Claridad ( $C_{80}$ ) a 500 Hz. Fuente A0.

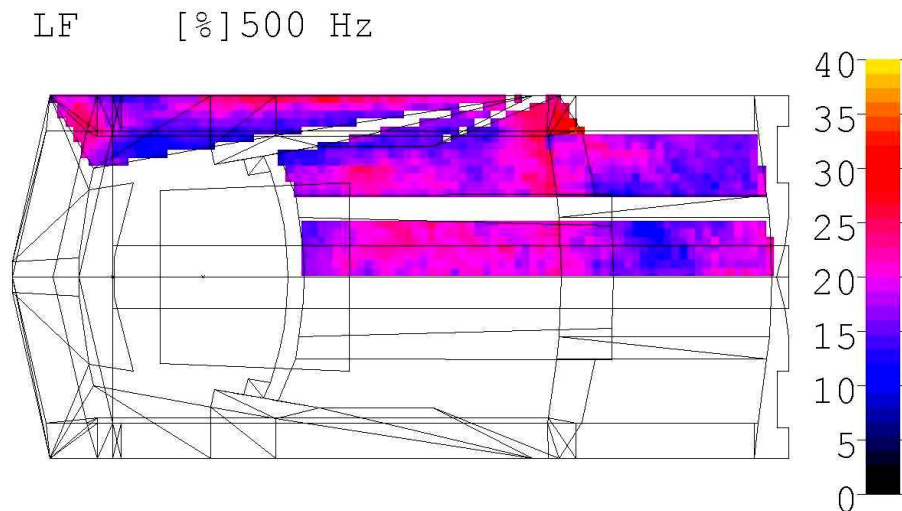


Figura 6.35. Modelo final. Distribución espacial de la energía lateral a 500 Hz. Fuente A0.

Se observa que la distribución espacial de la energía acústica es homogénea y que existe suficiente energía lateral en la platea, en el pullman y en las bandejas laterales.

**EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN EL MODELO FINAL**

**CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD ACÚSTICA AQI (ANDO-BERANEK) EN EL MODELO FINAL**

Del modelo digital se obtuvieron los parámetros medios correspondientes a la Norma ISO 3382-1997. Los valores del Factor de Espacialidad Temprano 1-IACCE<sub>3</sub>, del Retardo de la Primera Reflexión  $t_l$ , de la Intensidad Estandarizada  $G_{mid}$ , de la Reverberación Temprana EDT y de la Razón para Bajas Frecuencias BR se consiguieron por simulación. El Índice de Difusión SD se estimó en 1 pues se agregaron grandes superficies tratadas con dispositivos difusores de banda ancha. A partir de los parámetros acústicos globales se pudo calcular el índice de Beranek (AQI) (Tabla 6.2).

Parámetro	1-IACCE3	$t_l$ [ms]	$G_{mid}$ [dB]	EDT (TR) [s]	BR	SD
Valor medio del parámetro Simulado	0,7	15	3,6	2,00	1,2	1
AQI del modelo simulado	- 0,2	0	- 0,05	0	0	0

Tabla 6.2. Modelo final. Valores empleados para calcular Índice de Calidad Acústica AQI.



El AQI obtenido fue de  $-0,25$ , que corresponde a la categoría A+ (“superior”) en la clasificación de Beranek.

Del análisis estadístico mediante algoritmos de lógica difusa se obtuvo que la cantidad media de reflexiones tempranas significativas dentro de la franja límite de Haas fue del 67 % del total. Y la cantidad media por fuera de la zona de seguridad del 0,8 %.

El examen punto a punto de las reflexiones tempranas muestra una gran cantidad de energía ubicada dentro del límite de Haas. La mayoría de las reflexiones llegan con ángulos de incidencia que permiten incrementar la sonoridad percibida y la textura dentro de los primeros 100 ms presenta una densidad relativa constante.

Por ejemplo, en el análisis del par fuente A2/13 en los primeros 100 ms se puede ver la cantidad de reflexiones que ocupan la franja límite del espacio de Haas (Figura 6.36, comparar con el mismo par en el modelo intermedio en la Figura 6.19).

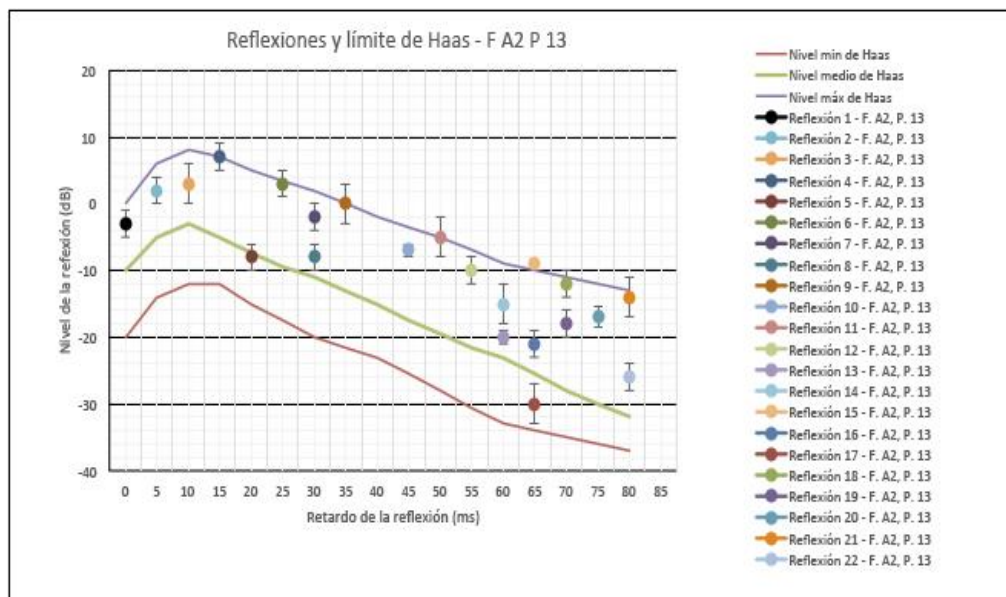


Figura 6.36. Modelo final. Ubicación de las primeras 22 reflexiones en el espacio de Haas. Fuente A2, punto 13.

Una situación similar ocurre con el resto de los pares que se analizaron. En la Figura 6.37 se muestra el par A2/16 (comparar con el mismo par en el modelo intermedio, Figura 6.25).

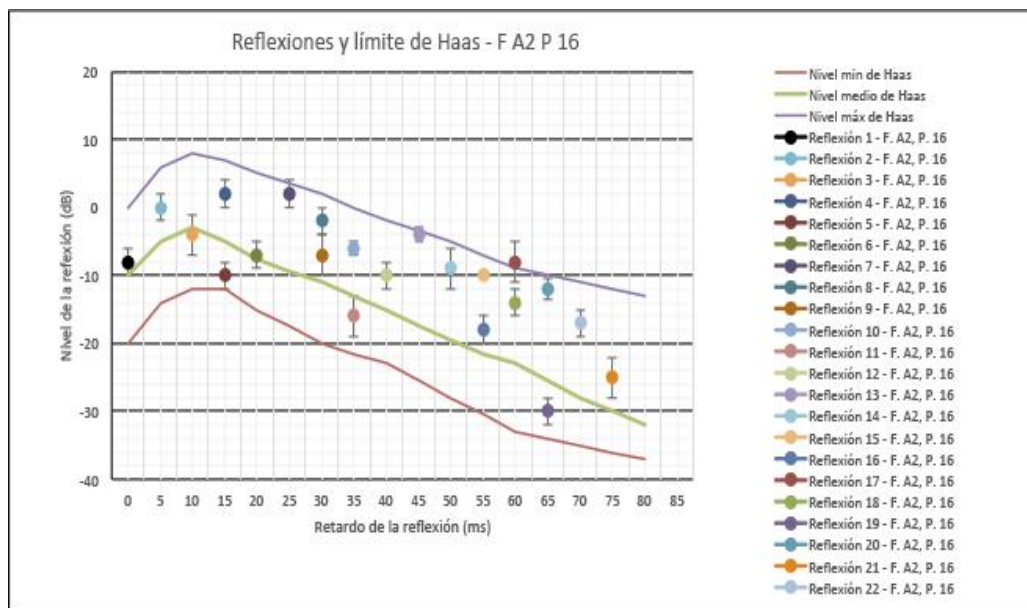


Figura 6.37. Modelo final. Ubicación de las primeras 22 reflexiones en el espacio de Haas. Fuente A2, punto 16.

Lograr una distribución de reflexiones para la totalidad de pares fuente/receptor, que contemple que la mayoría se ubique en el límite superior del espacio de Haas con ángulos de incidencia capaces de incrementar la sonoridad percibida -principal componente de la hipótesis central de este trabajo-, fue posible a partir del empleo del método de ajuste iterado basado en algoritmos de lógica borrosa mencionados más arriba, del uso de elementos de acústica variable como el gran reflector acústico sobre el escenario y del empleo generalizado de difusores acústicos de banda ancha distribuidos estratégicamente en las superficies interiores de la sala. Y, por supuesto, del permanente intercambio de ideas con el equipo de diseño de arquitectura bajo la dirección del Arq. Arrese.

Finalizada la etapa de diseño, comenzó la construcción y el ajuste acústico de la obra.

#### 4. CONTROL ACÚSTICO DURANTE LA OBRA

El procedimiento clásico de control acústico en obra, ampliamente documentado en la bibliografía especializada, consiste en realizar ensayos de laboratorio de todos los elementos y materiales a instalar en las salas. Este procedimiento es costoso e insume una gran cantidad de tiempo pues recién cuando cada muestra es aprobada es posible encargar su fabricación a los proveedores escogidos. Una alternativa, que se empleó en este caso, consiste en ensayar solamente aquellos materiales que, por ocupar una gran superficie en el interior de la sala, son significativos en el balance acústico total.

Este método, aunque implica realizar un ajuste final con el posible agregado de materiales o dispositivos de corrección acústica -una suerte de “afinación” del auditorio- resulta conveniente tanto desde el punto de vista de los costos como de los tiempos de obra. La elección del segundo método fue, en nuestro caso, impuesta por una exigencia fundamental del proyecto arquitectónico: se conservaron los ladrillos vistos, sin revoque, originales. La absorción acústica de los ladrillos era desconocida y no había posibilidad alguna de llevar una muestra al laboratorio. Ese dato, de enorme importancia dada la cantidad de superficie ocupada por las paredes de ladrillo, recién se revelaría a partir de las mediciones acústicas *in situ* programadas. El control de obra fue constante durante todo el proceso y se pudo acompañar la instalación de cada material o dispositivo con la evaluación acústica correspondiente. En los casos más complejos, como la colocación de las butacas o del reflector sobre el escenario, se analizaron las consecuencias futuras sobre la obra completa a partir de modelos estadísticos y de simulaciones en el modelo acústico digital.

Los resultados de las mediciones bajo Norma ISO 3382 con la sala completa desocupada, realizados por primera vez el 31 de octubre de 2011, dieron valores comprendidos dentro de los propuestos en la etapa de diseño (con un Tiempo de Reverberación de alrededor de 2 segundos a frecuencias medias). Los valores de la medición, contrastados con los valores predichos por la simulación en el modelo digital, quedaron comprendidos dentro del margen de error del sistema empleado.

Si a lo anterior le agregamos la inexistencia de defectos, como ecos o coloraciones, se puede afirmar que se lograron los objetivos acústicos propuestos.



Figura 6.38. Mediciones de ajuste acústico final con la participación de integrantes de la cátedra de Acústica Musical de la FBA/UNLP.

La Sala Sinfónica de la Usina del Arte se inauguró el 23 de mayo de 2012 (ver el apartado 2, Historia, en este capítulo).

Restaba aún la evaluación más importante y definitiva: el juicio de músicos, críticos y público a partir de la audición en situación de concierto.

## 5. CONCIERTOS Y RECITALES

A partir de su inauguración se sucedieron una gran cantidad de conciertos y recitales que abarcaron una amplia variedad de géneros musicales. Hasta la fecha, los juicios de valor emitidos tanto por los artistas como por la crítica y el público sobre su acústica fueron muy positivos. En cuanto al objetivo de conseguir una sala de gran capacidad volumen cúbico en la que pudieran oírse con facilidad las menores inflexiones instrumentales en el registro *pp*, se puede comentar aquí que se han realizado conciertos de laúd solo (Hopkinson Smith el 15 de septiembre de 2013), de guitarra sola y de una gran cantidad de conjuntos de música antigua en los que se oyeron con claridad los solos de flauta dulce. Instrumentos que, por su escasa potencia, se aconseja no programar en salas de más de 400 butacas.<sup>23</sup>

---

<sup>23</sup> Las críticas de esos y de otros recitales se pueden leer en notas publicadas en casi todos los diarios y revistas culturales de la Ciudad de Buenos Aires. Por lo general, en ellas se hace mención a la acústica de la Sala Sinfónica.

De los numerosos conciertos de música sinfónica realizados hasta la fecha, se destacan los ciclos de la *Orquesta Filarmónica* de Buenos Aires y la presentación de la Orquesta del *Maggio Musicale Fiorentino* dirigida por Zubin Mehta.<sup>24</sup>



Figura 6.39. Concierto de la Orquesta Filarmónica de Buenos Aires.<sup>25</sup>



Figura 6.40. Orquesta del *Maggio Musicale Fiorentino* dirigida por Zubin Mehta.<sup>26</sup>

<sup>24</sup> El Mtro. Mehta elogió la acústica de la sala en una entrevista por televisión (<http://vimeo.com/48407840>).

<sup>25</sup> Tomada de: [https://habitudesdelteatrocolon.files.wordpress.com/2013/07/70af-filarmonica\\_usina01-796983.jpg](https://habitudesdelteatrocolon.files.wordpress.com/2013/07/70af-filarmonica_usina01-796983.jpg)

<sup>26</sup> Tomada de: [http://hostnews.com.ar/articulo/index.php?mact=News,cntnt01,default,1&cntnt01number=90&cntnt01detailpage=39&cntnt01category\\_id=1&cntnt01returnid=39&cntnt01pagenumber=30&cntnt01returnid=39&page=39](http://hostnews.com.ar/articulo/index.php?mact=News,cntnt01,default,1&cntnt01number=90&cntnt01detailpage=39&cntnt01category_id=1&cntnt01returnid=39&cntnt01pagenumber=30&cntnt01returnid=39&page=39)



Figura 6.41. Recital del Cuarteto Petrus (integrantes de la Orquesta Filarmónica de Buenos Aires).

Fueron numerosos los recitales de música popular de diferentes géneros -folklore, tango, jazz, rock, etc.-. Dadas las características de la sala, la Dirección Artística creó el ciclo “Los Acústicos de la Usina”, en el que invitan a los músicos a no usar equipos de amplificación, o al menos a usar sólo los imprescindibles -una guitarra eléctrica o un teclado los necesitan, y la voz requiere muchas veces del micrófono por razones de estilo-. Pese a lo inusual de la propuesta, que contradice los hábitos instalados, fue muy bien recibida y se realizaron una gran cantidad de recitales sin amplificación que, a juzgar por los comentarios recibidos, resultaron ampliamente satisfactorios.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> <http://agendacultural.buenosaires.gob.ar/evento/los-acusticos-de-la-usina/7803>



Figura 6.42. Recital de tango sin amplificación (Orquesta Emilio Balcarce).<sup>28</sup>



Figura 6.43. Recital de bandoneón y contrabajo (Dúo Marconi/ Navarro).<sup>29</sup>

<sup>28</sup> Tomada de: <http://fotos.agendacultural.buenosaires.gob.ar/concierto-de-la-orquesta-escuela-de-tango-emilio-balcarce/imagegallery/25a1-orquesta-escuela04.jpg>

<sup>29</sup> Tomada de: <http://fotos.agendacultural.buenosaires.gob.ar/concierto-de-la-orquesta-escuela-de-tango-emilio-balcarce/imagegallery/25a1-orquesta-escuela05.jpg>



Figura 6.44. Buenos Aires Jazz 2013.<sup>30</sup>

Un capítulo aparte merecen las instalaciones de música experimental contemporánea en la que se usó el espacio en distribuciones no estándar. Por ejemplo, se representó la obra *Studi per l'intonazione del mare* de Salvatore Sciarrino con dirección de Santiago Santero. En esa ocasión parte de la formación instrumental, de cerca de cincuenta saxofones y cincuenta flautas, se ubicó en las pasarelas laterales del espacio (Figura 6.45).<sup>31</sup>

---

<sup>30</sup> Tomada de:

<http://festivalesanteriores.buenosaires.gob.ar/jazz/home13/gallery/11FlavioBoltroEricLegniniQuartetUsinaDelArte%20Jazz2013.jpg>

<sup>31</sup> <http://ciclocontemporanea.com.ar/post/63834276976/salvatore-sciarrino-studi-per-l-intonazione-del>





Figura 6.45. Puesta de Studi per l'intonazione del mare de Salvatore Sciarrino.

## 6. CONCLUSIONES

El caso de la Sala Sinfónica de la Usina del Arte constituyó una oportunidad de excepción para testear las hipótesis y la metodología planteadas en esta tesis.

Se cumplieron la casi totalidad de los objetivos específicos enunciados:

- Se desarrolló una metodología de diseño acústico que permitió alcanzar un campo acústico audible aún con las fuentes instrumentales no amplificadas más débiles.
- Se desarrolló un sistema de cálculo de la distribución espacial de la energía acústica adecuado en cada una de las ubicaciones posibles de una sala.
- Se implementó un modelo que permitió adaptar los parámetros acústicos temporales y espectrales a diferentes géneros y grupos instrumentales.
- Se pudo validar experimentalmente cada uno de los desarrollos citados.

A partir del modelo físico matemático desarrollado se diseñaron pruebas experimentales cuyos resultados, a su vez, fueron contrastados con las predicciones obtenidas en los modelos digitales elaborados *ad-hoc*. Pudieron verificarse cada una de las hipótesis formuladas en la introducción de esta tesis tanto en el modelo digital como en la sala terminada. Los juicios perceptuales en situación de concierto fueron coincidentes con los resultados de las mediciones físicas.

**REFERENCIAS**

- Basso, Gustavo (2009). “La percepción espacial del ambiente acústico”. Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética. Bernal: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
- Basso, Gustavo y Sánchez Quintana, Rafael (2014). "Una arquitectura para la música". La Usina del Arte. Puesta en valor y reciclaje. Buenos Aires: Ed. Ministerio de Desarrollo Urbano, GCBA.
- Beranek, Leo e Hidaka, Takashuki (1998). “Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall’s interior surfaces”. J. Acoust. Soc. Am., 104 (6), pp.3169–3177.
- Beranek, Leo (1996). Concert Halls and opera houses: How they sound. New York: Acoustical Society of America.
- Norma ISO 3382 (1997). Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustic parameters.

## A MODO DE CONCLUSIÓN

Las conclusiones particulares de esta tesis se encuentran *in extenso* al final de cada uno de los capítulos de los estudios de caso. Para no repetirlas, en este cierre vamos a comentar brevemente las conclusiones generales y a esbozar una prospectiva sobre la aplicación del método desarrollado.

La tesis propone una teoría acústica que permite analizar y diseñar una sala para música a partir de una particular configuración del campo acústico temprano. Sus objetivos e hipótesis fueron expuestos en detalle en el Capítulo I. La hipótesis central conjeturó sobre la posibilidad de diseñar el campo acústico temprano de un espacio para música con el fin de adecuarlo a la audición naturalizada de señales con gran compresión dinámica. A partir de esta hipótesis, se creó un modelo teórico cuyo objetivo general fue desarrollar un método de diseño de salas que, operando sobre el campo acústico temprano, permita construir espacios de calidad para representaciones de música y de otras artes performáticas, en especial aquellas que no emplean sistemas de refuerzo electroacústico. El método operó sobre las reflexiones laterales tempranas, ubicándolas dentro del “límite de Haas”, con ángulos de arribo específicos y en campos acústicos no exponenciales a varias pendientes.

Como se ha podido ver en los capítulos de la Parte II, las hipótesis planteadas fueron ampliamente verificadas en los estudios de caso escogidos. Sin embargo, conviene en este punto hacer una aclaración: la verificación de los factores contrastables físicamente, a partir de los resultados de mediciones de campo o de simulaciones en modelos virtuales, fue completa y se pudo realizar en la totalidad de las salas analizadas; en cambio, la verificación de las hipótesis relacionadas con los juicios de valor estéticos de los oyentes estuvo limitada a la posibilidad de realizar encuestas de opinión válidas. En la mayoría de los casos la población estadística a la que tuvimos acceso quedó restringida a unos 100 sujetos. Sólo en un caso, el del auditorio *Ballena Azul* del CCK, se pudo contar con una base de datos concreta de más de 2000 sujetos. Esta limitación es común a nivel mundial por las dificultades económicas, operativas y políticas (especialmente políticas) que implica realizar encuestas de gran alcance. Dicho lo anterior, las hipótesis relacionadas con los juicios de valor estéticos y con la calidad acústica de cada espacio se pudieron verificar con un nivel de confianza estadístico significativo.

A la fecha, el método fue aplicado con resultados satisfactorios en el análisis o el diseño acústico de las siguientes salas:

- Teatro Argentino de La Plata (estudio de caso 1).
- Sala Sinfónica de la Usina del Arte, CABA (estudio de caso 2).
- Teatro Colón, CABA.
- Sala de Cámara de la Usina del Arte, CABA.
- Auditorio “Ballena Azul” del Centro Cultural Kirchner, CABA.
- Auditorio de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Nacional de La Plata.
- Teatro del Bicentenario, San Juan.
- Teatro del Centro del Conocimiento, Posadas, Misiones.
- Algunos espacios y salas de la Argentina y América Latina (Chile, Colombia, Paraguay, Brasil y Uruguay).
- Numerosos (alrededor de 40) teatros, auditorios y centros culturales.

¿Este método pretende reemplazar a los otros, a los tradicionales y a los que se proponen cada tanto desde el campo experimental o académico? No, porque la concepción y el diseño acústico para música presuponen una propuesta estética, que depende de las preferencias individuales de cada autor y del contexto musical y cultural de cada comunidad. Factores que, además de depender del nicho cultural de referencia, cambian con el tiempo, con un ritmo de cambio que se acelera en la actualidad a causa del empleo generalizado de las nuevas tecnologías aplicadas a la música.

El método se ha mostrado eficaz para este tiempo y lugar, y quizá en un futuro cercano pueda aplicarse a otros escenarios similares -la globalización de la producción y la circulación de música vuelven probable esta posibilidad-. Sólo el paso del tiempo dará respuesta a la pregunta por la subsistencia de este planteo en particular, o de los modelos de intervención basados en la percepción del campo acústico temprano en general, más allá del horizonte de dos o tres generaciones.

La Plata, mayo de 2017.

---

**BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

- Ando, Yoichi (1998). *Architectural Acoustics. Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. New York: Springer Verlag.
- Ando, Y. *et al.* (1997). "Acoustic Design of a Concert Hall Applying the Theory of Subjective Preference, and the Acoustic Measurement after Construction" *Acustica & Acta Acustica*, 83, pp. 635-643.
- Ando, Yoichi & Noson, Dennis (1997). *Music and Concert Hall Acoustics*. London: Academic Press Limited.
- Ando, Yoichi (1998). *Architectural acoustics*. USA: Ed. Springer.
- Ando, Yoichi (1985). *Concert Hall Acoustics*. Berlin, Springer Verlag.
- Ando, Yoichi (1983). "Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall". *Journal of the Acoustical Society of America*, 74, pp. 873-887.
- Ando, Y. y Airutz, H. (1982). "Perception of coloration in sound fields in relation to the autocorrelation function". *Journal of the Acoustical Society of America*, 71, pp. 616-629.
- Ando, Y. *et al.* (1982). "Calculations of the sound transmission over theater seats and methods for its improvement in the low-frequency range". *Journal of the Acoustical Society of America*, 72, pp. 443-448.
- Ando, Y. y Gottlob, D. (1979). "Effects of early multiple reflections on subjective preference judgments of music sound fields". *Journal of the Acoustical Society of America*, 65, pp. 524-527.
- Ando, Y. y Imamura, M. (1979). "Subjective preference tests for sound fields in concert halls simulated by the aid of a computer". *Journal of Sound and Vibration*, 65, pp. 229-239.
- Angus, James (2000). "Using grating modulation to achieve wideband large area diffusers". *Applied Acoustics*, 60, pp. 144-165.
- Arau, Higini (2002). *Barcelona Symphony Hall: L'Auditori*. Proceedings of the Institute of Acoustics.
- Arau, Higini (1999). *ABC de la acústica arquitectónica*. Barcelona: CEAC.
- Attneave, F. Y Olson, R. (1971). "Pitch as a Medium: A New Approach to Psychophysical Scaling". *American Journal of Psychology*, 84, pp. 147-166.
- Augé, Marc (2012). *Futuro*. Buenos Aires: Adriana Hidalgo Editora.
- Backus, John (1969). *The Acoustical Foundations of Music*. N.York: W.W. Norton & Company Inc.
- Barga, B. & Donnelly, P. (1998). *DirectX a fondo*. Madrid: MacGraw-Hill Interamericana de España.
- Barron M. (2001). "Listener envelopment in concert halls and sound from behind". *Actas del 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*. Roma.
- Barron, Michael (2000). "The current state of acoustic design of concert halls and opera houses". *Actas del II Congreso Iberoamericano de Acústica*. Madrid, España.
- Barron, M. (1995). "Bass sound in concert auditoria". *Journal of the Acoustical Society of America*, 97 (2), pp. 1088-1098.

- 
- Barron, M. (1995). "Balcony overhangs in concert auditoria". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (5), pp. 2580-2590.
  - Barron, Michael (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. London: E & FN Spon.
  - Barron, M. y Lee, J. (1988). "Energy relations in concert auditoriums". *Journal of the Acoustical Society of America*, 84 (2), pp. 618-628.
  - Basile, Teresa y Basso, Gustavo (1994). "Globalización y heterogeneidad. Algunas cuestiones en torno al presente de la música". *Actas de las II Jornadas sobre Música en el Siglo XX*. La Plata.
  - Basso, Gustavo (2016). "Acoustical design of the new canopy for the Ginastera Hall of the Teatro Argentino of La Plata". *Proceedings of The International Symposium on Musical and Room Acoustics ISMRA 2016*. La Plata: AdAA.
  - Basso, Gustavo (2014a). "La música de la aldea global", en *Ciencia, Arte y Tecnología en Acción. Enfoques desde la comunicación, la innovación tecnológica, el diseño y la educación*. Lanús: Ed. UNLa.
  - Basso, Gustavo y Sánchez Quintana, Rafael (2014b). "Una arquitectura para la música", en el libro *La Usina del Arte. Puesta en valor y reciclaje*. Buenos Aires: Ed. Ministerio de Desarrollo Urbano, GCBA.
  - Basso, Gustavo (2014c). "La música en la época de la compresión dinámica". en *Actas de la Primera Semana del Sonido en Uruguay*. Montevideo.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2012a). "Salas para música: patrimonio acústico-musical de la ciudad de La Plata". *Actas de la 6ª Jornadas de Investigación en disciplinas artísticas y proyectuales (6ta JIDAP)*. La Plata: Editorial FBA, UNLP.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2012b). "Influencia de las condiciones de borde en la medición de absorción de butacas en cámara reverberante". *Actas del VIII Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2012*. Évora, Portugal.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2012c). "Relevamiento acústico de las principales salas para música de la Argentina". *Actas de la XXI Conferencia de la Asociación Argentina de Musicología y XVI Jornadas Argentinas del Instituto Nacional de Musicología 'Carlos Vega'*. Buenos Aires, Argentina.
  - Basso, Gustavo y Sánchez Quintana, Rafael (2012d). "La acústica". *Teatro Colón. Puesta en valor y actualización tecnológica*. Buenos Aires: Ed. FADU-GCBA.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2011a). "Detalles del comportamiento acústico actual del Teatro Municipal '28 de Febrero' de la ciudad de Mercedes". *Actas de la Reunión Regional de Acústica*, Montevideo, Uruguay.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2011b). "Parámetros acústicos en salas para música y prosa: el Teatro Municipal Tres de Febrero de la ciudad de Paraná". *Actas de la Conferencia Latinoamericana de la Audio Engineering Society*. Montevideo, Uruguay.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2011c). "Un recorrido acústico por la Facultad de Bellas Artes de la UNLP. Primera parte: el Salón Auditorio 'Roberto Rollié'". *Arte e Investigación, Revista Científica de la Facultad de Bellas Artes*. 13 (7). La Plata: Editorial de la FBA, UNLP.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2011d). "La acústica de salas de conciertos". *Ciencia Hoy* 20 (120).
  - Basso, Gustavo (2010a). "Acústica". *El gran libro del Teatro Colón*. Buenos Aires: Ed. Clarín.

- 
- Basso, Gustavo (2010b). "Teaching Acoustics to Musicians". Actas del 2nd Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics. Cancún, México.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2010c). "Preservation of the Acoustical Quality of the Teatro Colón of Buenos Aires". Actas del 2nd Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics. Cancún, México.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2010d). "El Teatro Español de Magdalena a través de su Acústica". Actas del 2do Congreso Internacional de Acústica UNTREF, Tres de Febrero [en línea]. Consultado el 2o de mayo de 2016 en <http://untref.edu.ar/acustica.htm>.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2010e). "Estudio Acústico del Teatro de Cámara de City Bell". Actas del II Congreso Iberoamericano de Investigación artística y proyectual. La Plata.
  - Basso, Gustavo (2010f). "La acústica del Teatro Colón de Buenos Aires y su preservación". Invited Paper, Proceedings of the 10th AES Brazil Conference, São Paulo, Brasil.
  - Basso, Gustavo y Di Liscia, Pablo (2009a). "Audición espacial del sonido: conceptos básicos y estado de la cuestión". Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética. Colección Música y Ciencia. Quilmes: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
  - Basso, Gustavo (2009b). "La percepción espacial del ambiente acústico". Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética. Colección Música y Ciencia. Quilmes: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
  - Basso, Gustavo (2009c). Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética. Compilador. Colección Música y Ciencia. Quilmes: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2009d). "Preservación de la calidad acústica del Teatro Colón de Buenos Aires". Revista de Acústica, 40 (3 y 4), Madrid, España.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2009e). "Estudio acústico del Teatro Municipal Coliseo Podestá de la ciudad de La Plata". Actas de las Primeras Jornadas Regionales de Acústica ADAA 2009. Rosario: Asociación de Acústicos Argentinos (AdAA).
  - Basso, Gustavo *et al.* (2008a). "Proyecto de remodelación del *Cine Teatro Colón* - Sala Cultural (Casa de España/ATE). Ciudad de Santa Fe. Dispositivos de control del ruido por emisión e inmisión y configuración del campo acústico interior". Actas del VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008. Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2008b). "Estudio acústico del Auditorio "Roberto Rollié" de la Facultad de Bellas Artes de la UNLP". Actas del VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008. Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2008c). "Preservación de la calidad acústica del Teatro Colón de Buenos Aires durante los recientes trabajos de restauración". Actas del VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008. Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2008d). "Evaluación de la calidad acústica del Teatro Colón de Buenos Aires". Actas del VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008. Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2007). "Mismo espacio, diferentes percepciones". Actas de las Sextas Jornadas de Acústica Electroacústica y Áreas Vinculadas (CADA), Buenos Aires. [en línea]. Consultado el 28 de octubre de 2016 en [www.cadae.org.ar](http://www.cadae.org.ar).

- 
- Basso, Gustavo (2006a). Percepción Auditiva. Colección Música y Ciencia. Segunda edición año 2009. Quilmes: Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
  - Basso, Gustavo (2006b). “Acústica de grandes salas para música”. Revista Episteme, revista de ciencias (1). La Plata: UNLP.
  - Basso, Gustavo et al. (2006c). “Los espacios de la música”. Revista El Pasajero (48). pp. 6-7. La Plata, Pcia. de Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo et al. (2006d). “Características acústicas de edificios destinados a la enseñanza musical”. Actas de las Sextas Jornadas de Acústica Electroacústica y Áreas Vinculadas (CADAЕ), Buenos Aires. [en línea]. Consultado el 28 de octubre de 2016 en [www.cadae.org.ar](http://www.cadae.org.ar).
  - Basso, Gustavo *et al.* (2006e). “Estudio del comportamiento acústico del Salón Auditorio “Roberto Rollié” de la Facultad de Bellas Artes de la U. N. L. P. Detalles de su funcionamiento en el marco de la relación docente / alumno”. Actas de las II Jornadas de investigación en disciplinas artísticas y proyectuales (JIDAP), La Plata: Editorial de la FBA, UNLP.
  - Basso, Gustavo (2005a). “Espacios acústicos confinados en el límite de Haas”. Actas de las Cuartas Jornadas de Acústica Electroacústica y Áreas Vinculadas (CADAЕ), Buenos Aires. [en línea]. Consultado el 28 de octubre de 2016 en [www.cadae.org.ar](http://www.cadae.org.ar).
  - Basso, Gustavo *et al.* (2005b). “Diagnóstico del comportamiento acústico actual del Salón Auditorio Dr. Raúl Scalabrini Ortíz del Pasaje Dardo Rocha de la Municipalidad de La Plata”. Actas del Primer Congreso Iberoamericano de Investigación Artística y Proyectual (CIDIAP). La Plata: Editorial de la FBA, UNLP.
  - Basso, Gustavo et al. (2005c). "National and provincial evolution of noise legislation in Argentina". Papers of the Congress and Exposition on Noise Control Engineering InterNoise 2005. Río de Janeiro.
  - Basso, Gustavo (2005d). “Orden generativo, fractales y música”. Revista del Instituto Superior de Música UNL, (10). Santa Fe: Editorial de la UNL.
  - Basso, Gustavo (2005e). “Escenas de la vida musical. Diálogo entre tecnología y música”. Escritos sobre Audiovisión. Lanús: Editorial de la Universidad Nacional de Lanús.
  - Basso, Gustavo (2004a). “Modelización acústica de la Plaza de Mayo para la instalación sonora Mayo, los sonidos de la Plaza”. Actas de las I jornadas de Investigación en Disciplinas Artísticas y Proyectuales. La Plata.
  - Basso, Gustavo (2004b). “Variables de diseño en campos acústicos no exponenciales”. Actas de las Terceras Jornadas de Acústica Electroacústica y Áreas Vinculadas (CADAЕ), Buenos Aires. [en línea]. Consultado el 28 de octubre de 2016 en [www.cadae.org.ar](http://www.cadae.org.ar).
  - Basso, Gustavo (2003a). “Empleo de la autocorrelación de la fuente acústica en el diseño de salas para música no amplificada”. Actas del II Encuentro de Audio de AES Argentina. [en línea]. Consultado el 20 de octubre de 2016 en <http://argentina.aes.org>.
  - Basso, Gustavo (2003b). “Diseño del campo acústico del escenario en salas para música no amplificada”. Actas del Segundo Congreso Argentino de Acústica del Nuevo Milenio y Segundas Jornadas de Acústica Electroacústica y Áreas Vinculadas (CADAЕ), Buenos Aires. [en línea]. Consultado el 28 de octubre de 2016 en [www.cadae.org.ar](http://www.cadae.org.ar).



- 
- Basso, Gustavo (2003c). "Diseño de grandes salas para música: configuración del espacio de escenario". Actas de la Tercera Reunión Anual de la Sociedad Argentina para las Ciencias Cognitivas de la Música, SACCoM. Buenos Aires: SACCoM.
  - Basso, Gustavo (2002a). "Las salas como extensión acústica de los instrumentos musicales". Actas del Encuentro Nacional 2002 de Investigación en Artes y Diseño (ENIAD 2002).
  - Basso, Gustavo *et al.* (2002b). "Prevention, monitoring, and correction law for urban acoustical contamination in the province of Buenos Aires". Contributed Paper. Journal of the Acoustical Society of America, (112), p. 2411.
  - Basso, Gustavo (2002c). "Fractales y estructuras musicales autosemejantes". Actas de XV Conferencia Anual de la Asociación Argentina de Musicología.
  - Basso, Gustavo (2002d). "La geometría fractal en la música". Actas de la Segunda Reunión Anual de la Sociedad Argentina para las Ciencias Cognitivas de la Música. Buenos Aires: SACCoM.
  - Basso, Gustavo (2001). "Fractales, ruido 1/f y música". Actas del Encuentro Nacional 2001 de Investigación en Artes y Diseño, ENIAD 2001.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2000a). "Condiciones necesarias para el uso musical eficaz del desplazamiento acústico temporal". Actas del II Congreso Iberoamericano de Acústica. Madrid, España.
  - Basso, Gustavo (2000b). Percepción Auditiva. Nuevos enfoques. Quilmes: Universidad Nacional de Quilmes.
  - Basso, Gustavo *et al.* (2000c). "Condiciones necesarias para el uso musical eficaz del desplazamiento acústico temporal". Actas del II Congreso Iberoamericano de Acústica. Madrid, España.
  - Basso, Gustavo (1999a). Análisis Espectral. La Transformada de Fourier en la Música. Segunda edición año 2001. La Plata: Editorial de la UNLP.
  - Basso, Gustavo (1999b). "El principio de indeterminación en acústica musical". Actas de la XIII Conferencia Anual de la Asociación Argentina de Musicología. Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo *et al.* (1998). "El desplazamiento acústico temporal. Ajuste de la experiencia y uso musical". Actas de las III Jornadas de Estudios e Investigaciones del Instituto de Teoría e Historia del Arte Julio E. Payró. Europa y Latinoamérica: Artes visuales y música. Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo *et al.* (1998b). "Límites de aplicación del desplazamiento acústico temporal". Actas de la XII Jornadas Argentinas de Musicología del INM y Conferencia Anual de la Asociación Argentina de Musicología. Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo (1998c). "Modelos Estáticos y Dinámicos en Acústica Musical". Actas de la 2ª Conferencia Iberoamericana de Investigación Musical. Lanús, Provincia de Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo (1997a). "La cultura del ruido". Libro de Conferencias del Encuentro Nacional de Ecología Acústica. Buenos Aires: ENEA Ed.
  - Basso, Gustavo (1997b). "Relación acústica entre instrumentos, técnicas de ejecución y salas para música". Actas de la XI Conferencia Anual de la Asociación Argentina de Musicología. Córdoba.
  - Basso, Gustavo (1996a). Elementos de Acústica de Salas. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral.

- 
- Basso, Gustavo (1995a). "Naturaleza y caracterización de los fenómenos acústicos". *Boletín de Investigación Educativo-Musical* (5).
  - Basso, Gustavo (1995b). "Acústica de salas". Cantata. Buenos Aires,
  - Basso, Gustavo (1994a). "Difusión en escenarios de salas con bajo tiempo de reverberación". *Memorias de las VII Jornadas Argentinas de Acústica*. Buenos Aires.
  - Basso, Gustavo (1994b). "Globalización y heterogeneidad. Algunas cuestiones en torno al presente de la música". *Actas de las II Jornadas sobre Música en el Siglo XX*. La Plata.
  - Basso, Gustavo (1994e). "Escenarios para salas con bajo tiempo de reverberación y escasa difusión: Mejora en el Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural". *Actas del Primer Congreso Brasil/Argentina de Acústica y 15 Encuentro de la SOBRAC*. Brasil.
  - Batteau, D. W. (1976). The role of the pinna in human localization. *Proc. R. Soc. London, Ser. B* 168, pp. 158-180.
  - Bech, Sören (1995). "Timbral aspects of reproduced sound in small rooms". *Journal of the Acoustical Society of America*, 97 (3), pp. 1717-1726.
  - Bech, Sören (1996). "Timbral aspects of reproduced sound in small rooms II". *Journal of the Acoustical Society of America*, 99 (6), pp. 3539-3549.
  - Beranek, Leo (2014). "Concert hall design: new findings". *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 36 (3), pp. 1-21.
  - Beranek, L (2011). "The sound strength parameter G and its importance in evaluating and planning the acoustics of halls for music". *J Acoust Soc Am*, 129(5), pp. 3020–3026.
  - Beranek, Leo. (2004). *Concert Halls and Opera Houses*. USA: Ed. Springer.
  - Beranek, Leo (2003). "Subjective Rank-orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls". *Acta Acustica*, 89, pp. 494-508.
  - Beranek, L., Hidaka, T. *et al.* (2000). "Acoustical design of the opera house of the New National Theatre, Tokyo, Japan". *Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 355-367.
  - Beranek, Leo (1996). *Concert and Opera Halls: How they Sound*. New York: Acoustical Society of America.
  - Beranek, Leo (1992). "Concert hall acoustics". *Journal of the Acoustical Society of America*, 92, pp. 1-39.
  - Beranek, Leo (1990). "Excerpts from Concert Hall Acoustics". *Applied Acoustics*, 31, pp. 3-6.
  - Beranek, Leo (1988). *Acoustical Measurements*. Woodbury, NY: Acoustical Society of America.
  - Beranek, Leo (1962). *Music, Acoustics, and Architecture*. New York: Wiley.
  - Beranek, Leo (1954). *Acoustics*. New York: McGraw Hill Book Company, inc.. Trad. esp. *Acústica* (1961). Bs.As.: Editorial Hispano Americana S.A.
  - Berman, Marshall (2008). *Todo lo sólido se desvanece en el aire*. Madrid: Siglo XXI.
  - Beyer, Robert (1999). *Sounds of our times: two hundred years of acoustics*. New York: Springer Verlag.

- 
- Berkhout, A. *et al.* (1980). "A new method to acquire impulse responses in concert halls". *Journal of the Acoustical Society of America*, (68), pp. 179-183.
  - Blauert, Jens (1997). *Spatial Hearing*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
  - Bloothoof, Gerrit *et al.* (1992). "Acoustics and perception of overtone singing". *Journal of the Acoustical Society of America*, (92), pp. 1827-1836.
  - Blundell Jones, Peter (2000). *Hans Scharoun*. London: Phaidon.
  - Bolt, Richard (1975). "Architectural Acoustics-a Review of this Century". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Boone, Marinus (1994). "Room Acoustic Parameters in a Physical Scale Model of the New Music Centre in Eindhoven: Measurements Method and Results". *Applied Acoustics*, (42), pp. 13-28.
  - Braat, P. E. *et al.*, (1993). "A New Concert Hall for the City of Eindhoven. Design and Model Tests". *Applied Acoustics*, (40), pp. 295-309.
  - Bradley, J. S. (1983). "Experience with new auditorium acoustic measurements". *Journal of the Acoustical Society of America*, (73), pp. 2051-2058.
  - Bradley, J. S. (1994). "Comparison of concert hall measurements of spatial impression". *Journal of the Acoustical Society of America*, (96), pp. 3525-3535.
  - Bradley, John y Gilbert, Soulodre (1995). "The influence of late arriving energy on spatial impression". *Journal of the Acoustical Society of America*, 97 (4), pp. 2263-2271.
  - Bradley, John y Gilbert, Soulodre (1995). "Subjective evaluation of new room acoustic measures". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (1), pp. 294-301.
  - Bradley, John y Gilbert, Soulodre (1995). "Objective measures of listener envelopment". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (5), pp. 2590-2598.
  - Bradley, John (1996). "The sound absorption of occupied auditorium seating". *Journal of the Acoustical Society of America*, 99 (2), pp. 990-996.
  - Bradley, J. S. (1996). "Some effects of orchestra shells". *Journal of the Acoustical Society of America*, 100 (2), pp. 889-898.
  - Bregman, Albert (1994). *Auditory Scene Analysis*. Cambridge: MIT Press.
  - Brown, Sandy (1975). "The future of the amphitheatre". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Burd, A. (1975). "Acoustic modelling-Design tool or research project?". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Butler, David (1992). *The Musician's Guide to Perception and Cognition*. New York: Schirmer Books.
  - Campbell R.H. (2001). "Using Room Acoustic Model Tools to Determine Surface Diffusion Effectiveness". *Actas del 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*. Roma.
  - Capitel, Antón (1999). "Mies contra Scharoun. Una representación dramática en el Kulturforum de Berlín". *Revista Pasajes, Arquitectura y crítica*, (5).
  - Choi Y. J. and Fricke F. R. (2001). "Investigation of the Factors Most Important for Determining the Acoustic Quality of Concert Halls". *Actas del 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*. Roma.

- 
- Chowning, J.(1973) "The Synthesis of Complex Audio Spectra by means of frequency modulation", (pp.526-534), *JAES* N.7, USA.
  - Clifton R., y Freyman R. (1994). "The Precedence Effect: beyond echo suppression". Binaural and spatial hearing in real and virtual environments. Editado por: Robert H. Gilkey y Timothy R. Anderson, pp. 233-255. New Jersey: Laurence Erlbaum associates (1997).
  - Cochi, A. *et al.* (1990). "Reliability of Scale Model Researches: a Concert Hall Case". *Applied Acoustics*, (30), pp. 1-13.
  - Cook, Perry (1999). *Music, Cognition, and Computerized Sound*. Cambridge: MIT Press.
  - Cox, J. Trevor y D'Antonio, Peter (2000). "Acoustic phase gratings for reduced specular reflection". *Applied Acoustics*, (60), pp. 167-186.
  - Cox, J. Trevor y Shield, Bridget (1999). "Audience questionnaire survey of the acoustics of the Royal Festival Hall, London, England". *Acustica-Acta Acustica*, (85), pp. 547-559.
  - Cox, J. Trevor (1994). "Predicting the scattering from reflectors and diffusers using two-dimensional boundary element methods". *Journal of the Acoustical Society of America*, (96), pp. 874-888.
  - Cox, j. Trevor y Lam, Y. W. (1994). "Prediction and evaluation of the scattering from quadratic residue diffusers". *Journal of the Acoustical Society of America*, (95), pp. 297-305.
  - Cox, j. Trevor y Lam, Y. W. (1994). "The Performance of Realisable Quadratic Residue Diffusers (QRDs)". *Applied Acoustics*, (41), pp. 2373-246.
  - Cremer, Lothar (1975). "Diferent distributions of the audience". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - D'Antonio, Peter y Cox, J. Trevor (2000). "Diffusor application in rooms". *Applied Acoustics*, (60), pp. 113-142.
  - D'Antonio, Peter y Cox, J. Trevor (1998). "Two decades of Sound Diffusor Design and Development. Part 1: Application and Design". *J. Audio Eng.*, 46 (11), pp. 955-976.
  - Davies, W. J. *et al.* (1994). "Measuring auditorium seat absorption". *Journal of the Acoustical Society of America*, (96), pp. 879-888.
  - Day, B. (1975). "Acoustic scale modelling materials". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Demirkale, D. y Budak, A. (1995). "Acoustical Performance of the Grand Hall of the Atatürk Cultural Center". *Applied Acoustics*, (45), pp. 297-319.
  - Deutsch, Diana (1995). *Musical Illusions and Paradoxes*. La Jolla: Philomel R. Inc.
  - Deutsch, Diana (1992). "Paradojas de la tonalidad musical". *Inv. y Ciencia*, (193), pp. 60-65.
  - Deutsch, Diana (1999). *The Psychology of Music*. San Diego: Academic Press.
  - Dietsch, L., Kraak, W. (1986). "Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen". *Acustica*, 60 (205).
  - Di Liscia, O. P. (2005). Tesis doctoral "Los modos de vínculo de la concepción espacial del sonido con la poiesis de la música electroacústica". Biblioteca de la UNQ.

- 
- Di Liscia, O. P. (2001). Spatial listening and its computer simulation in electronic music [en línea]. Consultado el 10 de octubre de 2016 en <http://depts.washington.edu/smccweb/courses/401-3/402examples/spatial.html>
  - Di Liscia, O. P. (2000). El espacio de la Imaginación. Revista del Instituto Superior de Música de la Universidad Nacional del Litoral, (5).
  - Divenyi, P. L. (1960). Binaural suppression of nonechoes. J. Acoust. Soc. Am., (91), pp. 1078-1084.
  - Dressler, R. (1988). "Dolby Surround Pro Logic Decoder Principles Of Operation" [en línea]. Consultado el 10 de diciembre de 2016 en <http://www.dolby.com/tech/whtppr.html>
  - Duanqi, Xiang *et al.* (1992). "Acoustic Design of Beijing Theater". Applied Acoustics, (37), pp. 15-30.
  - Duanqi, Xiang *et al.* (1991). "Acoustic Design of the Gymnasium and Natatorium of Chinese National Olympic Sports Center". Applied Acoustics, (34), pp. 267-279.
  - Edwards, Nicholas (1999). "Why do traditional Opera Houses works so well for opera?". United Kindom: Internet site.
  - Ehresman, David (1978). Perception of timbral analogies. Rapports IRCAM, (13/78).
  - Everest, Alton (1997). Sound studio construction on a budget. New York: McGraw-Hill.
  - Everest, Alton (1988). Small budget recording studio. New York: TAB Books.
  - Everest, Alton (1994). The Master Handbook of Acoustics. New York: TAB Books.
  - Farina, Angelo (2001). "Acoustic quality of theatres: correlations between experimental measures and subjective evaluations". Applied Acoustics, (62), pp. 889-916.
  - Fischetti, A. y Jouhaneau, J. (1992). "The Influence of First Reflection Distribution on the Quality of Concert Halls". Applied Acoustics, (35), pp. 233-245.
  - Fischetti, A. *et al.* (1992). "Relations between Subjective Spatialisation, Geometrical Parameters and Acoustical Criteria in Concert Halls". Applied Acoustics, (37), pp. 233-247.
  - Fitzroy, Dariel (1973). "The sound of St. Mary's". Journal of the Acoustical Society of America, (54), pp. 349-352.
  - Frampton, Kenneth (1993). Historia crítica de la arquitectura moderna. Barcelona: Gustavo Gili.
  - Franssen, N, V. (1960). Some considerations on the mechanism of directional hearing. Thesis. The Netherlands: Technische Hogelschool, Delft.
  - Fricke F. (2001). "The Application of Neural Network Analysis to Auditorium Acoustics". Actas del 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics. Roma.
  - Fricke, Fergus (2000). "Visual assessments of the surface diffusion properties of concert halls". Applied Acoustics, (60), pp. 253-261.
  - Fricke, Fergus y Han, Yuong (1999). "A neural network analysis of concert hall acoustics" Acustica-Acta Acustica, 113 (85), pp. 113-120.
  - Fuchs, G. L. (1957). Acústica. Córdoba: Imprenta Univ. Nac. de Córdoba.

- 
- Fujiwara, K. *et al.* (1992). "Absorption Characteristics of a Practically Constructed Schroeder Diffuser of Quadratic-Residue Type". *Applied Acoustics*, (35), pp. 149-152.
  - Fujiwara, K. *et al.* (2000). "Visualization of the sound field around a Schroeder diffuser". *Applied Acoustics*, (60), pp. 225-235.
  - Furse, Richard (1999). Vspace [en línea]. Consultado el 15 de diciembre de 2016 en <http://www.muse.demon.co.uk/vspace/vspace.html>
  - Gade, Anders (1990). "The Influence of Architectural Design on the Acoustics of Concert Halls". *Applied Acoustics*, (31), pp. 207-214.
  - Gade, Anders (1989). "Musician's room acoustic conditions in concert halls. I: Methods and laboratory experiments". *Acustica*, (69), pp. 193-203.
  - Gade, Anders (1989). "Investigations of musician's room acoustic conditions in concert halls. II: Field experiments and synthesis of results". *Acustica*, (69), pp. 249-262.
  - Gardner, M. (1968). "Historical Background of the Hass and/or Precedence Effect". *Journal of the Acoustical Society of America*, (43), pp. 1243-1248.
  - Geary, J. M. (1980). "Consonance and dissonance of pairs of inharmonic sounds". *Journal of the Acoustical Society of America*, (67), pp. 1785-1789.16.
  - Gerlach, R. (1975). "The reverberation process as markoff chain-Theory and initial model experiments". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Grantham, D. (1995). "Spatial hearing and related phenomena". *Hearing*. Editado por B. Moore. New York: Academic.
  - Grey, John (1975). *An Exploration of Musical Timbre*. Stanford University: CCRMA.
  - Griesinger, D. (2013). "What is clarity and how can it be measured". ICA 2013 Congress, Montreal.
  - Guillemin, Victor y Pollack, Alan (2010). *Differential Topology*. American Mathematical Society. Providence-Rhode Island.
  - Haan, C. H. Y Fricke, F. R. (1997). "An evaluation of the importance of surface diffusivity in concert halls". *Applied Acoustics*, (51), pp. 53-69.
  - Haapaniemi, A. and Lokki, T. (2014). "Identifying concert halls from source presence vs room presence". *Jour. Acous. Soc. Am.*, 135, pp. 311-317
  - Haas (1960). Über den einfluss eines einfahechos auf die hörsamkeit von sprache. *Acustica*, (1) , pp. 49-58. Traducción al inglés (1972). The influence of a single echo on the audibility of speech. *J. Audio Eng. Soc.*, (20), pp. 146-159.
  - Hall, Donald (1991). *Musical Acoustics*. California: Brooks/Cole Publishing Company.
  - Hann, Chan y Fricke, Fergus (1992). "Statistical Investigation of Geometrical Parameters for Acoustic Design of Auditoria". *Applied Acoustics*, (35), pp. 105-127.
  - Harmann, W. (1994). "Listening in a room and the precedence effect". *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. Editado por: Robert H. Gilkey y Timothy R. Anderson, pp. 191-210. New Jersey: Laurence Erlbaum associates, publishers. Traducción al español resumida inédita de O. P. Di Liscia.
  - Harris, C. M. -Editor- (1979). *Handbook of Noise Control*. New York: McGraw-Hill Book Company.

- 
- Helmholtz, Herman von (1885). *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Trad. Inglesa (1954): A. J. Ellis. *On the Sensation of Tone*. N.York: Dover Publications, Inc.
  - Hidaka, T. (2014). "A comparison of acoustical quality in concert halls as relate to hall shapes". 168th Meeting of the Acoustical Society of America. Indianapolis, Indiana.
  - Hidaka, Takayuki, Beranek, Leo L., and Nishihara, Noriko (2008). "A comparison between shoebox and non-shoebox halls based on objective measurements in actual halls". *J. Acoust. Soc. Am.*, 123.
  - Hidaka Takayuki, Nishihara Noriko y Beranek, Leo (2001). "Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied state". *Journal of the Acoustical Society of America*, 109 (3), pp. 1028-1042.
  - Hidaka, T y Beranek, L. (2000). "Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas". *Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 368-383.
  - Hidaka, T, Beranek, L. *et al.* (2000). "Acoustical design of the Tokyo Opera City (TOC) concert hall, Japan". *Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), pp. 340-354.
  - Hidaka, T. *et al.* (1995). "Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low and high frequency sounds levels as measures of acoustical quality in concert halls". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (2), pp. 988-1007.
  - Hidaka, T, Beranek, L. y Okano, T. (1995). "Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low and high frequency sounds levels as measures of acoustical quality in concert halls". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (2), pp. 988-1007.
  - Hirsch, I. C. (1959). "Auditory Perception of Temporal Order". *Journal of the Acoustical Society of America*, (31), pp. 685-692.
  - Houtsma, A., Rossing, T. y Wagenaars, W. (1987). *Auditory Demonstrations*. CD & Book, A.S.A.
  - Howarth, M. y Lam, Y. (2000). "An assessment of the accuracy of a hybrid room acoustics model with surface diffusion facility". *Applied Acoustics*, (60), pp. 237-251.
  - Hulbert, G. M. *et al.* (1982). "Criterion for quantitative rating and optimun design of concert halls". *Journal of the Acoustical Society of America*, (71), pp. 619-629.
  - Ishizawa, Michitaka *et al.* (1998). "A Manufacturer's Review of the Progress of Large Scale Electro-Acoustic Systems in Auditoria". *Acustica & Acta Acustica*, (84), pp. 311-319.
  - Izenour, George C. (1977). *Theater Design*. New York: Mc Graw-Hill.
  - Jaffe, Christopher (1997). "Selective reflection and acoustical coupling in concert hall design". *Music and Concert Hall Acoustics*. London: Ando & Noson eds., Academic Press Limited.
  - Jimenez Dianderas, C.(1992). "Acoustical Evaluation of the Municipal Theatre of Lima, Perú". *Applied Acoustics*, (35), pp. 153-166.
  - Johansson, Torbjön y Kleiner, Mendel (2000). "Prediction of the scattering properties of surfaces by laser scanning of height profile". *Applied Acoustics*, (60), pp. 205-223.
  - Johnson, Russell *et al.* "Variable coupled volume for music performance". *Music and Concert Hall Acoustics*. London: Ando & Noson eds., Academic Press Limited.

- 
- Jordan, V. L. (1970). "Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques". *J. Acoust. Soc. Am.*, (47), p. 408.
  - Jordan, Vilhelm (1975). "Model studies with particular reference to the Sydney Opera House-the evaluation of the objective tests of "Acoustics" of models and halls". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Josephs, Jess (1969). *The Physics of Musical Sound*. N.York: Van Nostrand Company Inc. Trad. esp. *La Física del Sonido Musical*. Mexico: Editorial Reverte Mexicana, S.A.
  - Jurkiewicz, Y., Wulfrank, T., and Kahle, E.(2013). "How far should the geometry of a concert hall be optimized?", *International Symposium on Room Acoustics*, Toronto, Canada.
  - Jurkiewicz, Y., Wulfrank, T., and Kahle, E.(2012). "Architectural shape and early acoustic efficiency in concert halls (Letter)", *J. Acous. Soc. Am.*, 132, pp. 1253-1256.
  - Kahle, E. (2013). "Room acoustical quality of concert halls". *Building Acoustics*, 20, 265-282.
  - Kate, Warner (1995). "On the bandwidth of diffusors based on the quadratic residue sequence". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (5), pp. 2575-2579.
  - Kawakami F. y Shimizu Y. (1990). "Active Field Control in Auditoria". *Applied Acoustics*, (31), pp. 47-75.
  - Kendall, G. S. (1995). *A 3-D Sound Primer: Directional Hearing and Sound Reproduction*. *Computer Music Journal*, 19 (4). USA: MIT Press.
  - Kleiner, M. *et al.*, (1993). "A Comparison between Results from a Physical Scale Model and a Computer Image Source Model for Architectural Acoustics". *Applied Acoustics*, (38), pp. 245-265.
  - Knudsen, V. y Harris, C. (1950). *Acoustical Designing in Architecture*. New York: Wiley.
  - Knudsen, V. (1963). "Architectural Acoustics". *Sci. Am.*
  - Kotschy, A. *et al.* (1974). "Subjective judgment of artificial reverberation processes". *Journal of the Acoustical Society of America*, (56), pp. 1192-1194.
  - Krumshansl, Carol (1990). *Cognitive Foundations of Musical Pitch*. New York: Oxford Univ. Press.
  - Krumshansl, Carol y Shepard, Roger (1979). "Quantification of the Hierarchy of Tonal Functions Within a Diatonic Context". *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, (5), pp. 579-594.
  - Kulowski, Andrzej (1991). "Remarks on a limit Value of the Sound Directional Diffusion Coefficient in rooms". *Applied Acoustics*, (32), pp. 93-105.
  - Kurozumi, K. y Ohgushi, K. (1983). "The relationship between the cross-correlation coefficient of two channel acoustic signals and sound image quality". *Journal of the Acoustical Society of America*, (74), pp. 1726-1733.
  - Kuttruff, H. (1995). "A simple iteration scheme for the computation of decay constants in enclosures with diffusely reflecting boundaries". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (1), pp. 288-293.
  - Kuttruff, H. (1994). "Sound Absorption by Pseudostochastic Diffusers (Schoroeder Diffusers)". *Applied Acoustics*, (42), pp. 215-231.
  - Kuttruff, H. (1991). *Room Acoustics*. Londres: Elsevier Applied Science.



- 
- Kuttruff, Heinrich (1975). "The acoustics design of multi-purpose halls". Auditorium Acoustics. London: Applied Science Publishers.
  - Kuusinen A, Pätynen J, Tervo S, Lokki T (2014). "Relationships between preference ratings, sensory profiles, and acoustical measurements in concert halls". J Acoust Soc Am, 135(1), pp. 239–250.
  - Lam, Y. W. (1996). "A comparison of three diffuse reflection modeling methods used in room acoustics computer models". Journal of the Acoustical Society of America, 100 (4), pp. 2181-2192.
  - Lam, Y. W. (1996). "The dependence of diffusion parameters in a room acoustics prediction model of auditorium sizes and shapes". Journal of the Acoustical Society of America, 100 (4), pp. 2193-2203.
  - Lamoral, Roger (1975). Acoustique et Architecture. Paris: Masson.
  - Lannie, M. (1993). "Acoustics of Gonzago Theatre in the Palace and Park Museum of Archangelskoje". Applied Acoustics, (40), pp. 347-353.
  - Lehnert, H. y Blauert, J. (1992). "Principles of Binaural Room Simulation". Applied Acoustics, (36), pp. 259-291.
  - Lochner J. P. A. y Burger J. F. (1964). "The Influence of Reflections on Auditorium Acoustics". J. Sound Vib., 1 (4).
  - Lokki Tapio (2014). "Tasting music like wine: Sensory evaluation of concert halls". Physics Today 67(1), 27-31.
  - Lokki T, Pätynen J, Tervo S, Siltanen S, Savioja L (2011) Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. J Acoust Soc Am, 129.
  - Lokki T, Pätynen J (2011). "Lateral reflections are favorable in concert halls due to binaural loudness". J Acoust Soc Am, 130(5), pp. 345–351.
  - Lokki T, Pätynen J, Kuusinen A, Tervo S (2012). "Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles". J Acoust Soc Am, 132(5), pp. 3148–3161.
  - Long, Marshall. (2006) Architectural Acoustics. USA: Ed. Elsevier.
  - Long, Marshall. (2009). What is so special about shoebox halls? envelopment, envelopment, envelopment. Acoustic today. pp. 21-25.
  - Majerník, V.y Kaluzný, J (1979). "On the auditory uncertainly relations". Acustica, (43), pp. 132-146.
  - Malham D. G., (1998). Spatial hearing mechanisms and sound reproduction. [en línea]. Consultado el 20 de octubre de 2016 en <http://www.york.ac.uk/inst/mustech/mtg.htm>. Traducción al español de O. P. Di Liscia autorizada por el autor [en línea]. Consultado el 20 de octubre de 2016 en: <http://www.unq.edu.ar/cme/personales/odiliscia>
  - Matthew, Robert (1975). "Acoustics in perspective". Auditorium Acoustics. London: Applied Science Publishers.
  - Mackenzie, Robin (1975). Auditorium Acoustics. London: Applied Science Publishers.
  - Maekawa Z., Kawai Y. and Hara Y. (2001). "A Design Principle for Stage Acoustics in Concert Halls". Actas del 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics. Roma.

- 
- Maekawa, Zyun-iti. Ed. (1994). *Environmental and Architectural Acoustics*. London: E & FN Spon.
  - Maekawa, Zyun-iti. (1994). "Acoustic Design of Rooms". *Environmental and Architectural Acoustics*. London: E & FN Spon.
  - Maekawa, Zyun-iti. (1990). "Some Auditoria Designed by Maekawa's Laboratory". *Applied Acoustics*, (31), pp. 223-229.
  - Maekawa, Zyun-iti (1975). "Problems of sound reflection in rooms". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Marshall, A. y Hyde, J. (1979). "Some preliminary acoustical considerations in the design for the proposed Wellington Town Hall". *Journal of Sound and Vibration*, (63), pp. 201-211.
  - Marshall, Harold (1990). "Recent Developments in Acoustical Design Process". *Applied Acoustics*, (31), pp. 7-28.
  - Marshall, A. H. (1993). "An Objective Measure of Balance between Choir and Orchestra". *Applied Acoustics*, (38), pp. 51-58.
  - Marshall, L. Gerald (1994). "An acoustics measurement program for evaluating auditoriums on the early/late sound energy ratio". *Journal of the Acoustical Society of America*, (96), pp. 2251-2261.
  - Martin, J. *et al.* (1993). "Binaural simulation of concert halls: A new approach for the binaural reverberation process". *Journal of the Acoustical Society of America*, (94), pp. 3255-3264.
  - Mc Adams, Steve (1995). *Localisation Auditive*. París: IRCAM.
  - Mc Adams, Stephen et Bigand, Emmanuel (1994). *Penser les sons. Psychologie cognitive de l'audition*. Paris: PUF.
  - Mc Angus Tood, Neil (1995). "The kinematics of musical expression". *Journal of the Acoustical Society of America*, (97), pp. 1940-1949.
  - Mc Carthy, Bob. (2009). *Diseño de sonido: diseño y optimización*. España: Ed Alvalena.
  - Meinial, X. *et al.* (1993). "Comparison between full-scale and 1:50 scale model measurements in Théâtre Municipal, Le Mans". *Acta Acustica*, (1), pp. 199-212.
  - Mellor, David (1996). *Home recording studio*. Kent: PC Publishers.
  - Mendez, Antonio (1977). "Aislación acústica". *Revista Telegráfica Electrónica*.
  - Metherel, A. (1969). "Acoustical Holography". *Sci. Am.*
  - Meyer, Jürgen (2009). *Acoustics and the Performance of Music*. New York: Springer.
  - Miskiewics, Andrzej y Rakowski, Andrzej (1995). "Loudness level versus sound-pressure level: A comparison of musical instruments". *Journal of the Acoustical Society of America*, 96 (6), pp. 3375-3379.
  - Miyazaki, H. *et al.*, (2003) "Active Field Control". AES 115th Convention. USA.
  - Mommertz, Eckard (2000). "Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces". *Applied Acoustics*, (60), pp. 201-203.
  - Monjeau, Federico (2003). "Un viaje al fondo de la acústica". *Clarín*.
  - Moore, Brian ed. (1995). *Handbook of Perception and Cognition: Hearing*. London: Academic Press.

- 
- Moore, Brian (1997). *Psychology of Hearing*. London: Academic Press.
  - Moore, F.R. (1990). *Elements of Computer Music*. New Jersey: Prentice Hall.
  - Moore, F.R. (1989). Spatialisation of sounds over loudspeakers. En: M. Matthews and J. Pierce: *Current Directions in Computer Music Research*. Cambridge: MIT Press.
  - Morgan, Dennis (1997). "A parametric error analysis of the backward integration method for reverberation time estimation". *Journal of the Acoustical Society of America*, 101 (5), pp. 2686-2693.
  - Morimoto, Masayuki *et al*, (1989). "Contribution of reverberation to auditory spaciousness in concert halls". *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* 10, pp. 87-92.
  - Morimoto, Masayuki *et al*, (1993). "Relation between Auditory Source Width in Various Sound Fields and Degree of Interaural Cross-Correlation". *Applied Acoustics*, (38), pp. 291-301.
  - Morimoto, Masayuki *et al*, (1994). "Relation between Auditory Source Width in Various Sound Fields and Degree of Interaural Cross-Correlation: Confirmation by Constant Method". *Applied Acoustics*, (42), pp. 233-238.
  - Morse, P. M. (1948). *Vibration and Sound*. New York: McGraw-Hill.
  - Nagata, Minoru (1989). "Design problems of concert halls". *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* 10, pp. 59-72.
  - Nagata, Minoru (1990). "What we have learned from the listening experiences in Concert Halls-Physical Properties and Subjective Impressions of Five Concert Halls in Tokyo". *Applied Acoustics*, (31), pp. 29-45.
  - Nagy A. y Kotschy A. (2001). "Concert Hall Design with Auralization, a Case Study". *Actas del 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*. Roma.
  - Nannariello, Joseph y Fricke, Fergus (2001). "The use of neural network analysis to predict the acoustic performance of large rooms Part I. Predictions of the parameter G utilizing numerical simulations". *Applied Acoustics*, (62), pp. 917-950.
  - Nannariello, Joseph y Fricke, Fergus (2001). "The use of neural network analysis to predict the acoustic performance of large rooms Part II. Predictions of the acoustical attributes of concert halls utilizing measured data". *Applied Acoustics*, (62), pp. 951-977.
  - Newman, Paul (1975). "The influence upon auditorium reverberation time caused by different positioning of absorption within the fly tower". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Nishihara, Noriko, Hidaka Takayuki y Beranek Leo (2001). "Mechanism of sound absorption by seated audience in halls". *Journal of the Acoustical Society of America*, 110 (5), pp. 2398-2411.
  - Okano, Toshiyuki (2000). "Image shift caused by strong lateral reflections, and its relation to inter-aural cross correlation". *Journal of the Acoustical Society of America*, 108 (5), pp. 2219-2230.
  - Okano, Toshiyuki (2002). "Judgments of noticeable differences in sound fields of Concert Halls caused by intensity variations in early reflections". *Journal of the Acoustical Society of America*, 111 (1), pp. 217-229.
  - Olson, Harry. (1957). *Acoustical Engineering*. USA: Ed. Van Nostrand Company.
  - Parkin, P. H. (1958). *Acoustics, Noise, and Buildings*. Londres: Faber and Faber.

- 
- Parkin, P. H. (1975). "Assisted resonance". Auditorium Acoustics. London: Applied Science Publishers.
  - Patterson, J. y Green, D. (1970). "Discrimination of Transient Signals Having Identical Energy Spectra". *Journal of the Acoustical Society of America*, (48), pp. 121-131.
  - Pätynen, J., Tervo, S., Robinson, P. W., and Lokki, T. (2014). "Concert halls with strong lateral reflections enhance musical dynamics". *Proc. Natl. Acad. Scs.*, 111, pp. 4409-4414
  - Pätynen, J., Tervo S., Lokki T. (2013). "Analysis of concert hall acoustics via visualizations of time-frequency and spatio temporal responses". *J Acoust Soc Am*, 133(2), pp. 842–857.
  - Pätynen J (2011). "A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics". PhD thesis. Aalto University School of Science, Aalto, Finland.
  - Pätynen J, Lokki T (2010) Directivities of symphony orchestra instruments. *Acta Acust United Ac*, 96, pp. 138–167.
  - Pelorson, X. *et al.* (1991). "Stabilité et variabilité des critères objectifs utilisés en acoustique des sales". *J. Acoustique*, (4), pp. 599-619.
  - Pelorson, Xavier *et al.* (1992). "On the Variability of Room Acoustical Parameters: Reproducibility and Statistical Validity". *Applied Acoustics*, (37), pp. 175-198.
  - Pérez Miñana, J. (1969). *Compendio Práctico de Acústica*. Barcelona: Labor.
  - Pickles, James (1988). *An Introduction to the Physiology of Hearing*. San Diego: Academic Press.
  - Pierce, J. R. (1991). "Periodicity and Pitch Perception". *Journal of the Acoustical Society of America*, (90), pp. 1889-1893.
  - Pinnington, R. J. *et al.* (1993). "Modelling Auditorium Acoustics with Ligth". *Applied Acoustics*, (40), pp. 21-46.
  - Plomp, Reiner (1976). *Aspects of Tone Sensation*. New York: Academic Press.
  - Rayleigh, John William, 1890 (Pub. 1945). *The theory of Sound*. Londres: Dover.
  - Reichardt, W., Abdel Alim, O., Schmidt, W. (1974). "Abhängigkeit der Grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit von der Art de Musikmotives, der Nachhallzeit und der Nachhalleinsatzzeit". *Applied Acoustics*, (7), p. 243.
  - Rein Pirn (1992). "Some Objective and Subjective Aspects of Three Acoustically Variable Halls". *Applied Acoustics*, (35), pp. 221-231.
  - Rindel, J. *et al.* (2001). "Comparisons between Computer Simulations of Room Acoustical Parameters and those Measured in Concert Halls Part 2 : Göteborgs Konserthus and Barbican Concert Hall". *Actas del 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*. Roma.
  - Rindel, J. H. (1991). "Design of New Ceiling Reflectors for Improved Ensemble in a Concert Hall," *Applied Acoustics*, (34), pp. 7-17.
  - Risset, Jean Claude (1978c). *Hauteur et Timbre des Sons*. París: Rapports IRCAM N°11.
  - Roederer, Juan (1973). *Introduction to the Physics and Psychophysics of Music*. New York: Springer Verlag. Traducido al español: *Física y Psicofísica de la Música*. (1997). Buenos Aires: Ricordi.

- 
- Rossing, Thomas y Fletcher, Neville (1995). *Principles of Vibration and Sound*. New York: Springer-Verlag.
  - Sabine, Wallace Clement (1922). *Collected Papers on Acoustics*. London: Cambridge/Harvard university press.
  - Sakurai, Y. *et al.* (1993). "The reflection of sound at grazing angles by auditorium seats". *Applied Acoustics*, (39), pp. 209-228.
  - Schaeffer, Pierre (1966). *Traite des Objets Musicaux*. París: Edition du Seuil.
  - Schaeffer, Pierre (1952). *A la Recherche d'une Musique Concrete*. Paris: Edition du Seuil. Trad. esp: ¿Que es la Música Concreta? (1959). Ed. Nueva Visión.
  - Schaudinischky, L. H. (1976). *Sound, Man and Building*. London: Applied Science Publishers.
  - Schumacher, Robert (1992). "Analysis of aperiodicities in nearly periodic waveforms". *Journal of the Acoustical Society of America*, (91), pp. 438-451.
  - Schultz, T. J. y Watters, B. G. (1964). "Propagation of sound across audience seating". *Journal of the Acoustical Society of America*. pp. 885-896.
  - Sekiguchi K. y Hanyu T. (2001). "A Study on the Acoustic Mechanisms for Supplying Reflection from Behind without the Use of Back Wall Effects". *Acts of the 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*. Roma.
  - Sekiguchi, Katsuaki *et al.* (1992). "Analysis of Sound Field on Spatial Information Using a Four-Channel Microphone System Based on Regular Tetrahedron Peak Point Method". *Applied Acoustics*, (37), pp. 305-323.
  - Sekiguchi, Katsuaki y Kimura, Sho (1991). "Calculation of Sound Field in a Room by Finite Sound Ray Integration Method". *Applied Acoustics*, (32), pp. 121-148.
  - Sethares, William (1993). "Local Consonance and the Relationship Between Timbre and Scale". *Journal of the Acoustical Society of America*, (94), pp. 1218-1228.
  - Sethares, William (1998). *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*. London: Springer-Verlag.
  - Seto, William (1971). *Acoustics, Theory and Problems*. USA: McGraw-Hill Inc. Trad. esp. *Acústica, Teoría y Problemas* (1973). Mexico McGraw-Hill serie Schaum.
  - Shankland, Robert (1979). "Acoustical designing for performers". *Journal of the Acoustical Society of America*, (65), pp. 140-144.
  - Schoroeder, Manfred (1980). "Toward better acoustics for concert halls". *Physics Today*, pp. 24-30.
  - Schoroeder, M. (1979). "Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion". *Journal of the Acoustical Society of America*, (65), pp. 958-963.
  - Schoroeder, M. (1975). "New results and ideas for architectural acoustics". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Schoroeder, M., Gottlob, D. y Siebrasse, F. (1974). "Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters". *Journal of the Acoustical Society of America*, (56), pp. 1195-1201.
  - M. R. Schroeder M. R. *et al.* (1966). "Acoustical Measurements in Philharmonic Hall (New York)". *J. Acoust. Soc. Am.*, (40), p. 434.

- 
- Schultz, T. y Kirkegaard, L. (1975). "Multi-purpose auditoria: an american phenomenon," en *Auditorium Acoustics* (Applied Science Publishers, London).
  - Soulodre, Gilbert y Bradley, John (1995). "Subjective evaluation of new room acoustic measures". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (1), pp. 294-298.
  - Spanier, Edwin (1994). *Algebraic Topology*. Londres: Springer eBooks.
  - Stake, R. E. (1995). *Investigación con estudio de casos*. Madrid: Morata.
  - Steele, James (1996). *Theatre Builders*. London: Academy Editions.
  - Stephens, R. W. (1975). "Vern Oliver Knudsen- A memorial tribute". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Stern, R. y Trahiotis, C. (1995). "Models of binaural interaction". *Hearing*, editado por B. Moore. New York: Academic.
  - Summers JE (2013). "Information transfer in auditoria and room-acoustical quality". *J Acoust Soc Am*, 133(4), pp. 242–248.
  - Tachibana, Hideki *et al*, (1989). "Acoustic survey of auditoriums in Europe and Japan". *J. Acoust. Soc. Jpn.*, (E) 10, pp. 73-85.
  - Talaske, Richard (1982). *Halls for Musical Performance. Two Decades of Experience: 1962-1982*. Chicago: Acoustical Society of America.
  - Tamura, M. *et al*. (1995). "Spatial Fourier-transform method for measuring reflection coefficients at oblique incidence. II. Experimental results". *Journal of the Acoustical Society of America*, 97 (4), pp. 2255-2262.
  - Terhardt, E. *et al*. (1982). "Pitch of complex signals according to virtual-pitch theory: Tests, examples, and predictions". *Journal of the Acoustical Society of America*, (71), pp. 671-678.
  - Thiele, R. (1953). "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen". *Acustica*, (3), p. 291
  - Trivedi, N. y Mehrotra, D. (1991). "Optimum R/T of Music Studios Suited to Indian Music". *Applied Acoustics*, (32), pp. 169-177.
  - Tronchin, Lamberto y Farina, Angelo (1997). "Acoustics of the Former Teatro *La Fenice* in Venice". *Journal of the Audio Engineering Society*, 45 (12), pp. 1051-1062.
  - Umemoto, T. (1989). "The psychological structure of music". *Proc. of the First International Conference on Music Perception and Cognition*, Kyoto.
  - Veneklasen, Paul (1975). "Design considerations from the viewpoint of the professional consultant". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Vian, J. P. y Martin, J. (1992). "Binaural Room Acoustics Simulation: Practical Uses and Applications". *Applied Acoustics*, (36), pp. 293-305.
  - Viney, Dave (2008). *The obsession with compression*. London: Thames Valley University.
  - Vorländer, Michael (1998). "Recent progress in room acoustical computer simulations". *Actas del Primer Congreso Iberoamericano de Acústica (FIA, AAA)*. Florianópolis, Brasil.
  - Vorländer, Michael y Mommertz, Eckard (2000). "Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients". *Applied Acoustics*, (60), pp. 187-199.

- 
- Wallach H., Newman E., Rosenzweig (1949). The precedence effect in sound localization. *Am. J. Psychol.*, (52), pp. 315-336.
  - Wernly, Juan A. (1995). "Índice numérico para valuación de calidad de salas". *Revista Latinoamericana de Acústica*, III (1), pp. 11-32.
  - Wessel, David L. (1978). *Low Dimensional Control of Musical Timbre*. París: Rapports IRCAM N°12.
  - West, J. E. y Sessler, G. M. (1964). "Sound transmission over theatre seats". *Journal of the Acoustical Society of America*, (36), pp. 1725-1732.
  - Wilkens H. y Plenge G. (1975). "The correlation between subjective and objective data of concert halls". *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science Publishers.
  - Wingtman F., y Kistler, D.(1995). "Factors Affecting the Relative Salience of Sound Localization Cues". *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. Editado por: Robert H. Gilkey y Timothy R. Anderson, pp. 1-23. New Jersey: Laurence Erlbaum associates, publishers, 1997,. Traducción al español resumida inédita de O. P. Di Liscia.
  - Woodford, Charles, *et al.* (1998). "Listening conditions in higher education classrooms: one method of improving them." [en línea]. Consultado el 20 de octubre de 2016 en EBSCO.
  - Yanxun, Chen (1994). "A Study on the Acoustical Problem of Stereo Cinema". *Applied Acoustics*, (41), pp. 275-283.
  - Yin, Robert K. (1994). *Case Study Research. Design and Methods*. London: SAGE.
  - Zahorik, Pavel. (2009) "Perceptually relevant parameters for virtual listening simulation of small room acoustics". *JASA*, (126), pp. 776-791.
  - Zwicker, E. y Fastl, H. (1999). *Psychoacoustics. Facts and Models*. Berlin: Springer-Verlag.