

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“Modificación del tiempo de reverberación de una sala multipropósito con el sistema de acústica variable Constellation de Meyer Sound Labs, Inc”**

***TRABAJO FINAL DE MASTER***

Autor/a:  
**Ana Lorente Izquierdo**

Tutor/a:  
**Javier Redondo Pastor**

***GANDIA, 2018***

## MODIFICACIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN DE UNA SALA MULTIPROPÓSITO CON EL SISTEMA DE ACÚSTICA VARIABLE ACTIVA *CONSTELLATION*, DE MEYER SOUND LABS, Inc.

---

**Resumen** – La modificación del tiempo de reverberación de una sala por medios pasivos es una cuestión que ha sido ampliamente abordada en la acústica de salas y que sigue teniendo una gran vigencia hoy en día. Sin embargo, las variaciones obtenidas son muy pequeñas y requieren de un gran despliegue de medios económicos, mecánicos y humanos. La utilización de procesado de señal digital en el campo de la acústica ha favorecido el desarrollo de sistemas de acústica activa que permiten variar los distintos parámetros acústicos, incluyendo una amplia modificación del tiempo de reverberación de una sala de manera instantánea, proporcionando así una acústica óptima para cada tipo de evento. En este trabajo se presentan estos sistemas y se estudia la viabilidad del sistema de acústica variable activa *Constellation*, de *Meyer Sound Labs, Inc.*, para variar el parámetro de tiempo de reverberación de una sala multipropósito y adaptarlo a distintos tipos de eventos.

**Palabras clave:** Acústica variable activa, tiempo de reverberación, salas multipropósito, *Constellation*, *Meyer Sound Labs, Inc.*

**Abstract** – Modifying the reverberation time of a room by passive means has been a widely studied topic in the acoustics field. However, the obtained results are very small variations and require a big economic, mechanic and human deployment. The usage of digital signal processing in acoustics has favoured the development of active acoustic systems that allow to vary the different acoustic parameters of a hall, including a wide modification of the reverberation time, in an instant manner, providing optimal acoustics for each type of event. This paper presents these systems and shows the feasibility of the *Constellation* active acoustic system, by *Meyer Sound Labs, Inc.*, to

adapt the reverberation time of a multipurpose hall to different types of performances.

**Keywords:** Active variable acoustics, reverberation time, multipurpose hall, *Constellation*, *Meyer Sound Labs, Inc.*

Todo parece imposible, hasta que se hace.

**Dicho popular**



<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA</b>	<b>13</b>
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>14</b>
3.1 Acústica de salas	14
3.2 Sistemas de acústica variable activa	20
3.2.1 <i>Sistemas en línea y no en línea</i>	24
3.2.2 <i>Sistemas híbridos</i>	27
3.2.3 <i>Limitaciones: coloración e inestabilidad</i>	28
<b>4. SISTEMA CONSTELLATION DE MEYER SOUND LABS, INC.</b>	<b>29</b>
4.1 El algoritmo VRAS™	30
4.2 Componentes	33
4.2.1 <i>Altavoces</i>	33
4.2.2 <i>Micrófonos</i>	34
4.2.3 <i>Plataforma de audio digital D-MITRI</i>	34
4.2.4 <i>Software de control CueStation</i>	37
4.3 Especificaciones del sistema	38
4.4 Requisitos adicionales del sistema	38
<b>5. DESARROLLO</b>	<b>39</b>
5.1 La sala: usos y configuraciones	39
5.2 Diseño del sistema	41
5.3 Ajuste del sistema. Fases	45
5.3.1 <i>Verificación</i>	45
5.3.2 <i>Pre-programación y calibración</i>	46
5.3.3 <i>Voicing o ajuste final</i>	46
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>47</b>
6.1 Sistema apagado	49
6.2 Teatro Musical	50
6.3 Música de Cámara	51
6.4 Ópera	52
6.5 Música Sinfónica	53
6.6 Música Coral	54
6.7 Resultados globales	55

<b>7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>56</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>57</b>

Figura 1. Los cuatro procesos de comunicación de una actuación en vivo.....	10
Figura 2. Partes de la respuesta de impulso (M. Poletti n.d.). .....	14
Figura 3. Valores de C80 (sala vacía) y de RTmid (sala ocupada) medidos en 36 salas de conciertos (según Beranek). .....	16
Figura 4. Rangos de tiempos de reverberación óptimos (según Ellison and Schwenke). .....	19
Figura 5. Principio de funcionamiento de los sistemas de acústica variable activa.....	21
Figura 6. Resonadores con micrófonos del "assisted resonance system" .....	23
Figura 7. Tiempos de reverberación del Royal Festival Hall de Londres. a) Sistema conectado (sala vacía). b) Sistema conectado (sala ocupada). c) Sistema desconectado (sala vacía). d) Sistema desconectado (sala ocupada) (Carrión Isbert 1998). .....	23
Figura 8. Sistema en línea o no regenerativo.....	24
Figura 9. Sistema no en línea o regenerativo.....	25
Figura 10. Variable Room Acoustic System (VRAS) .....	30
Figura 11. Equivalente electroacústico de una sala acoplada acústicamente. ....	31
Figura 12. Curva de decaimiento energético con doble pendiente (A y B) debida al acoplamiento de espacios acústicos.....	32
Figura 13. Algunos modelos de altavoces Meyer Sound utilizados para <i>Constellation</i> . .....	33
Figura 14. Micrófono cardioide miniatura.....	31
Figura 15. Micrófono cardioide compacto.....	34
Figura 16. Micrófono omnidireccional miniatura.....	31
Figura 17. Micrófono omnidireccional de superficie.....	34
Figura 18. Ejemplo de conexionado de un sistema <i>Constellation</i> . .....	36
Figura 19. Software <i>CueStation</i> de Meyer Sound. ....	37
Figura 20. Configuración de asientos en grada. ....	40
Figura 21. Configuración de asientos en grada. Vista desde la parte trasera de la sala.....	40
Figura 22. Configuración de asientos en grada. Vista desde el balcón lateral.....	41
Figura 23. Vista de planta del sistema de escenario.....	42
Figura 24. Vista de sección del sistema de escenario.....	43
Figura 25. Vista de planta de los altavoces laterales y de techo en los balcones del sistema de sala.....	44
Figura 26. Vista de planta de los altavoces de techo y micrófonos del sistema de sala. ....	44
Figura 27. Vista de sección del sistema de sala y de escenario.....	45
Figura 28. Micrófonos utilizados para la medición de los tiempos de reverberación.....	48
Figura 29. RT30 con el sistema apagado. ....	49
Figura 30. RT30 para la configuración de Teatro Musical. ....	50
Figura 31. RT30 para la configuración de Música de Cámara. ....	51
Figura 32. RT30 para la configuración de ópera. ....	52
Figura 33. RT30 para la configuración de Música Sinfónica.....	53

<b>Figura 34. RT30 para la configuración de Música Coral.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 35. RT30 para todos los tipos de evento.....</b>	<b>55</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la acústica en las salas destinadas a la música y la palabra ha sido ampliamente establecida en la literatura científica. La experiencia musical no se puede divorciar de la acústica del espacio donde es interpretada. Dependiendo de cómo la sala afecta a los sonidos en ella producidos los intérpretes actúan, tocan o cantan de manera diferente, tanto consciente como inconscientemente, adaptando la interpretación a la acústica del espacio (Beranek 1996).

En las salas destinadas a la palabra, el teatro o la música en vivo de cualquier tipo, las características acústicas del espacio juegan un papel muy significativo en la percepción objetiva y subjetiva de la calidad sonora, tanto por parte de la audiencia como de los intérpretes. En una interpretación en vivo tienen lugar cuatro procesos de comunicación: la comunicación – bidireccional – entre intérpretes y audiencia, y la respuesta de la sala a ambos grupos (ambiente o atmósfera acústica) (M. Poletti n.d.).

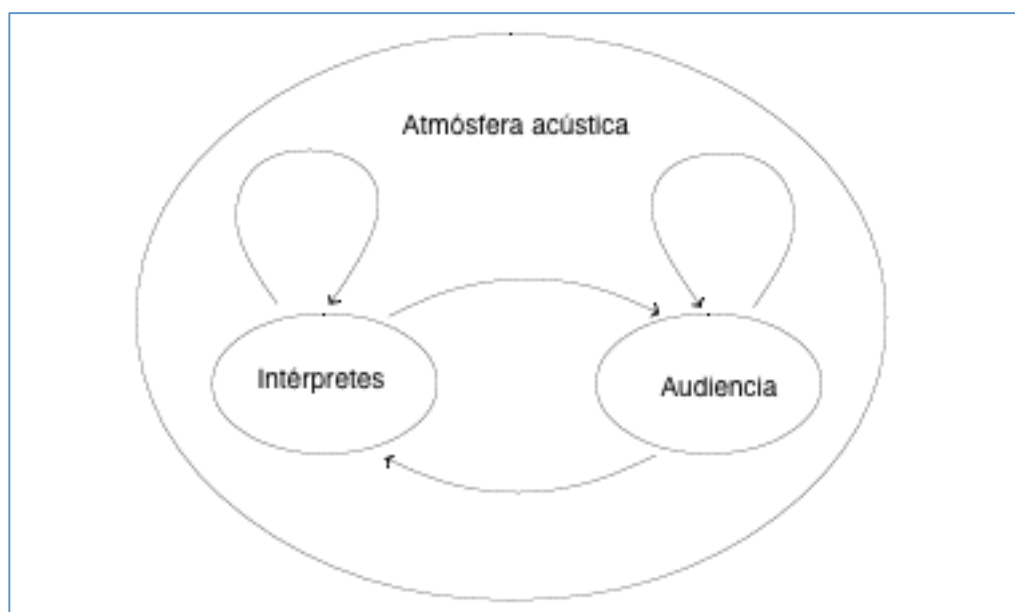


Figura 1. Los cuatro procesos de comunicación de una actuación en vivo.

La consecución satisfactoria de los procesos de comunicación que deben darse para la transmisión del mensaje intérprete-audiencia y audiencia-intérprete, y de la respuesta de la sala a ellos mismos, depende de las características acústicas de la sala.

Hay una serie de características acústicas relativas a la percepción de calidad sonora que aquí dividiremos en objetivas y subjetivas: las características acústicas objetivas hacen referencia a aquellos fenómenos desagradables a la escucha que entorpecen y dificultan la transmisión del mensaje, tales como el eco, el eco flotante, las focalizaciones, el ruido de fondo o las vibraciones estructurales. La ausencia de estos fenómenos determina una percepción objetiva de calidad acústica. De la misma manera, hay una parte subjetiva en la percepción de calidad sonora (dejando a un lado la ejecución artística por parte de los intérpretes), que está relacionada con una serie de parámetros acústicos medibles a partir de la respuesta de impulso y que son ampliamente usados en el diseño acústico para predecir la calidad subjetiva de la acústica de una sala, tales como la intimidad, la claridad, la espacialidad, la sonoridad y la reverberancia, entre otros. Los valores óptimos de estos parámetros, además, varían según el tipo de evento o el tipo de música interpretada.

Históricamente las salas han sido construidas, en su mayoría, para tener un uso artístico único, y por lo tanto, su diseño acústico debía ser válido para un tipo de evento determinado: la acústica de un teatro debía ser la apropiada para voz, mientras que la acústica de una sala de ópera debía ser la óptima para una actuación operística. Sin embargo, debido a factores sociales, políticos y económicos varios que quedan fuera del objeto de estudio de este trabajo, el mundo de las artes debe reinventarse y maximizar su eficiencia para subsistir, y una de las maneras en las que se está llevando a cabo esta transformación es en la construcción de salas multipropósito que permitan albergar la máxima cantidad de eventos para conseguir una mayor afluencia de público y, en consecuencia, de ingresos. Si bien este tipo de salas no son una novedad – hay ejemplos de salas multipropósito que datan de principios del s. XVIII, como el Redouten Hall, en Viena, cuyo espacio rectangular ha servido para albergar óperas, bailes de máscaras, conciertos sinfónicos e incluso banquetes nupciales reales (Wiener Hofburg Orchester n.d.) – el diseño acústico consciente de este tipo de espacios sí que es relativamente reciente, y la flexibilidad de uso se está convirtiendo en la norma (Barron 1993).

Con todo esto, es indiscutible que el diseño acústico de una sala es un componente importante de su éxito comercial (M. Poletti 2010), pero albergar en una misma sala

gran cantidad de eventos diferentes con una buena calidad acústica requiere una variación de los distintos parámetros acústicos que ha de ser muy sustancial para que sean percibidos subjetivamente<sup>1</sup>, y que no es factible llevar a cabo con medios pasivos. Este es el caso en lo referente a la variación del tiempo de reverberación, que es el cambio acústico más valioso y costoso que se puede conseguir (Barron 1993), y cuyo valor está estrechamente relacionado con el tipo de evento que tenga lugar. La utilización de procesado de señal digital en el campo de la acústica ha favorecido el desarrollo de sistemas que permiten variar los distintos parámetros acústicos, incluyendo una amplia modificación del tiempo de reverberación de una sala de manera instantánea, proporcionando así una acústica óptima para cada tipo de evento, y cuyo estudio y resultados parciales se expondrán a continuación.

---

<sup>1</sup> Barron especifica que el carácter acústico es una cuestión genérica y no de detalle, pequeños cambios de



## 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo final de máster es estudiar la viabilidad de un sistema de acústica variable activa específico, en este caso el sistema *Constellation* de Meyer Sound Labs Inc., para adaptar las propiedades acústicas de una sala multipropósito, en particular el tiempo de reverberación, a distintos tipos de eventos. Se parte de una sala multipropósito con una acústica de calidad<sup>2</sup> para eventos de palabra y con un tiempo de reverberación natural en la banda de medios (RT30) de 0'89s. La sala ha de albergar los siguientes tipos de eventos:

- Teatro Musical
- Música de Cámara
- Música Sinfónica
- Ópera
- Música Coral

Se espera conseguir cambios significativos en el tiempo de reverberación para adaptar cada tipo de evento a su acústica óptima, sin la generación de elementos sonoros indeseados.

Además, se pretende dar a conocer de manera genérica el funcionamiento de los sistemas de acústica variable activa, y en particular del sistema *Constellation*, desde la fase de diseño hasta su implementación.

La metodología para estudiar la viabilidad del sistema de acústica activa en el cambio del tiempo de reverberación de la sala multipropósito será el análisis del funcionamiento del sistema a través de la medición de los distintos tiempos de reverberación de la sala, utilizando para ello los datos obtenidos en la propia sala y a través del sistema activo en sus distintas opciones, y analizando los resultados con la herramienta de software matemático *Matlab*.

---

<sup>2</sup> Hace referencia a una acústica que permita una consecución satisfactoria de los procesos de comunicación que deben darse para una transmisión óptima del mensaje, tanto objetiva como subjetivamente.

### 3. ESTADO DEL ARTE

Antes del siglo XX el uso de la ciencia para diseñar la acústica de una sala, o incluso para estudiarla, era prácticamente inexistente. El teatro griego clásico, el teatro romano, el barroco, los teatros de ópera tradicionales, el teatro inglés con las galerías abiertas o la sala de conciertos rectangular clásica fueron desarrollados sin casi ninguna noción científica sobre acústica (Barron 1993). Sin embargo, los avances llevados a cabo en el último siglo en este campo han aportado un conocimiento muy valioso sobre las características que determinan una buena acústica.

#### 3.1 ACÚSTICA DE SALAS

Como apuntábamos anteriormente, las características acústicas del espacio juegan un papel muy significativo en la percepción de la calidad sonora. Determinar la ausencia o presencia de fenómenos desagradables a la escucha que entorpecen y dificultan la transmisión del mensaje, tales como el eco, el eco flotante, las focalizaciones, el ruido de fondo o las vibraciones estructurales, es una cuestión en la que la mayoría de personas llegarían a un consenso inmediato, y que por ello llamamos aquí de percepción objetiva. No obstante, el amplio estudio de las impresiones subjetivas de calidad sonora llevado a cabo por grandes autores en los últimos años ha favorecido el desarrollo de otra serie de parámetros acústicos medibles, que son usados en el diseño acústico para predecir la calidad subjetiva de la acústica de una sala, como son la intimidad, la claridad, la espacialidad, la sonoridad y la reverberancia, entre otros. Estos parámetros son derivados de la respuesta de impulso de la sala (Fig. 2).

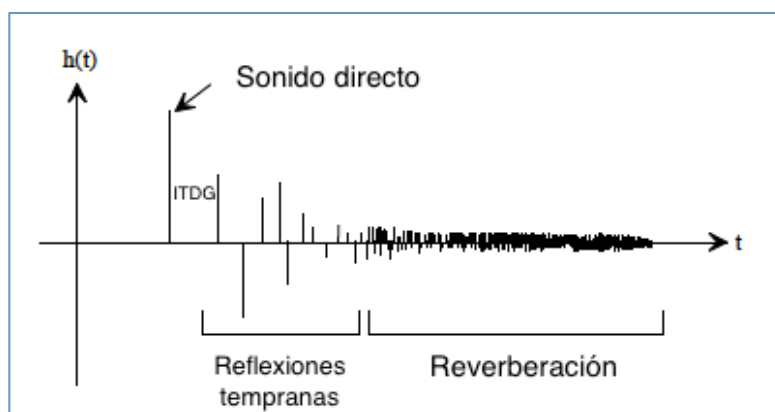


Figura 2. Partes de la respuesta de impulso (M. Poletti n.d.).

La respuesta de impulso se divide en varias partes: el sonido directo, las reflexiones tempranas (energía temprana) y la reverberación (energía tardía). El sonido directo es un evento único fácilmente identificable, pero la división entre reflexiones tempranas y reverberación es menos obvia puesto que se produce una transición gradual entre las dos zonas (Stewart and Sandler 2007). A efectos prácticos, se considera que la energía temprana es la región de la respuesta de impulso que llega en los primeros 80 milisegundos, y la tardía la que llega después, aunque el valor varía dependiendo de la forma y el volumen de la sala. Los parámetros acústicos de calidad subjetiva están relacionados con estas zonas de energía temprana y tardía. La siguiente tabla muestra el término subjetivo asociado al parámetro medible:

Término Subjetivo	Parámetro Medible
Intimididad	Initial Time Delay Gap (ITDG)
Claridad	C50, C80
Espacialidad	ASW, IAAC, LEV
Sonoridad	G
Reverberancia	RT, EDT

Tabla 1. Términos subjetivos de calidad acústica asociados a sus parámetros medibles.

Por ejemplo, la sensación de **intimididad** sugiere el tamaño del espacio en el que se desarrolla el evento y está relacionado con el "Initial-Time-Delay Gap" (ITDG), definido como el intervalo de tiempo en milisegundos existente entre la llegada del sonido directo procedente del escenario y la primera reflexión significativa (Carrión Isbert 1998). Beranek establece el valor óptimo de este parámetro entre 15 y 30 ms para un oyente sentado en el centro de la sala para música sinfónica.

La **claridad** ( $C_{80}$ ) es la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la que llega después.

La relación entre la energía temprana y la reverberante. Son las primeras reflexiones que le llegan al oyente, son integradas por el oído junto con el sonido directo (Carrión Isbert 1998) y contribuyen a aumentar el nivel de percepción de detalle musical. En el caso de eventos de palabra se utilizan los primeros 50 ms ( $C_{50}$ ) y contribuyen a aumentar la inteligibilidad de la palabra. Para maximizar la sensibilidad al juzgar la calidad acústica se utiliza el valor medio en las bandas de octava de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz (Beranek 1996). Beranek recomienda un valor medio de entre -4 y 0 dB para una sala ocupada, y Carrión recomienda evitar valores superiores a +1 dB. Si no hay reverberación la música será muy clara y el valor de  $C_{80}$  será alto y positivo. Si hay mucha reverberación la música tendrá muy poca claridad y el valor de  $C_{80}$  será alto y negativo. El valor de  $C_{80}$  será igual a 0 dB cuando la energía del sonido temprano y la del sonido reverberante sean iguales (Beranek 1996). La siguiente gráfica muestra la dependencia entre la claridad y el tiempo de reverberación (RT), donde se representan los valores de  $C_{80}$  (sala vacía) y del tiempo de reverberación medio (RTmid) (sala ocupada) en 36 salas de conciertos (según Beranek) (Carrión Isbert 1998). Se puede observar que la claridad disminuye a medida que el RT aumenta.

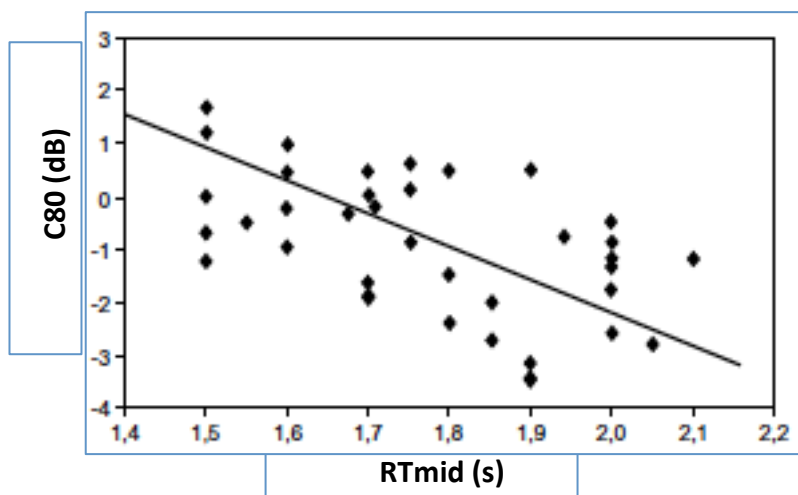


Figura 3. Valores de  $C_{80}$  (sala vacía) y de RTmid (sala ocupada) medidos en 36 salas de conciertos (según Beranek).

La **espacialidad** se mide con diferentes parámetros. Las propiedades espaciales del sonido temprano son las que controlan la sensación de amplitud de la fuente sonora sin alterar su localización en el escenario, es lo que se llama la amplitud

aparente de la fuente o ASW (*Apparent Source Width*) y viene determinada por la fracción de energía lateral temprana o LF (*Lateral energy Fraction*) aunque la procedente de otras direcciones también contribuye (M. Poletti 2010). Se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo (Carrión Isbert 1998). Se utiliza el valor medio de los valores LF correspondientes a las bandas de frecuencias de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz, denominado  $LF_4$ , y según Carrión debe ser mayor o igual de 0,19 para sala vacía. A mayor valor de  $LF_4$ , mayor grado de espacialidad del sonido, y por lo tanto, mayor será la ASW.

Una medida alternativa al ASW es el coeficiente de correlación cruzada interaural o IACC (*InterAural Cross-Correlation*), que se define como la correlación entre los sonidos que llegan a ambos oídos y es indicativa del grado de similitud existente entre las dos señales. Si son iguales, el IACC valdrá 1, mientras que si son señales aleatorias independientes, el IACC será 0 (Carrión Isbert 1998).

La relación entre la energía que llega lateralmente al oyente después de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo determina la sensación de sonido envolvente o LEV (*Listener Envelopment*), y al igual que con la ASW, se ve acentuada hasta cierto punto por la energía tardía procedente de otras direcciones (M. Poletti 2010).

La **sonoridad** o *Loudness* se relaciona con el parámetro conocido como *Strength Factor*,  $G$ , y se mide en decibelios (dB). Hace referencia a la amplificación del sonido producida por la sala, y depende de varios factores (Beranek 1996):

- De la distancia del oyente al escenario: El sonido directo llega al oyente y su sonoridad decrece a medida que viaja más distancia, el nivel disminuye 6dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente sonora.
- De la presencia de superficies que proyecten reflexiones tempranas a la audiencia: la energía temprana que llega a los oyentes después del sonido directo contribuye a aumentar la sonoridad.
- Del área de audiencia y del RT: la relación entre el tiempo de reverberación y el tamaño de la audiencia también afecta la sonoridad. El área ocupada

por la audiencia, junto con la orquesta, es el principal elemento absorbente de una sala, y la proporción entre el volumen cúbico de la sala y la absorción determina el tiempo de reverberación, tal y como establece la ecuación de Sabine<sup>3</sup> para calcular el tiempo de reverberación (RT), y que cuando el volumen (V) y la absorción acústica (A) se miden en m<sup>3</sup> y m<sup>2</sup> respectivamente es:

$$\text{RT (segundos)} = \frac{0,16V}{A}$$

La **reverberancia** es la valoración subjetiva del tiempo de reverberación, el grado de reverberación percibido por el oyente en la sala. El tiempo de reverberación es el tiempo, en segundos, que un sonido tarda en decaer 60 dB, esto es, en volverse inaudible una vez ha cesado de emitirse. El RT es dependiente de la frecuencia, normalmente se determina por bandas de octava frecuenciales (125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz) y se utiliza el RTmid como valor representativo, que es el valor medio en las bandas de 500 Hz y 1 KHz. El "Early Decay Time" (EDT) se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB, y que al igual que el RT, varía en función de la frecuencia. El tiempo de reverberación ha sido utilizado tradicionalmente para valorar la viveza de la sala, sin embargo Carrión establece que es el EDT el parámetro que está más relacionado con la impresión subjetiva de viveza, ya que en todos aquellos puntos de la sala con un EDT significativamente menor que el RT, la sala resultará subjetivamente más apagada de lo que indicaría el valor de RT. Por lo tanto, para garantizar una buena difusión del sonido en una sala ocupada, el valor medio del EDT en las bandas de 500 Hz y 1 KHz ha de ser del mismo orden que el RTmid.

La reverberación no es deseable o indeseable en sí misma, sino que es uno de los componentes a disposición del compositor para producir un efecto musical y, como tal, forma parte de la música. Por ejemplo, la reverberación puede producir una riqueza de tono deseable para algunos tipos de música, muchas de las composiciones

---

<sup>3</sup> Existen expresiones más precisas para el tiempo de reverberación (Schroeder, Kuttruff, etc.) . La formula de Sabine es razonablemente precisa para salas en las que la absorción está uniformemente distribuida y la geometría de la sala es simple (sin volúmenes acoplados) (M. Poletti n.d.).

de música coral tempranas fueron escritas para ser ejecutadas en catedrales muy reverberantes, y cuando estas composiciones se ejecutan en ambientes secos, pierden cuerpo y la mayor parte de su energía (Beranek 1996). La reverberación ayuda a la audiencia a sentirse inmersa en la actuación y ayuda a los intérpretes a sentirse conectados con la sala en la que están actuando. Por otra parte, una reverberación excesiva degrada la inteligibilidad. Así pues, el tiempo de reverberación de una sala (Kinsler, et al. 2000) puede tener un impacto muy significativo en el uso potencial de la misma (Ellison and Schwenke, The Case for Widely Variable Acoustics 2010).

A continuación se muestra una tabla con los rangos de tiempo de reverberación considerados óptimos según el tipo de evento para cuatro volúmenes de sala según los estudios de diferentes autores (Dolby Laboratories, Bradley and Barron, Anderson et. al., Martellota, Ando). Los rangos mostrados corresponden al tamaño de sala más típico para cada tipo de evento (Ellison and Schwenke, The Case for Widely Variable Acoustics 2010):

<i>Volume [m<sup>3</sup>]</i>	<i>1,000</i>	<i>5,000</i>	<i>10,000</i>	<i>20,000</i>
<i>Organ, Choral</i>				<i>2.1-4.2</i>
<i>Romantic Classical</i>				<i>1.8-2.2</i>
<i>Opera</i>			<i>1.3-1.8</i>	
<i>Chamber</i>		<i>1.4-1.7</i>		
<i>Amplified Music</i>	<i>0.7</i>	<i>1.1</i>		
<i>Spoken Word</i>	<i>0.7</i>	<i>0.8</i>	<i>0.9</i>	<i>1.1</i>
<i>Cinema</i>	<i>0.4-0.6</i>	<i>0.5-0.7</i>	<i>0.7-1.0</i>	<i>0.9-1.4</i>
<i>Tele-conference</i>	<i>0.3-0.4</i>			

Figura 4. Rangos de tiempos de reverberación óptimos (según Ellison and Schwenke).

Todos estos parámetros influyen en la percepción de calidad acústica de una sala<sup>4</sup>. Barron destaca que, en definitiva, se trata de que la claridad sea la adecuada para apreciar el detalle musical, la respuesta reverberante de la sala sea la óptima, que el sonido proporcione al oyente una sensación de espacialidad, el oyente sienta la experiencia acústica como íntima y de que tenga la sonoridad adecuada. Sin embargo,

<sup>4</sup> Esta lista no es completa y omite cualquier referencia al color tonal, timbre, calidez, brillo y demás características relacionadas con el contenido frecuencial del sonido y que son también utilizadas para predecir la calidad subjetiva de la acústica de una sala.

acabamos de ver que no existe una acústica universal que sea válida y óptima para todos los tipos de eventos, sino que cada estilo de música o de interpretación requiere unos parámetros específicos para que la calidad subjetiva de la acústica sea la óptima, y entre ellos cabe destacar, por su gran variabilidad, los distintos tiempos de reverberación. De ahí que la elección del RT en el diseño acústico de salas multipropósito sea uno de los mayores dilemas existentes. Una acústica óptima para eventos de palabra y de música sinfónica en una misma sala requiere aumentar más del doble el tiempo de reverberación (Ellison and Schwenke, *The Case for Widely Variable Acoustics* 2010), y tal y como destaca Barron, no es posible conseguirlo sin asistencia electrónica. Seleccionar un RT de compromiso entre ambos usos puede resultar en una acústica que no sea apta para ninguno de los dos (Barron 1993).

### 3.2 SISTEMAS DE ACÚSTICA VARIABLE ACTIVA

Decíamos al principio de este trabajo que la construcción de salas multipropósito se está convirtiendo poco a poco en un objetivo básico, ya que la existencia de un recinto para un solo uso es un lujo únicamente asumible en casos excepcionales (Carrión Isbert 1998). La utilización de procesado de señal digital en el campo de la acústica ha favorecido el desarrollo de sistemas de acústica activa que permiten variar distintos parámetros acústicos que caracterizan una sala, incluyendo una amplia modificación del tiempo de reverberación de manera instantánea, proporcionando así una acústica óptima para cada tipo de evento.

Todos los sistemas de acústica variable activa existentes en la actualidad se basan en el siguiente esquema (Carrión Isbert 1998):



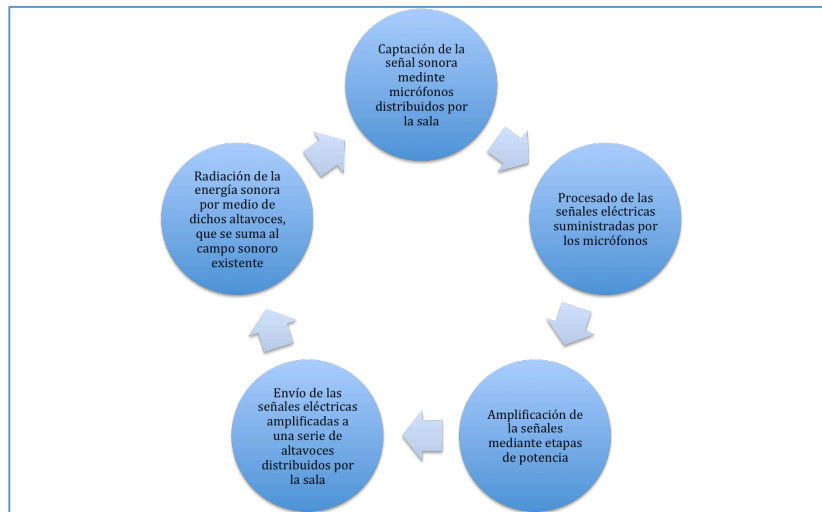


Figura 5. Principio de funcionamiento de los sistemas de acústica variable activa.

El principio de funcionamiento de los sistemas de acústica variable electrónicos se basa en la obtención de señal sonora de la sala a través de un número dado de micrófonos, que es después procesada y enviada de nuevo a la sala a mediante una serie de altavoces distribuidos en la misma. El número, la posición de los micrófonos y altavoces en la sala y el tipo de procesado es lo que difiere entre los distintos sistemas existentes en el mercado.

En general, los sistemas de acústica activa pueden superar muchas de las restricciones de los sistemas pasivos. El sonido puede ser distribuido desde las superficies de la sala con menor *delay* (retardo) y mayor amplitud que las reflexiones pasivas (limitado por la retroalimentación entre los altavoces y lo micrófonos), los altavoces pueden producir reflexiones en un rango de frecuencias muy amplio, y los problemas con frecuencias graves que pueden darse con los reflectores pasivos pueden ser eliminados. Además, los sistemas de acústica activa ofrecen distintas configuraciones instantáneas implementadas en el software, lo cual es, probablemente, más fiable y rápido que el control mecánico necesario en los sistemas pasivos para variar el RT (M. Poletti 2010).

Cabe también mencionar que predecir la acústica producida por los sistemas de acústica activa es una cuestión mucho menos crítica que predecir la acústica de una sala; los parámetros de los sistemas activos pueden ser alterados fácilmente tras la

instalación, siempre y cuando el número de transductores y su disposición sea suficiente para producir el rango de condiciones acústicas requerido (M. Poletti 2010).

No obstante, es importante tener en cuenta que los sistemas de acústica activa incrementan la energía de la sala. Una sala multipropósito destinada a albergar uno de estos sistemas deberá ser acústicamente diseñada para operar con una energía mínima, es decir, con un tiempo de reverberación bajo, que el sistema incrementará después para ajustarse a diversos tipos de eventos. Los sistemas de acústica activa actuales producen incrementos del RT del doble o más y la mayoría ofrece mejoras en la energía temprana, con lo que pueden acomodar un amplio rango de eventos (M. Poletti 2010).

Existe una clara tendencia a incorporar este tipo de sistemas en las salas multipropósito (Carrión Isbert 1998), sin embargo los primeros sistemas de acústica variable activa datan de mediados del siglo pasado. En los años 60 Peter Parkin y William Allen diseñaron el sistema “assisted ressonance system” para mejorar el tiempo de reverberación en bajas frecuencias en el *Royal Festival Hall* de Londres. El sistema consistía en un gran número de micrófonos situados dentro de resonadores Helmholtz (Figura 4) instalados sobre el techo y operando a frecuencias diferentes. Los micrófonos situados en los resonadores capturaban el sonido que era luego amplificado y enviado a una serie de altavoces distribuidos por el techo. El sistema era eficiente en frecuencias por debajo de los 2 kHz (Carrión Isbert 1998). La figura 5 muestra los tiempos de reverberación del *Royal Festival Hall* con el sistema conectado y desconectado.

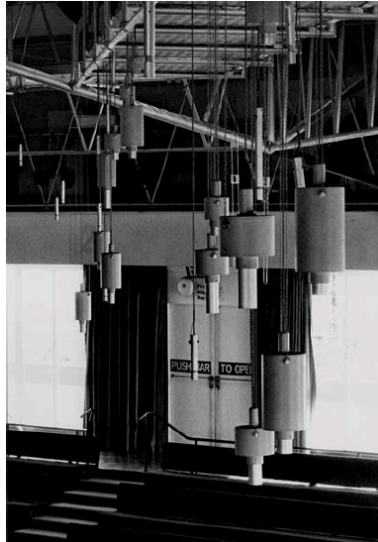


Figura 6. Resonadores con micrófonos del "assisted resonance system" en el Central Hall de la Universidad de York (Barron 1993).

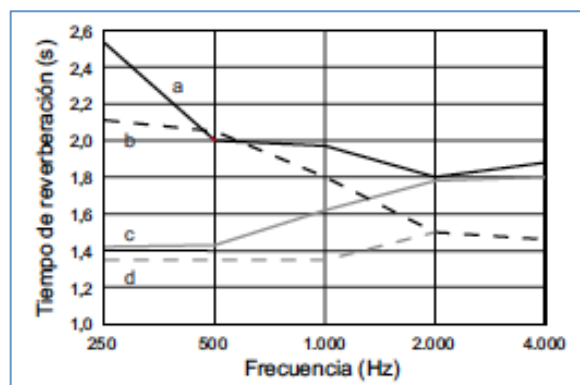


Figura 7. Tiempos de reverberación del Royal Festival Hall de Londres. a) Sistema conectado (sala vacía). b) Sistema conectado (sala ocupada). c) Sistema desconectado (sala vacía). d) Sistema desconectado (sala ocupada) (Carrión Isbert 1998).

El *assisted resonance system* conseguía un aumento del tiempo de reverberación importante por debajo de 2 KHz, y ha estado operativo durante más de 30 años.

Otro sistema aparecido a mediados de los 70 fue el MCR (*Multiple Channel Reverberation*), el cual usaba muchos canales de banda ancha. Cada canal extendía el tiempo de reverberación a las frecuencias pico de su respuesta, pero la ganancia del canal debía mantenerse baja para evitar la coloración. El sistema fue propuesto por Franssen en 1968, pero comercializado por la compañía Philips durante muchos años (Barron 1993).

Desde entonces y hasta hoy han surgido múltiples sistemas de acústica variable activa que han ido superando las limitaciones de los anteriores. Siguiendo la nomenclatura utilizada por M. Poletti, estos sistemas pueden clasificarse en dos grupos: los sistemas en línea (*In-line*) o no regenerativos, que usan micrófonos cerca del escenario y que principalmente detectan el sonido directo producido por los intérpretes, junto con algunas reflexiones tempranas del escenario, y los sistemas no en línea (*Non-in-line*) o regenerativos, que usan micrófonos lejos del escenario y que detectan el campo reverberante producido por cualquier fuente en la sala (M. Poletti n.d.).

### 3.2.1 SISTEMAS EN LÍNEA Y NO EN LÍNEA

Los sistemas de acústica activa en línea o no regenerativos usan micrófonos direccionales cercanos al escenario y pueden detectar niveles altos de sonido procedente del área escénica con un retardo de tiempo mínimo (Fig. 8). Esto hace que tengan la capacidad de alterar las propiedades acústicas relacionadas con la energía temprana, como la intimidad, la claridad, la amplitud aparente de la fuente y el EDT. La función principal de estos sistemas recae sobre el proceso de comunicación entre los intérpretes y la audiencia (M. Poletti n.d.) y de los intérpretes consigo mismos.

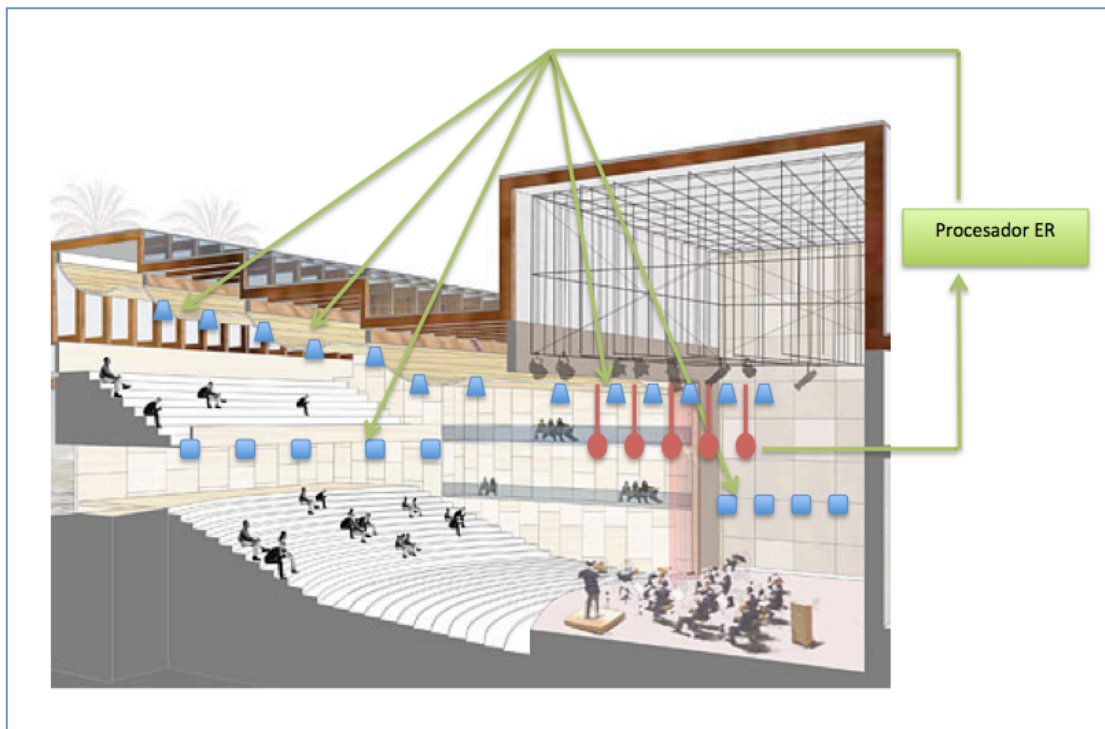


Figura 8. Sistema en línea o no regenerativo.

Los sistemas no en línea o regenerativos (Fig. 9), utilizan micrófonos situados por toda la sala para detectar la reverberación natural y pueden alterar las propiedades acústicas dependientes de la energía tardía de la sala, como la sonoridad, el tiempo de reverberación o la sensación de sonido envolvente. También son llamados regenerativos porque utilizan la regeneración que tiene lugar entre los altavoces y los micrófonos de manera controlada (M. Poletti n.d.). La función principal de estos sistemas recae sobre el proceso de comunicación entre la audiencia y los intérpretes y la interacción de la audiencia con la sala. Este tipo de sistemas responden de manera muy natural al incluir el espacio acústico en el campo de reverberación resultante (Bakker and Gillan 2014).

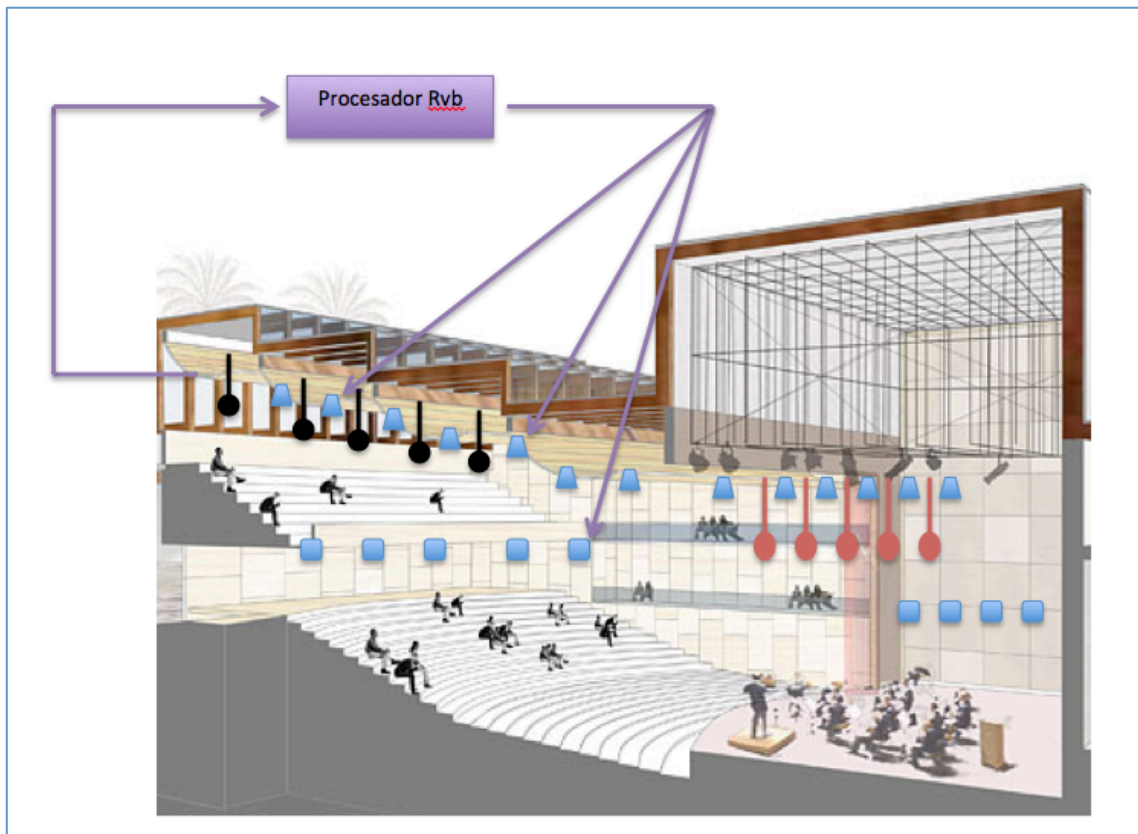


Figura 9. Sistema no en línea o regenerativo.

Los sistemas en línea no son adecuados para alterar las propiedades acústicas dependientes de la energía tardía de la sala (M. Poletti n.d.) porque sólo actuará sobre el tiempo de reverberación y la sonoridad de las fuentes en escenario, y no para otras

posiciones de sala, lo que significa que la atmósfera en la que la audiencia escucha la interpretación no se ve alterada, ni tampoco el proceso de comunicación del público y los intérpretes (por ej.: aplausos). Para alterar las propiedades acústicas dependientes de la energía tardía de la sala se necesita un sistema no en línea.

La mayoría de los sistemas comercializados hoy en día son sistemas en línea: el sistema LARES<sup>5</sup>, comercializado por Lexicon y desarrollado por D. Griesinger, utiliza un número reducido de micrófonos cerca del escenario y un número amplio de altavoces para conseguir una distribución de sonido consistente. Emplea reverberadores con variación temporal diseñada para minimizar los cambios tonales<sup>6</sup> (*pitch shift*) (M. Poletti 2010).

El sistema SIAP (*System for Improved Acoustic Performance*)<sup>7</sup> utiliza cuatro micrófonos situados cerca del área escénica y entre 50 y 200 altavoces repartidos por las paredes y techo de la sala (SIAP Acoustic Systems n.d.). Emplea procesamiento digital con variación temporal para evitar la coloración, aunque la variación temporal no se usa siempre (M. Poletti 2010).

El sistema Vivace<sup>8</sup>, desarrollado por Müller-BBM, usa convolución de baja latencia para implementar reflexiones y reverberación y emplea variación temporal para mantener la estabilidad (M. Poletti 2010).

El sistema ACS (*Acoustic Control System*)<sup>9</sup> usa un arreglo de entre 18 y 24 micrófonos sobre el área del escenario y procesadores digitales para generar reflexiones tempranas y tardías a través de un número de altavoces. Utiliza convolución del sonido directo con una secuencia de reflexión simulada para la mejora del tiempo de reverberación y emplea variación temporal para el control de la coloración regenerativa.

Existen pocos sistemas que sean exclusivamente no en línea o regenerativos. Uno de ellos es el sistema MCR que se mencionó anteriormente y que comercializa la

---

<sup>5</sup> <http://www.lares-lexicon.com/welcome.html>

<sup>6</sup> El uso de procesamiento digital con variación temporal puede provocar cambios tonales audibles.

<sup>7</sup> <https://siap.nl/es/>

<sup>8</sup> <http://www.mbbm-aso.de/en/vivace/vivace-raumklang-reinvented/>

<sup>9</sup> <https://www.acs.eu/acs/>

compañía *Event Acoustics* bajo el nombre de XLNT-MCR<sup>10</sup>. Este sistema utiliza canales de banda ancha independientes que aumentan el RT debido a la retroalimentación de cada canal a través de la sala, pero la ganancia del *loop* (o bucle) del canal debe mantenerse baja para evitar la coloración (del orden de -21dB), por lo que para doblar la energía acústica de la sala y aumentar el RT se necesitan alrededor de 100 canales. En los sistemas modernos el número de canales puede reducirse a la mitad o menos con el uso de *delays* y ecualización para reducir la coloración (Bakker and Gillan 2014). Un acercamiento similar lo ofrece el sistema CARMEN<sup>11</sup>, que emplea un concepto de “muro virtual” usando un número de celdas electroacústicas (aproximadamente de 16 a 40) compuestas por un micrófono, una unidad de filtrado electrónica, un amplificador y un altavoz cada una. Estas celdas se sitúan alrededor de las paredes y el techo y son controladas a través de un ordenador o un panel de control remoto. El incremento en el RT se consigue a través de las reflexiones entre las diferentes partes de los muros virtuales.

### 3.2.2 SISTEMAS HÍBRIDOS

Algunos sistemas adoptan un acercamiento híbrido usando micrófonos cerca del escenario para el control de reflexiones tempranas y micrófonos distribuidos por la sala para el incremento del RT. Estos sistemas pueden controlar el balance entre la energía temprana y tardía y compensar entre la amplitud aparente de la fuente y la sensación de sonido envolvente (M. Poletti 2010).

Como ejemplos de sistemas híbridos están el sistema AFC<sup>12</sup> (*Active Field Control*), de Yamaha, y el sistema *Constellation*<sup>13</sup>, de Meyer Sound Labs, Inc. El sistema AFC utiliza micrófonos cerca del área escénica para el control de reflexiones tempranas y filtros digitales de variación temporal para incrementar la densidad del sonido regenerado (M. Poletti 2010). Para prevenir los problemas de coloración causados por el *loop* de canal y mantener el sistema estable utiliza una técnica especial patentada llamada “Electronic Microphone Rotator” (EMR).

---

<sup>10</sup> <http://www.eventacoustics.com/Variable-Acoustics-and-Sound-Effects.aspx>

<sup>11</sup> <http://www.cstb.fr/dae/en/nos-produits/carmen.html>

<sup>12</sup> <http://www.yamahaproaudio.com/global/en/products/afc/index.jsp>

<sup>13</sup> <https://meyersound.com/product/constellation/>

El sistema *Constellation* utiliza el algoritmo VRAS (*Variable Room Acoustic System*) para acoplar regenerativamente y de manera electroacústica una sala física a una sala electrónica secundaria. Variar la ganancia del sistema y el RT de VRAS es análogo a variar la absorción y el volumen de la sala. Un componente en línea crea reflexiones tempranas usando micrófonos cerca de las fuentes del escenario y esto, a su vez, estimula la regeneración de la sala (Ellison and Schwenke, *The Case for Widely Variable Acoustics* 2010). *Constellation* utiliza procesamiento unitario sin variación temporal. Analizaremos en detalle este sistema en el próximo capítulo.

### 3.2.3 LIMITACIONES: COLORACIÓN E INESTABILIDAD

Todos los sistemas de acústica variable tienen las limitaciones físicas fundamentales causadas por la retroalimentación acústica de altavoces a micrófonos. Cualquier sistema puede tornarse inestable cuando las ganancias del *loop* son suficientemente altas, y cuando se opera por debajo del punto de inestabilidad pueden producirse efectos de coloración que reducen la calidad del sonido (M. Poletti 2010).

Hay varias técnicas que permiten aumentar la ganancia del loop en los sistemas multicanal minimizando las limitaciones: la mayoría de sistemas actuales utilizan técnicas de variación temporal, las cuales cambian lentamente sus funciones de transferencia variando el tiempo para reducir el riesgo de retroalimentación o *feedback*. Existen diferentes elementos que producen variación temporal, como la modulación por desplazamiento de frecuencia (*frequency-shifting*), la modulación del retardo, o la modulación de fase (M. Poletti 2004). La desventaja de los sistemas con variación temporal es que pueden producir cambios tonales audibles (*pitch-shifting*) (M. Poletti 2010).

Sin embargo, la mejora en la estabilidad producida por la variación temporal se reduce con el aumento del número de canales del sistema. Para los sistemas con 16 o más micrófonos el uso de variación temporal no aporta ninguna ventaja. Los sistemas con variación temporal son sistemas en línea que usan un número de micrófonos relativamente pequeño, donde la variación temporal sí es beneficiosa para aumentar la estabilidad (M. Poletti 2010).



Los sistemas sin variación temporal también pueden producir efectos de coloración. Un reverberador estándar tiene una ganancia de potencia que varía rápidamente en función de la frecuencia. Si se usa en un sistema de acústica activa, la ganancia del *loop* incluiría la respuesta del reverberador y exhibiría una mayor variación que si no estuviera el reverberador, por lo que su presencia incrementa el riesgo de coloración e inestabilidad. El uso de procesadores unitarios<sup>14</sup> hace que la varianza de la ganancia del *loop* no se incremente y puedan proporcionar aumentos del RT adicionales independientes de ésta, usando así ganancias de *loop* menores y reduciendo el riesgo de coloración (M. Poletti 2010).

El uso de un sistema de acústica activa requiere conseguir las condiciones acústicas deseadas sin producir efectos de coloración perceptibles, de manera que la acústica producida tenga un sonido natural. Todos los sistemas actuales mencionados anteriormente cuentan con un gran número de instalaciones y se han ganado una reputación por producir una acústica natural (M. Poletti 2010).

#### **4. SISTEMA CONSTELLATION DE MEYER SOUND LABS, INC.**

El sistema *Constellation* es una solución integral que incluye todos los componentes necesarios para su funcionamiento: micrófonos, altavoces, procesamiento digital y software dedicado. La cantidad, selección y distribución de altavoces y micrófonos se determinan en base a los requerimientos arquitectónicos y acústicos de la sala. Cada sistema es único y se diseña a medida.

El sistema se divide en dos subsistemas: el sistema de escenario (en línea) y el sistema de sala (no en línea). El sistema de escenario utiliza los mismos micrófonos de escenario para proporcionar reflexiones tempranas y reverberación con procesadores dedicados. El sistema de sala utiliza los micrófonos ubicados sobre la audiencia en la sala para generar reverberación. El procesamiento acústico para las distintas áreas de la sala es referido como “zonas”, con 16 señales acústicas decorreladas por zona. *Constellation* proporciona control acústico difuso asegurando que la energía acústica

---

<sup>14</sup> Un procesador multicanal puede tener una ganancia constante con la frecuencia si la suma de sus salidas es constante para una entrada constante. Se dice entonces que el procesador es unitario porque la matriz de funciones de transferencias es unitaria a cada frecuencia (M. Poletti 2006).

no pueda ser localizada en ningún altavoz en particular desde ninguna posición de audiencia o de intérprete.

En el corazón del sistema está el algoritmo patentado VRAS™, desarrollado por el Dr. Mark Poletti, de la Universidad de Auckland, en 1993.

#### 4.1 EL ALGORITMO VRAS™

El algoritmo *Variable Room Acoustics System* (VRAS) es un sistema no en línea que usa un número de canales de micrófono/altavoz de banda ancha independientes, como en el sistema MCR visto anteriormente (Figura 10). Las señales de micrófono son enviadas a una matriz de reverberación multicanal, la cual reverbera las señales antes de enviarlas a los altavoces.

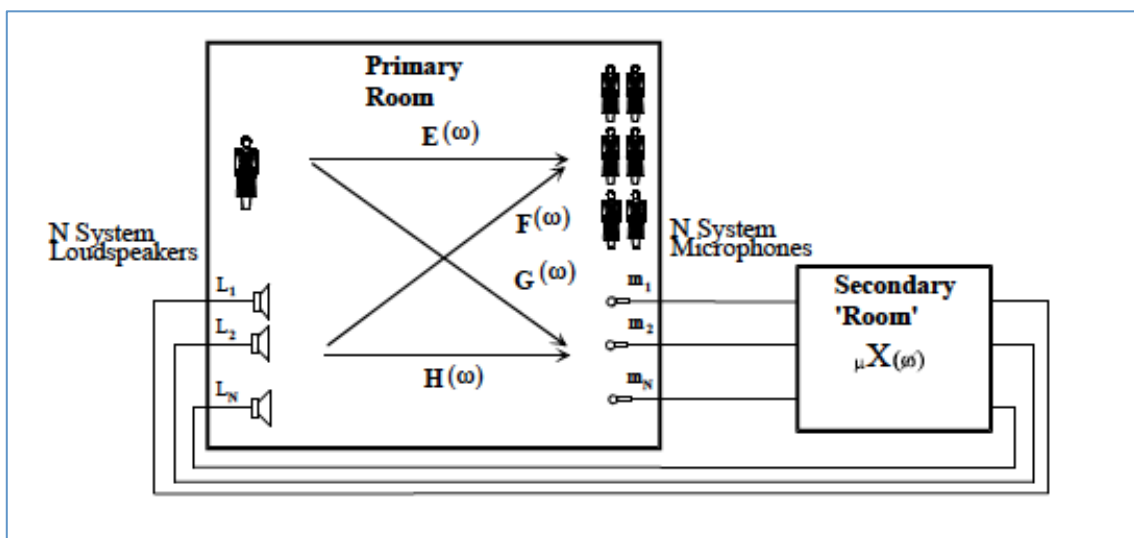


Figura 10. Variable Room Acoustic System (VRAS)

El sistema aumenta el tiempo de reverberación en la sala incrementando el tiempo de reverberación del reverberador sin aumentar la ganancia del *loop*, de manera que consigue altas ganancias de reverberación con bajas ganancias de *loop*. Ocurre un efecto similar en una sala cuando se aumenta el volumen mientras se mantiene la misma absorción total, por lo que el sistema VRA aumenta el volumen aparente de la sala. El reverberador es de diseño unitario, lo que proporciona una ganancia plana con la frecuencia y elimina el incremento de riesgo de coloración e

inestabilidad que puede ocurrir con reverberadores estándar. Además, el reverberador incluye filtros que permiten controlar el tiempo de reverberación según la frecuencia y otros filtros digitales adicionales para la ecualización del sistema.

VRAS es el equivalente electroacústico de una sala acoplada acústicamente, puesto que lo que hace es acoplar la sala física, por medios electroacústicos, a una segunda "sala" implementada digitalmente (Meyer Sound Laboratories, Inc. 2006). La figura 11 ejemplifica este concepto.

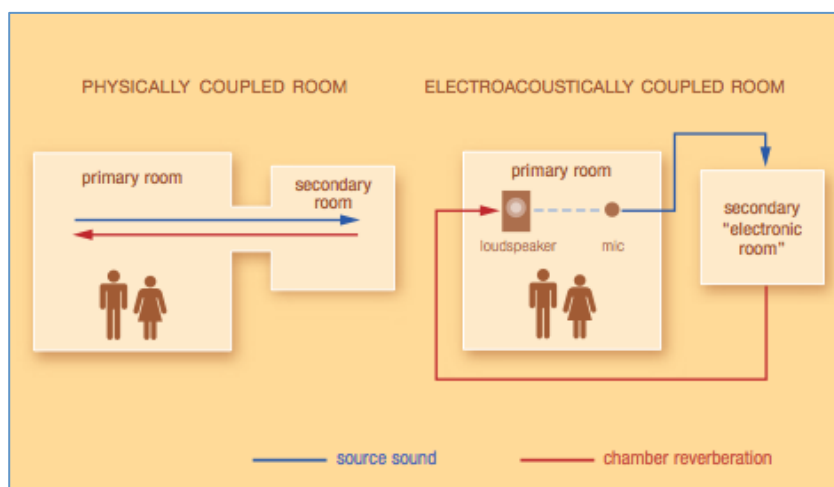


Figura 11. Equivalente electroacústico de una sala acoplada acústicamente.

El rendimiento del sistema depende de los dos tiempos de reverberación y del coeficiente de acoplamiento electroacústico, que es análogo al coeficiente de acoplamiento pasivo. El coeficiente de acoplamiento electroacústico es igual a la ganancia de *loop* media del sistema. Esto es, la curva de decaimiento energético (*decay*) del sonido en la sala consiste en dos decaimientos (el de la sala y el del reverberador) cuyas amplitudes y tiempos de reverberación son gobernados por la sala física, los procesos de reverberación del VRAS y por la ganancia del *loop*. Al igual que sucede en las salas acopladas de manera pasiva, si el acoplamiento (la ganancia del *loop*) es pequeño y el tiempo de reverberación del reverberador VRAS es grande comparado con el de la sala, puede darse un *decay* con doble pendiente (figura 12).

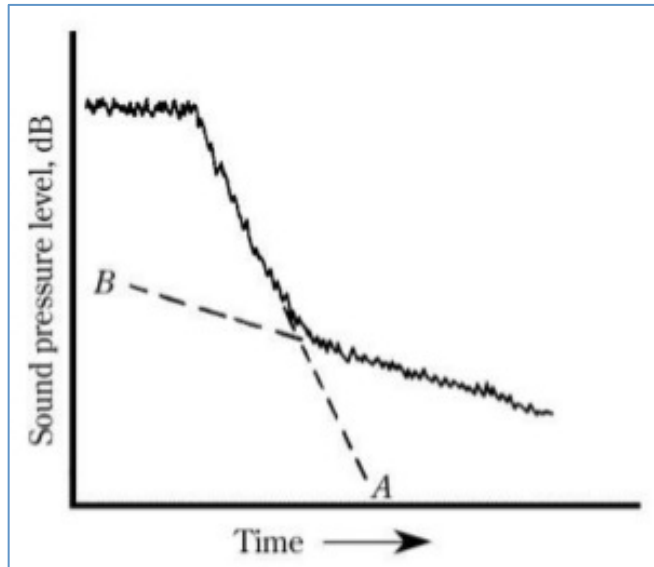


Figura 12. Curva de decaimiento energético con doble pendiente (A y B) debida al acoplamiento de espacios acústicos.

El sistema puede operarse en esta región si así se desea para, por ejemplo, mantener una mayor claridad (con una reverberación más baja) mientras se siguen produciendo *decays* largos. Normalmente el sistema se opera fuera de la región de doble pendiente, obteniendo altas ganancias de reverberación fácilmente.

Los micrófonos del sistema de reverberación VRAS se posicionan a una distancia mayor que el radio de reverberación (distancia crítica) de cualquier fuente, donde el nivel reverberante excede el nivel de sonido directo.

El sistema VRA se utiliza también como sistema en línea para proporcionar reflexiones tempranas, pero operando únicamente como una matriz de *delays*, sin generar reverberación. En esta funcionalidad el sistema usa un número dado de micrófonos direccionales cubriendo el área escénica de manera uniforme. Estas señales son enviadas a la matriz de *delays*, que al tener propiedad unitaria, maximiza la estabilidad sin requerir variación temporal y proporciona un gran número de reflexiones (M. Poletti n.d.).

## 4.2 COMPONENTES

El sistema *Constellation* es una solución integral que incluye todos los componentes necesarios para su funcionamiento: micrófonos, altavoces, procesamiento digital y software dedicado.

### 4.2.1 ALTAVOCES

Reproducir de manera efectiva las características de un espacio acústico natural requiere de altavoces de una linealidad y consistencia extraordinarias. Todos los altavoces de Meyer Sound son autoamplificados y cumplen estos requerimientos. Normalmente los altavoces usados en *Constellation* son los modelos más compactos, que cuentan con la posibilidad de utilizar fuentes de alimentación remota, situada en las salas de control.



Figura 13. Algunos modelos de altavoces Meyer Sound utilizados para *Constellation*.

El sistema *Constellation* incluye tanto altavoces de rango completo como subgraves para extender el rango de frecuencias.

El sistema de escenario incluye un número de altavoces laterales y *overhead* (por encima de la cabeza) situados en el escenario. El sistema de sala incluye un número de altavoces laterales y *overhead* situados en las paredes y en el techo de la sala, incluyendo las áreas bajo balcón. Ambos sistemas incluyen subgraves.

#### 4.2.2 MICRÓFONOS

Hay 4 modelos de micrófonos que pueden ser utilizados en un sistema *Constellation*: un modelo cardioide miniatura, un modelo cardioide compacto, un modelo omnidireccional miniatura y un modelo omnidireccional de superficie. Las figuras siguientes ilustran estos modelos.



Figura 14. Micrófono cardioide miniatura.



Figura 15. Micrófono cardioide compacto.



Figura 16. Micrófono omnidireccional miniatura.



Figura 17. Micrófono omnidireccional de superficie.

El sistema de escenario incluye un número de micrófonos situados sobre el área escénica, normalmente dieciséis. El sistema de sala incluye un número de micrófonos situados por toda la sala, normalmente dieciséis por zona. Dependiendo de las características arquitectónicas, si hay balcones es posible que el diseño incluya micrófonos también en estas áreas.

#### 4.2.3 PLATAFORMA DE AUDIO DIGITAL D-MITRI

*D-Mitri* es la plataforma de audio digital de Meyer Sound utilizada para mezcla, reproducción, distribución multicanal, control de eventos en vivo y acústica activa. Consiste en una serie de módulos de hardware que pueden ser usados para diseñar sistemas de audio para un amplio rango de aplicaciones.

Es un sistema modular basado en red Ethernet que abarca toda la cadena de audio desde la entrada de micrófono hasta la salida del altavoz. *D-Mitri* integra refuerzo de sonido, grabación y reproducción simultáneas, matriz de mezcla,

procesamiento de señal digital, panoramización surround multicanal y automatización de control de espectáculos en un entorno unificado y programable.

Se puede acceder a todas las funciones de *D-Mitri* y automatizar por completo el funcionamiento del sistema desde el software de control *CueStation*, además de compartir el control entre múltiples usuarios. Es posible personalizar aún más la interacción con el sistema utilizando scripts basados en *Python*.

Los sistemas *D-Mitri* son escalables. Sus propiedades incluyen:

- Funciones de grabador de disco duro, mezclador digital, patchbay digital, ecualizador, dinámica y unidades de efectos de reverberación, dispositivos de sincronización, sistema de distribución multicanal y control remoto en un sistema integrado totalmente automatizable.

- Preamplificación, conversión y procesamiento de alta calidad, con soporte para audio de 96 kHz / 24 bits y procesamiento interno de 64 bits.

- Hasta 288 entradas, salidas y buses internos para entornos sonoros inmersivos, procesamiento surround complejo y control de los sistemas *Constellation*.

- La infraestructura de red de *D-Mitri* y el soporte para sincronización y protocolos de control estándar permite construir sistemas centralizados o distribuidos que pueden controlar y recibir comandos de una variedad de equipos externos.

- Se puede controlar desde una página web local, con comandos de texto ASCII, usando *Open Sound Control (OSC)* o con el software de control *CueStation*.

- Permite la redundancia total de los componentes del sistema y las conexiones de red.

Los módulos de procesamiento proporcionan el procesamiento de audio, las funciones de enrutamiento de señal, las conexiones de red, el control del usuario y la matriz de mezcla necesaria para un sistema *D-Mitri*. Hay módulos de procesamiento especializados disponibles para las funciones de grabación y reproducción del disco duro, y todo el procesamiento requerido para la arquitectura electroacústica VRAS utilizada en los sistemas *Constellation*. Cada módulo de procesamiento tiene múltiples conexiones de red redundantes incorporadas.

Los diferentes módulos de entrada y salida incluyen preamplificadores de micrófono con ganancia digital y alimentación *phantom*, conversión A / D / A de alta resolución, escala de nivel de salida conmutable, múltiples formatos de entrada y salida de audio digital con conversión de frecuencia de muestreo. Además de las conexiones de audio analógico y digital, algunos módulos emplean conexiones para SMPTE, MIDI Show Control o Word Clock. Cada módulo tiene una conexión de red redundante incorporada. A continuación se muestra un ejemplo de conexionado con módulos *D-Mitri* de un sistema *Constellation*.

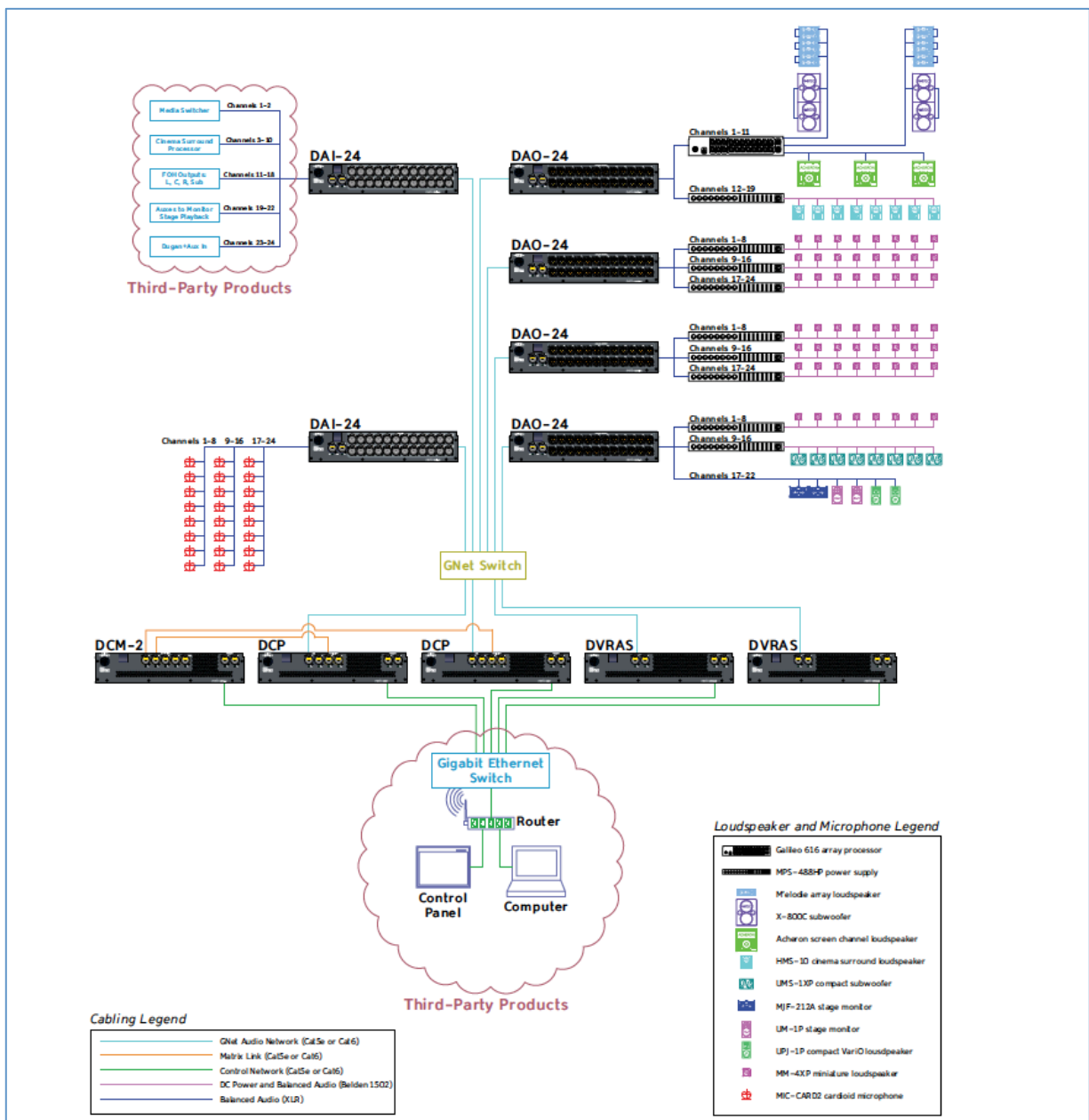


Figura 18. Ejemplo de conexionado de un sistema *Constellation*.



#### 4.2.4 SOFTWARE DE CONTROL CUESTATION

*CueStation* es la interfaz de software para el sistema de audio *D-Mitri*. Ofrece una interfaz gráfica de usuario que emula una consola de mezclas analógica y la combina con un sistema de automatización que está diseñado para integrarse fácilmente en el control de espectáculos y el sonido inmersivo. *CueStation* distribuye las funciones de la consola entre una colección de ventanas funcionalmente específicas.

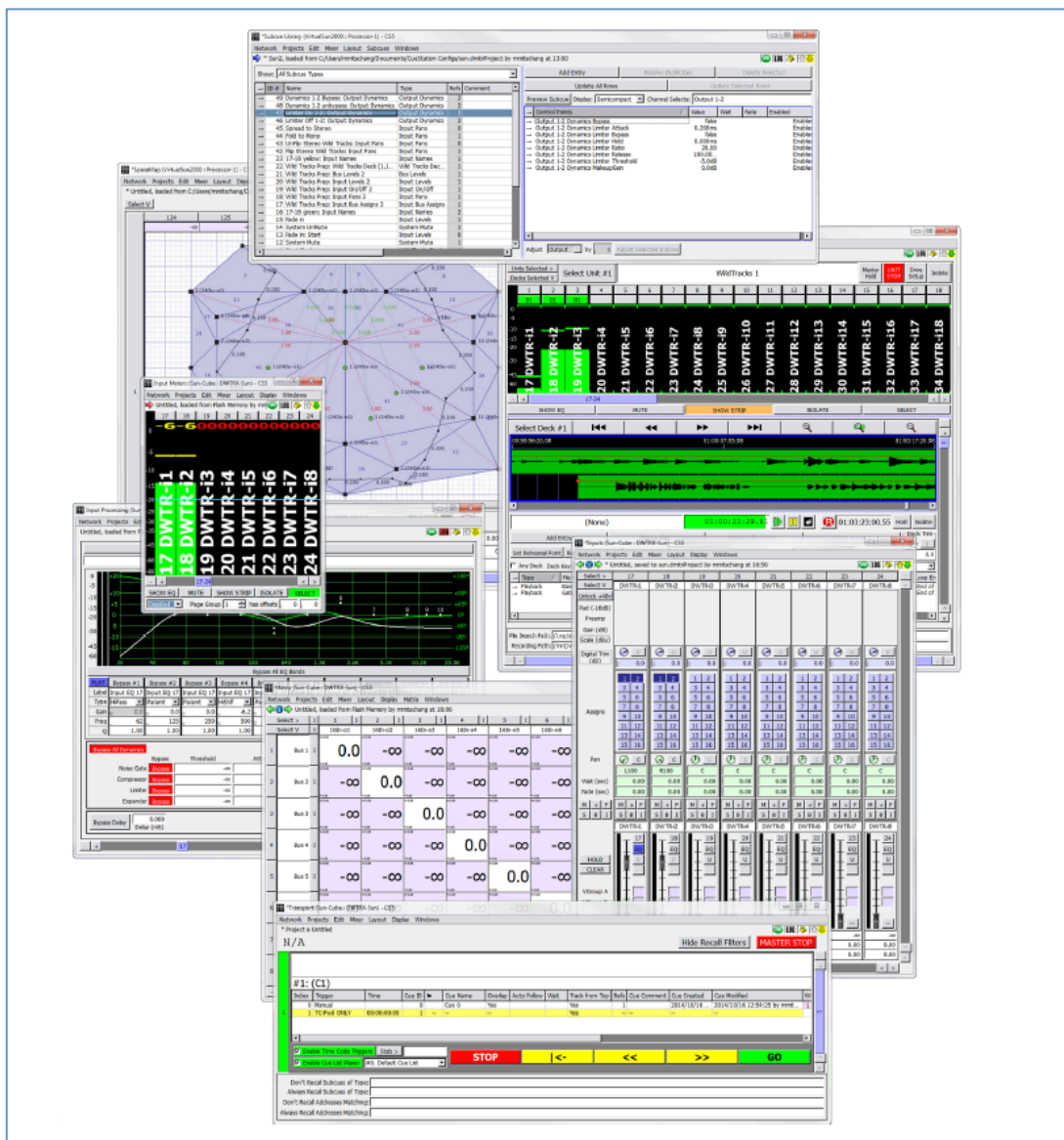


Figura 19. Software *CueStation* de Meyer Sound.

### 4.3 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

El sistema de acústica variable *Constellation* aumenta el tiempo de reverberación de una sala sin modificar otras características acústicas del recinto, regenera la propia acústica natural de la sala. Como consecuencia, la calidad resultante del sistema *Constellation* depende de la calidad de la acústica natural del espacio, y por lo tanto, no “arregla” una acústica de sala deficiente. Si la sala presenta anomalías acústicas, bien en tiempo y/o en frecuencia (eco flotante, focalizaciones, modos propios, resonancias ...) el sistema de acústica variable no los hace desaparecer, aunque en ocasiones pueda ayudar a enmascararlos debido a su propio funcionamiento (por ejemplo la desfocalización del sonido; las reflexiones proceden de múltiples altavoces distribuidos por toda la sala, lo que ayuda a suavizar algunos de los fenómenos mencionados anteriormente).

Por ello, es necesario que la acústica natural de la sala sea estudiada y diseñada por profesionales en la materia, al igual que sería necesario en una sala sin un sistema de acústica activa, para asegurar una acústica natural de calidad y sin anomalías temporales y/o frecuenciales. La diferencia en el diseño estriba en la necesidad de un tiempo de reverberación considerablemente bajo en la sala que disponga de sistema de acústica activa.

No obstante, cabe mencionar que el sistema proporciona múltiples herramientas que permiten modificar el color tonal, timbre, calidez, brillo y demás características relacionadas con el contenido frecuencial del sonido si así se desea. La modificación de estos parámetros tiene lugar en la última fase de ajuste del sistema, el llamado ‘voicing’, que se explica en las siguientes páginas.

### 4.4 REQUISITOS ADICIONALES DEL SISTEMA

*Constellation* controla el tiempo y el nivel al que se agrega el sonido a una sala, no puede cancelar el sonido ni reducir la reverberación. Si el ruido de fondo o el tiempo de reverberación de la sala física es demasiado alto, se reducirá el beneficio del sistema. Cuanto menor sea el tiempo de reverberación física, mayor será la variedad de tipos de eventos que el sistema puede acomodar. Un tiempo de reverberación física

apropiado para cine permitirá que el sistema Constellation acomode el mayor rango de tipos de eventos.

Los sistemas de *Constellation* para música requieren que el ruido de fondo medido sea menor que NCB 35 (curvas *Balanced Noise Criteria* o criterio balanceado de ruido)<sup>15</sup>; en salas de nueva construcción el ruido de fondo objetivo debe ser inferior a NCB 30. Se recomienda que el ruido de fondo no contenga ruidos, tonos, silbidos ni vibraciones.

## 5. DESARROLLO

En los próximos apartados veremos las características de la sala, del sistema *Constellation* instalado en ella y la exposición de los resultados de las mediciones.

### 5.1 LA SALA: USOS Y CONFIGURACIONES

El sistema Constellation a medir está instalado en la sala *King Kultur & Congress*<sup>16</sup> situada en Ingelheim am Rhein, Alemania. Se trata de una sala multipropósito con una geometría de base rectangular, balcones laterales y grada de asientos configurables. El recinto mide 30'5m de largo x 18m de ancho x 11m de alto, incluyendo la parte de escenario que ocupa 8'5m de largo. El volumen de la sala es de aproximadamente 5300m<sup>3</sup>, y el tiempo de reverberación natural en la banda de medios es de 0'89 segundos.

Aunque la sala dispone de multitud de configuraciones de asientos distintas para los diferentes tipos de eventos que se llevan a cabo, aquí mostraremos las mediciones para los eventos con la configuración de asientos en grada. Las siguientes fotos muestran la sala con esta configuración:

---

<sup>15</sup> Curvas de criterio para la evaluación de la calidad acústica de recintos cerrados definidas por el estándar ANSI 12.2. **Las curvas NCB** son una versión modificada de las curvas NC, ya que ha sido aumentada la zona de las bajas frecuencias con el fin de incluir las frecuencias de 16 y 31.5 Hz. Este criterio involucra el nivel de interferencia del habla (sil) por su abreviatura en inglés (*Speech Interference Level*) que es la medida del nivel de presión acústica en el intervalo de frecuencia de la voz y a su vez propone un balance percibido entre sonidos de baja frecuencia (rumble) y de alta frecuencia (hiss) (García 2016).

<sup>16</sup> <http://www.king-ingelheim.de/>





Figura 20. Configuración de asientos en grada.



Figura 21. Configuración de asientos en grada. Vista desde la parte trasera de la sala.





Figura 22. Configuración de asientos en grada. Vista desde el balcón lateral.

Con la configuración de asientos en grada los tipos de evento que pueden tener lugar y para los que el sistema ha de adaptar el tiempo de reverberación son: teatro musical, música de cámara, música sinfónica, ópera y música coral.

## 5.2 DISEÑO DEL SISTEMA

El diseño del sistema *Constellation* parte del tiempo de reverberación medio natural de la sala, en este caso 0'89 segundos, y ha de alcanzar valores de  $RT_{mid}$  óptimos para música coral (entre 2'1 y 4'2 segundos).

El sistema consta de 3 zonas (tres procesadores VRAS). El sistema de escenario usa dos procesadores VRAS, uno para reflexiones tempranas (ER) y otro para reverberación. El sistema de sala usa un procesador VRAS para reverberación.

El procesador de ER en el escenario se utiliza para proporcionar reflexiones tempranas, mejorar el conjunto musical y aumentar la inteligibilidad. Además, las señales de ER se alinean en el tiempo y se envían a los altavoces de la sala para mejorar la sensación de conexión de la audiencia con los intérpretes. El procesador de reverberación produce reverberación que es enviada a los altavoces de escenario para

los intérpretes. Ambos procesadores VRAS procesan señales provenientes de los (16) micrófonos cardioides situados sobre el escenario. Las señales de ER y de reverberación se envían a los intérpretes a través de (20) altavoces UPM-1XP montados directamente sobre el escenario, junto con (16) altavoces UPM-1XP montados lateralmente.

La reverberación de baja frecuencia se reproduce en el escenario mediante (6) subwoofers MM-10XP montados horizontalmente en las paredes laterales del escenario.

En esta sala se utilizan materiales acústicamente transparentes para ocultar los altavoces laterales en el escenario.



Figura 23. Vista de planta del sistema de escenario.

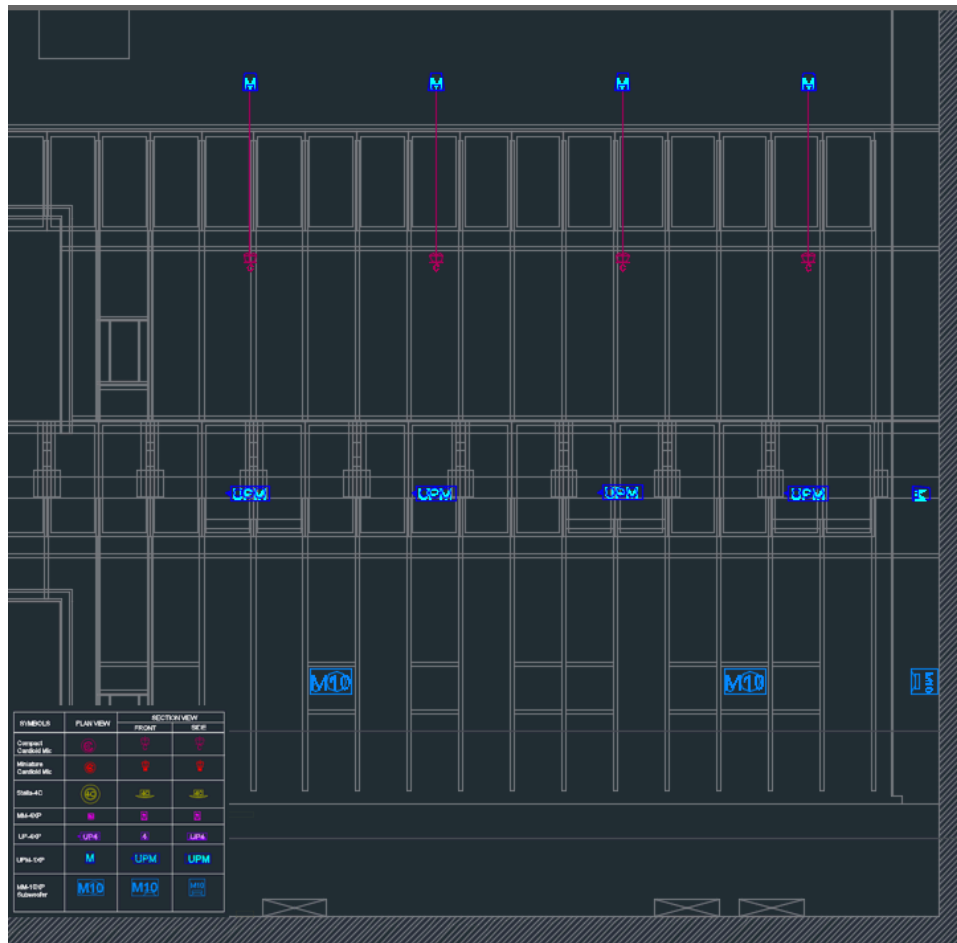


Figura 24. Vista de sección del sistema de escenario.

La zona de reverberación de la sala abarca toda la sala (incluyendo los balcones) excepto el escenario. La entrada de señal en esta zona es proporcionada por (16) micrófonos cardioides miniatura distribuidos en el techo. Esta zona incluye (21) altavoces UP-4XP montados en el techo sobre el área central de asientos y (24) altavoces Stella-4C en el techo de los balcones para proporcionar reflexiones tempranas y reverberación a los oyentes sentados debajo. Las reflexiones tempranas y la reverberación lateral y posterior es proporcionada por (76) altavoces MM-4XP situados alrededor de la sala en las paredes laterales.

Para extender la reverberación natural de la sala en las frecuencias más bajas se incluyen (18) subwoofers MM-10XP montados horizontalmente en el techo de la sala y del área de balcones.

En esta sala se utilizan materiales acústicamente transparentes para ocultar los altavoces laterales en la parte inferior de la sala.

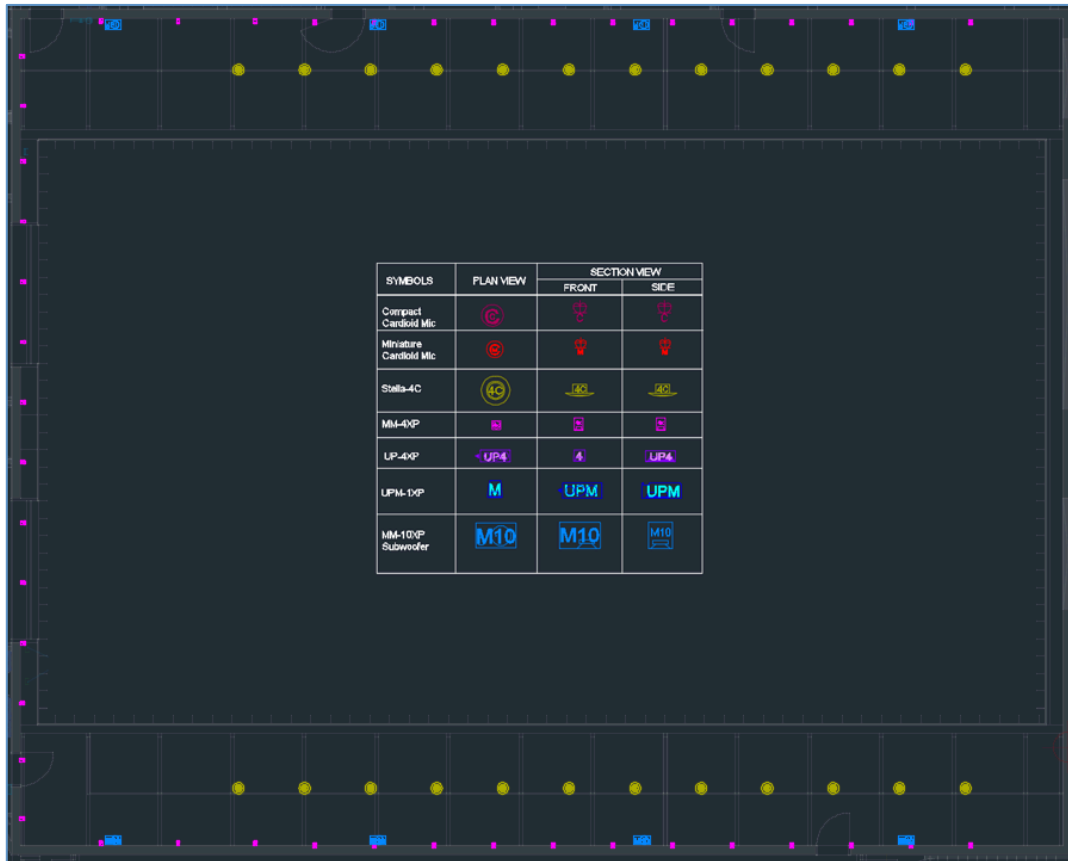


Figura 25. Vista de planta de los altavoces laterales y de techo en los balcones del sistema de sala.

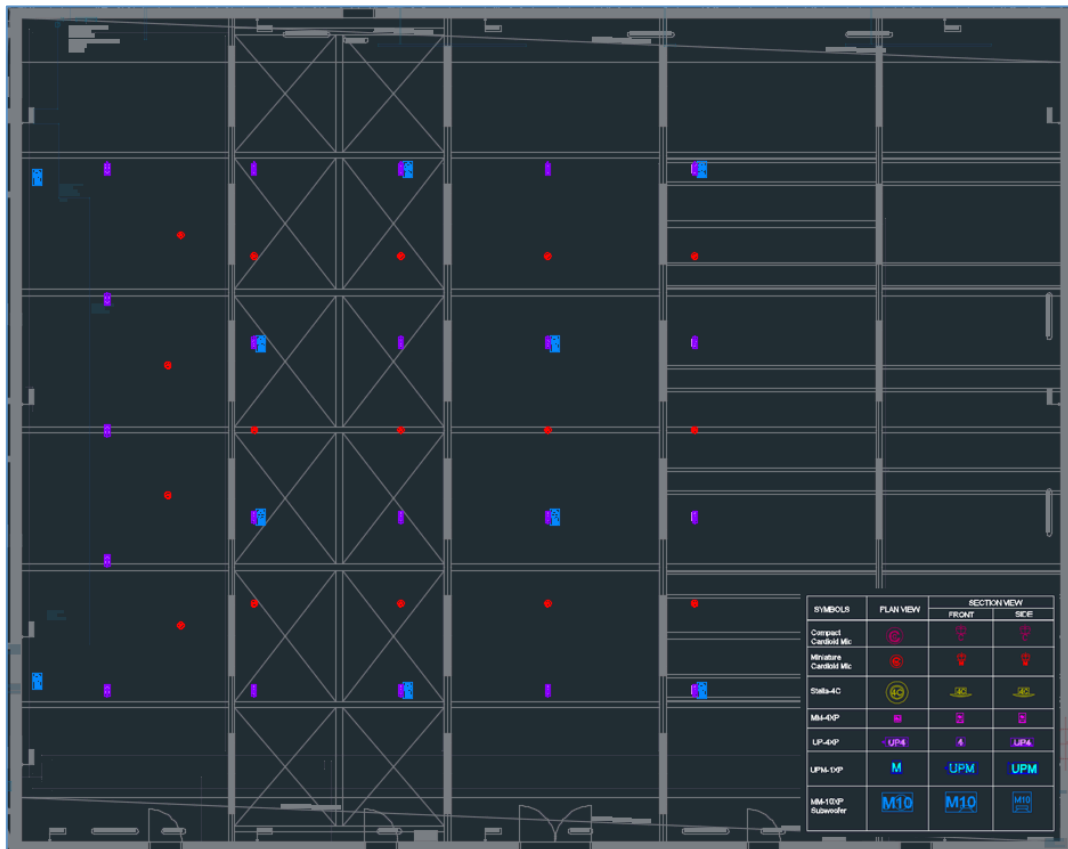


Figura 26. Vista de planta de los altavoces de techo y micrófonos del sistema de sala.





### 5.3.2 PRE-PROGRAMACIÓN Y CALIBRACIÓN

La segunda fase es la de pre-programación y calibración del sistema. El análisis de los datos recogidos en las mediciones de la fase anterior determina la pre-programación del sistema, que es llevada a cabo *off-site* por el personal especializado que se encargará después de la calibración del sistema. La pre-programación también se determina en base al uso que se va a hacer del sistema. El proceso de calibrado se lleva a cabo *in-situ*, y es un proceso propietario y protegido por el secreto de marca en el que no se permite la presencia de personas externas a la compañía.

Al finalizar esta etapa el sistema está completamente operativo en las diferentes configuraciones determinadas con anterioridad en base a las necesidades de la sala. Los tiempos de reverberación para los distintos *presets* o configuraciones se determinan de manera aproximada y se deja el sistema preparado para la fase de *voicing* o ajuste final.

### 5.3.3 VOICING O AJUSTE FINAL

Esta fase también la lleva a cabo personal de Meyer Sound Labs, Inc. altamente especializado, pero se requiere la presencia del usuario final y de los responsables de la sala/proyecto para personalizar las distintas configuraciones. Es en esta etapa donde se llevan a cabo los ajustes finales de tiempo de reverberación y los ajustes subjetivos, que pueden incluir, entre otros, el balance entre energía temprana y tardía, la ganancia del sistema, la calidez o el brillo. Es necesaria la participación de músicos y/o actores para poder escuchar el sistema en las condiciones óptimas de funcionamiento en cada una de las distintas configuraciones.

Por lo general, tras esta última fase el sistema está completamente calibrado y ajustado para su uso final. No obstante, una vez el sistema ha estado en uso durante un tiempo se realiza una visita de seguimiento para realizar pequeños retoques en base a la experiencia del usuario.

## 6. RESULTADOS

Los resultados mostrados a continuación hacen referencia a los parámetros de RT básicos para cada configuración en la fase de calibración del sistema, antes del ajuste final y con la sala vacía de audiencia. Estos resultados no representan las configuraciones finales, que se determinarán en la siguiente fase de *voicing*, sino la base sobre la que se realizarán las mismas y que se modificarán de acuerdo a ajustes artísticos y/o subjetivos. Es por este motivo por el cual se analizan en este trabajo los resultados obtenidos en la fase de calibración midiendo un parámetro objetivo como el incremento en el tiempo de reverberación. Los resultados obtenidos en esta fase son preliminares y susceptibles de modificación en la siguiente fase.

Se compararán los RT obtenidos con los óptimos para cada tipo de evento y se calculará el umbral diferencial (JND o *just noticeable difference*) para determinar si será necesario ajustar el RT obtenido en esta fase en la fase de ajuste final.

El umbral diferencial o *just noticeable difference* en el campo de la acústica arquitectónica se refiere a la mínima variación en el valor de un parámetro acústico que es perceptible por el oyente. La norma ISO 3382-1 establece que el JND para el tiempo de reverberación es del 5%.

Todas las mediciones se han llevado a cabo con la sala vacía, mientras que los valores RT óptimos proporcionados en la literatura se refieren a salas ocupadas. La absorción producida por el público en una sala puede ser notoria, pero no es el objetivo de este trabajo cuantificar su valor, por lo que no se tendrá en cuenta para determinar la validez de los RT de las distintas configuraciones.

Las mediciones se han llevado a cabo utilizando los micrófonos y altavoces del propio sistema. La fuente acústica utilizada es un altavoz UPM-1XP situado en la pared trasera del escenario, cuya una respuesta de frecuencia es de 80 Hz a 16 KHz  $\pm 4$  dB<sup>17</sup> y un patrón de cobertura de 100° vertical x 100° horizontal (Meyer Sound Laboratories, Inc. 2014). Se utiliza un barrido de frecuencia como señal acústica y cada medición se realiza 5 veces. El altavoz empleado para generar la señal acústica no reproduce

---

<sup>17</sup> En campo libre, medido a 4m con una resolución frecuencial de 1/3 de octava.

frecuencias por debajo de 80Hz y, por lo tanto, no puede excitar la sala en ese rango, por lo que no se muestran datos de tiempo de reverberación para la banda de 63 Hz.

A continuación se muestran las posiciones de los 6 micrófonos utilizados para la medición:

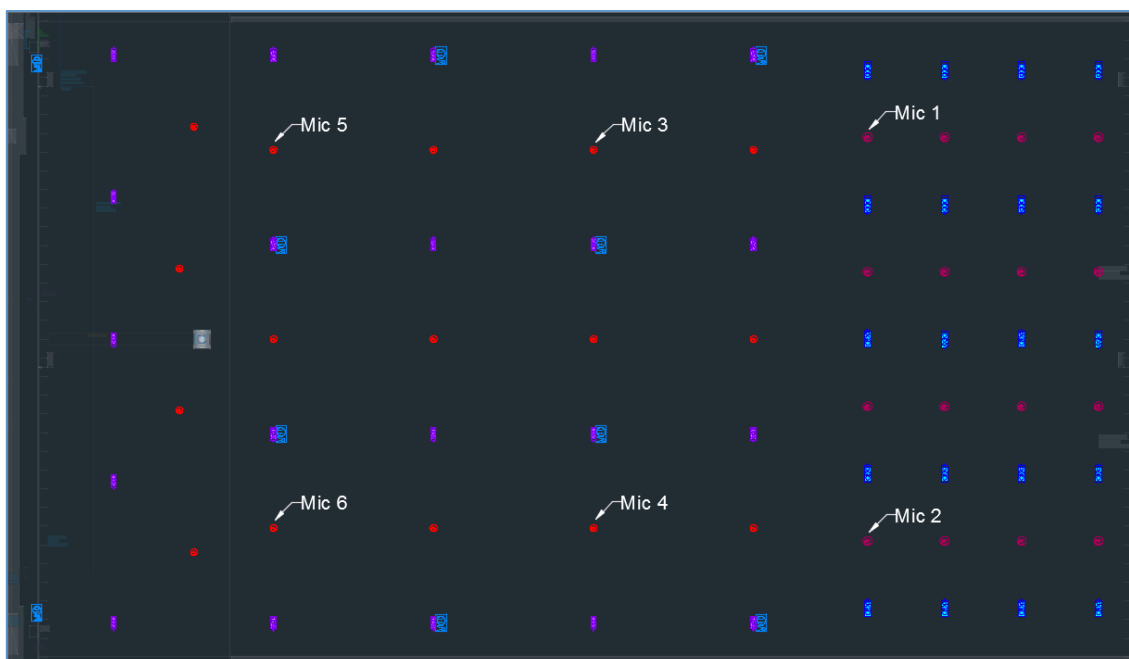


Figura 28. Micrófonos utilizados para la medición de los tiempos de reverberación.

Se han realizado mediciones del tiempo de reverberación de la sala para las siguientes configuraciones del sistema:

- Sistema apagado
- Teatro musical
- Música de cámara
- Ópera
- Música sinfónica
- Música coral

A continuación se muestran las gráficas de RT30 obtenidas para cada una de las configuraciones.

### 6.1 SISTEMA APAGADO

El RTmid con el sistema apagado es de 0'89 segundos.

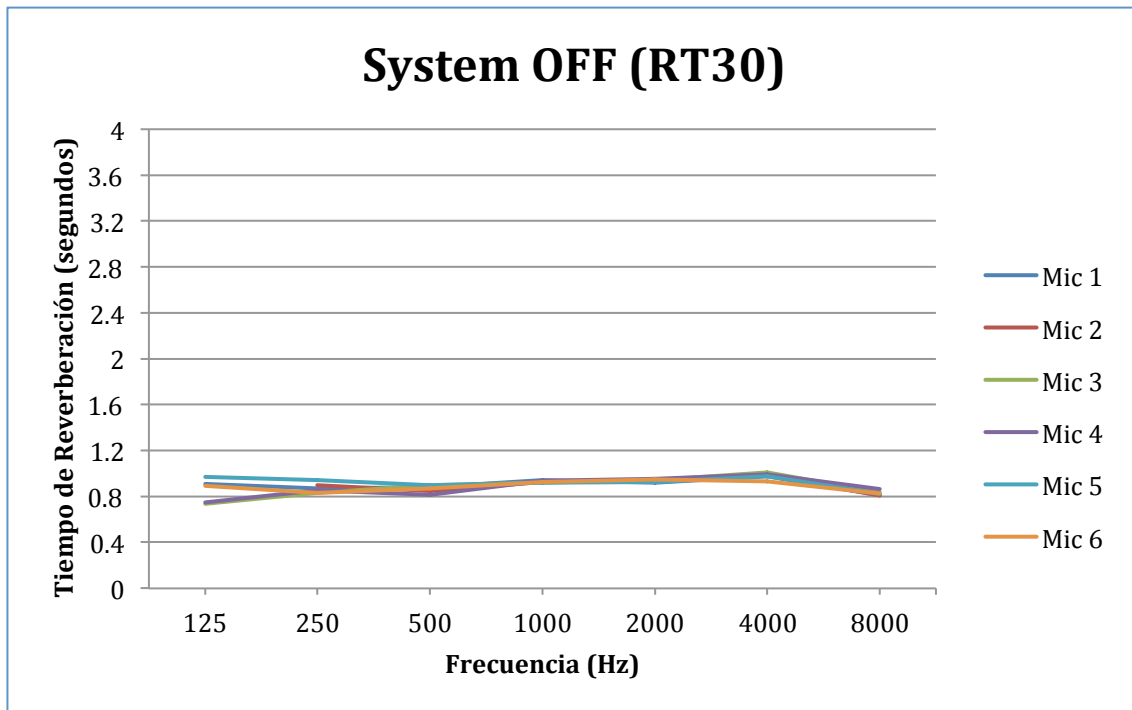


Figura 29. RT30 con el sistema apagado.

El tiempo de reverberación natural de la sala es óptimo para eventos teatrales en una sala de este volumen, que se establece en 0'8s para 5000m<sup>3</sup> o entre 0'7 ≤ RTmid ≤ 1'2s para salas de entre 100 y 10.000m<sup>3</sup> (Carrión Isbert 1998). La sala no presenta fenómenos acústicos extraños y la respuesta es relativamente uniforme en el eje frecuencial para los seis puntos de medición. A partir de este RT, el sistema de acústica activa *Constellation* proporcionará el incremento en tiempo de reverberación necesario para albergar los diferentes tipos de eventos musicales que tendrán lugar en la sala.

## 6.2 TEATRO MUSICAL

La configuración de teatro musical utiliza el sistema de PA (*public address*) para reproducir la música que acompaña a la representación, por lo que el tiempo de reverberación ha de ser adecuado para música amplificada. El RTmid óptimo para una sala de este tamaño para música amplificada es de 1'1 segundos. El sistema *Constellation* proporciona un RTmid de 1'18 segundos en esta configuración.

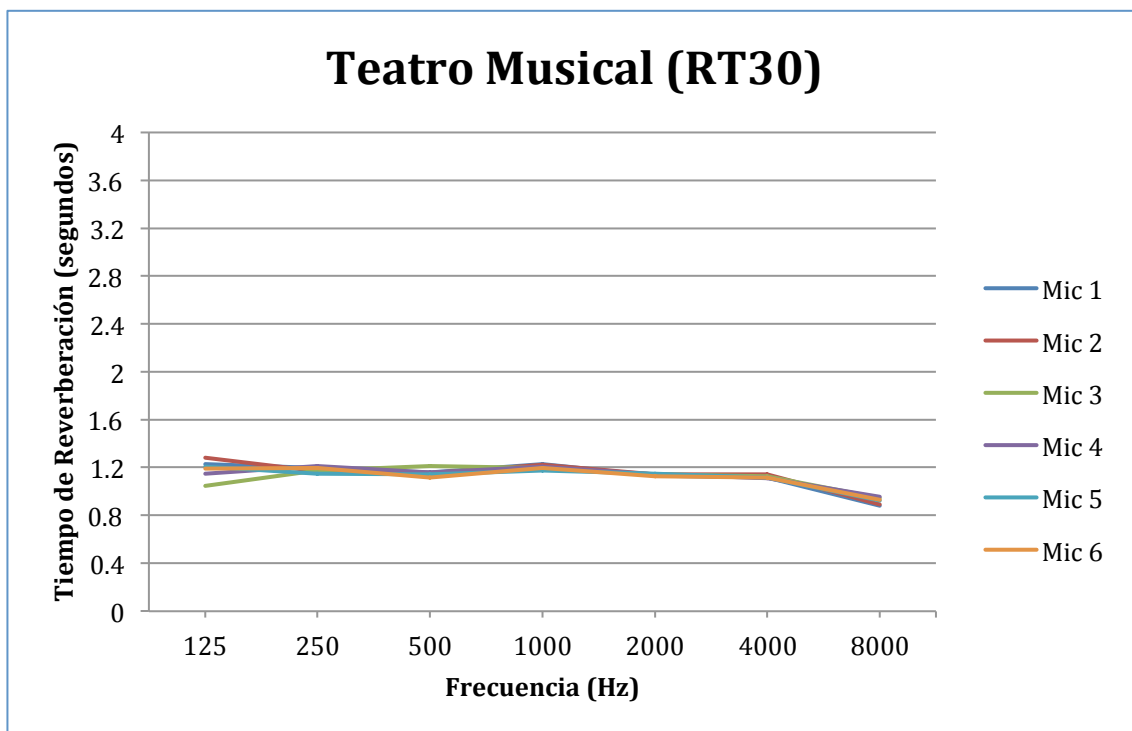


Figura 30. RT30 para la configuración de Teatro Musical.

El tiempo de reverberación obtenido está 0'08s por encima del considerado óptimo para eventos amplificados en una sala de este volumen. El umbral diferencial para el RT considerado óptimo, es decir, el mínimo cambio perceptible en el tiempo de reverberación para 1'18s es de 0'05s. Un aumento de 0'08s sería un incremento perceptible, por lo que se recomendaría ajustar mínimamente el RT en la siguiente fase para reducir el tiempo de reverberación en, al menos, 0'04s de modo que la diferencia en el tiempo de reverberación no fuera perceptible.

### 6.3 MÚSICA DE CÁMARA

La configuración de música de cámara requiere un RTmid de entre 1'4 y 1'7 segundos para una sala de este tamaño. El sistema *Constellation* proporciona un RTmid de 1'75 segundos.

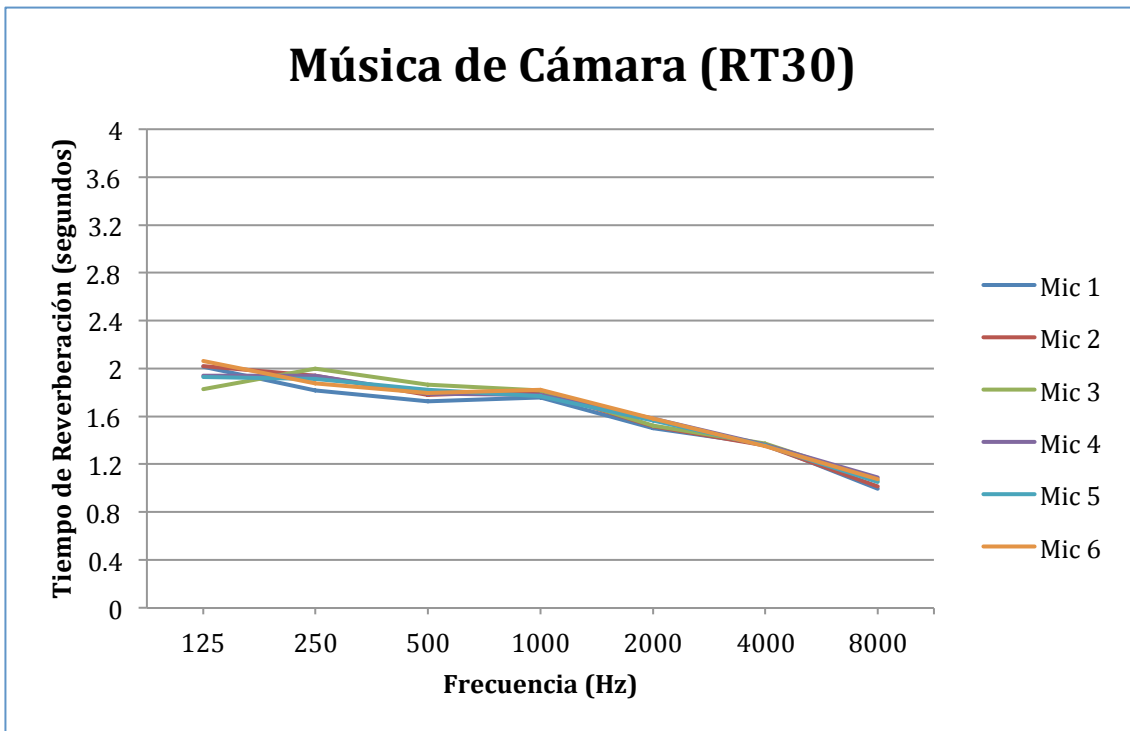


Figura 31. RT30 para la configuración de Música de Cámara.

El tiempo de reverberación está ligeramente por encima del límite superior del rango considerado como óptimo para música de cámara en una sala de este volumen. El JND para 1'7s es de 0'085s, por lo que un RT de 1'75s no se percibiría como diferente de un RT de 1'7s.

No sería necesario modificar el tiempo de reverberación para la configuración de música de cámara en la fase de ajuste final.

## 6.4 ÓPERA

La configuración de ópera requiere un RTmid de entre 1'3 y 1'8 segundos. El sistema Constellation proporciona un RTmid de 1'79 segundos.

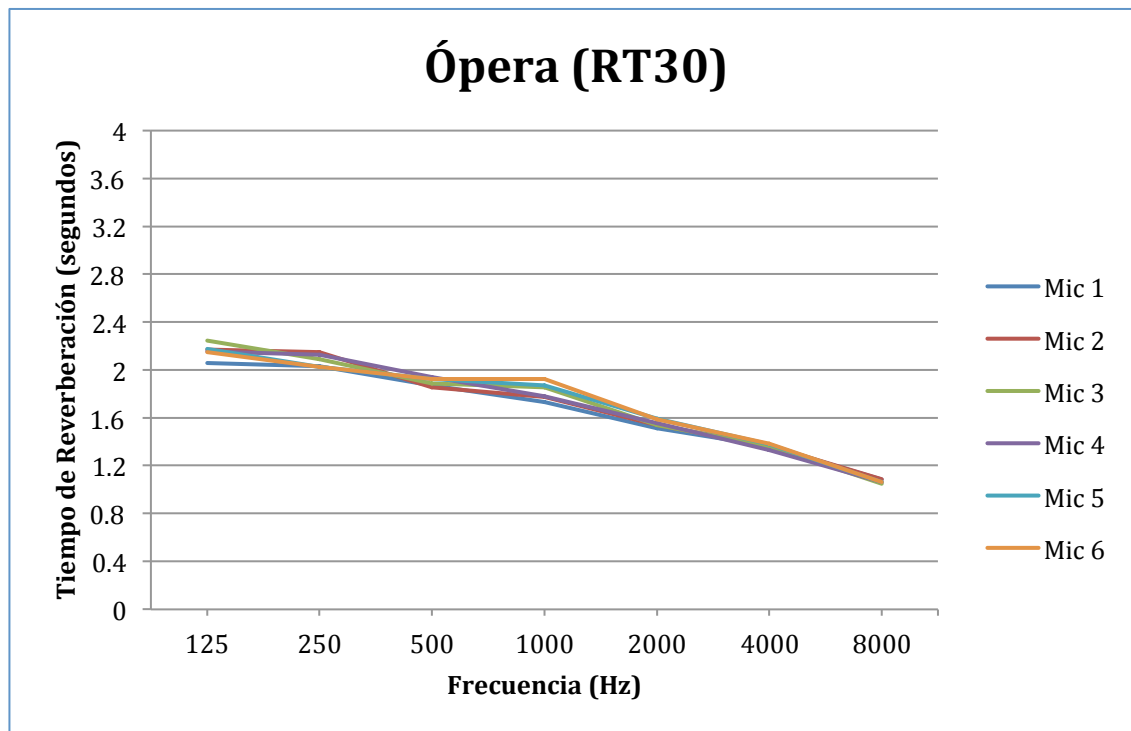


Figura 32. RT30 para la configuración de ópera

El tiempo de reverberación obtenido se encuentra muy próximo pero por debajo del límite superior del rango considerado óptimo para representaciones operísticas, por lo que no sería necesario modificar el tiempo de reverberación para la configuración de ópera en la fase de ajuste final.



## 6.5 MÚSICA SINFÓNICA

La configuración de música sinfónica requiere un RTmid de entre 1'8 y 2'2 segundos. El sistema Constellation proporciona un RTmid de 2'19 segundos.

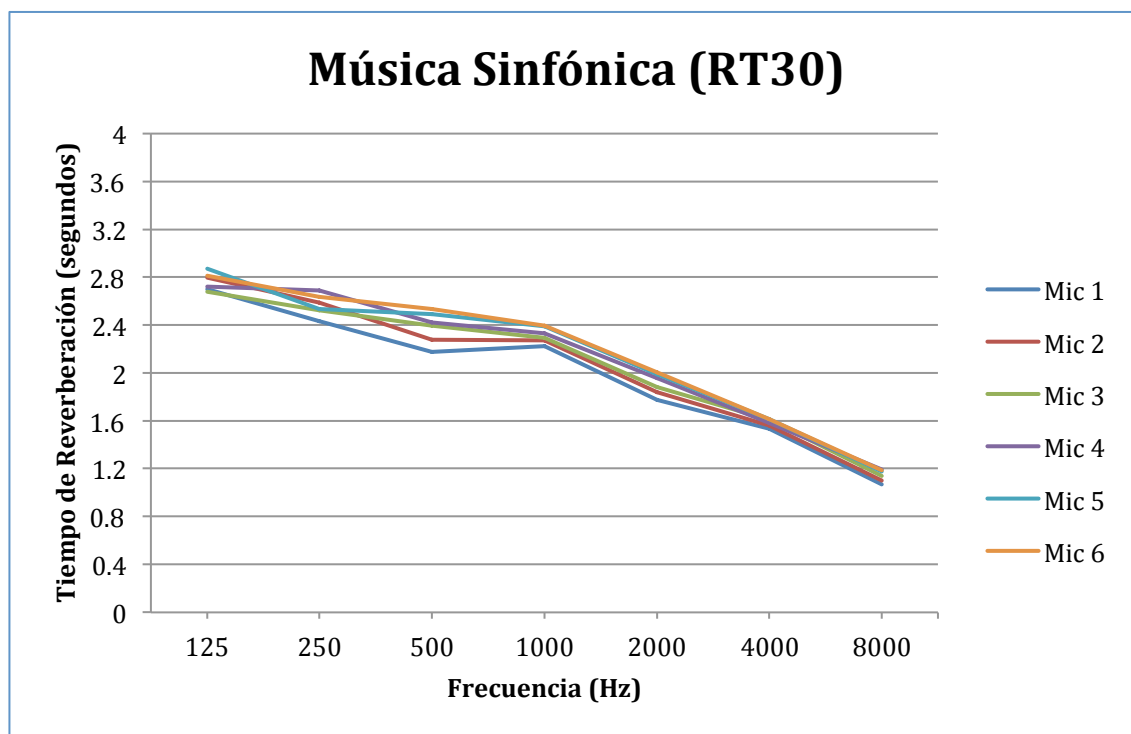


Figura 33. RT30 para la configuración de Música Sinfónica.

El tiempo de reverberación obtenido se encuentra, al igual que con la configuración anterior, muy próximo pero por debajo del límite superior del rango considerado óptimo para conciertos sinfónicos, por lo que no sería necesario modificar el tiempo de reverberación para esta configuración en la fase de ajuste final.

## 6.6 MÚSICA CORAL

La configuración de música coral requiere un RTmid de entre 2'1 y 4'2 segundos. El sistema Constellation proporciona un RTmid de 2'64 segundos.

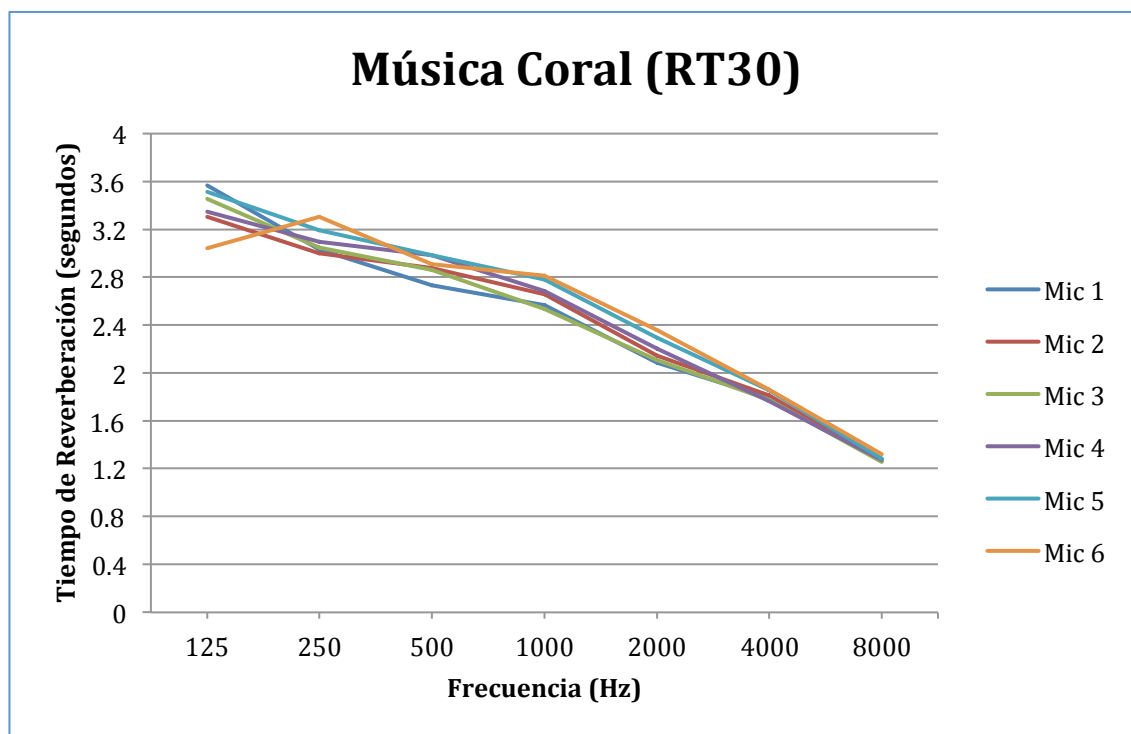


Figura 34. RT30 para la configuración de Música Coral.

El tiempo de reverberación obtenido está dentro del rango óptimo para música coral, aunque está más cercano al valor del límite inferior. No sería necesario modificar el tiempo de reverberación para esta configuración en la fase de ajuste final.

## 6.7 RESULTADOS GLOBALES

A continuación se muestra una gráfica con todos los tiempos de reverberación obtenidos:

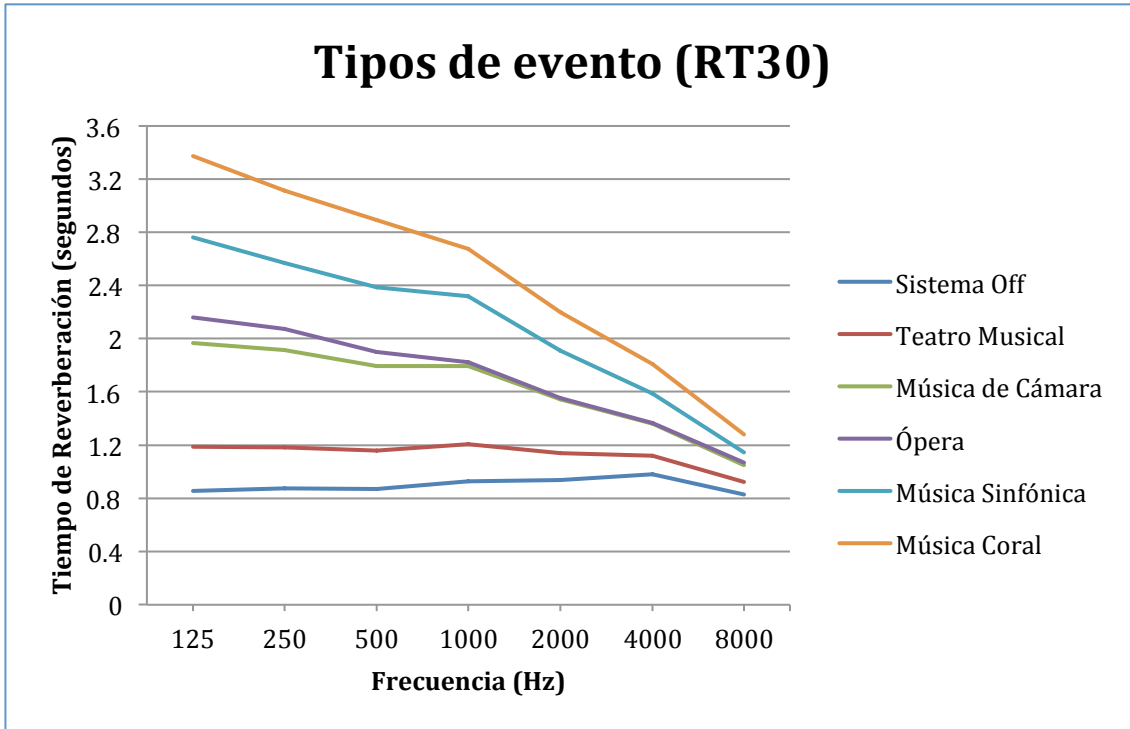


Figura 35. RT30 para todos los tipos de evento.

La gráfica muestra los tiempos de reverberación para todas las distintas configuraciones establecidas, poniendo de manifiesto la cantidad de eventos que pueden llevarse a cabo en esta sala con una acústica óptima para cada uno de ellos.

Como se comentó anteriormente, queda fuera del alcance de este trabajo analizar las posibilidades del sistema con respecto a la variación del color tonal, timbre, calidez, brillo y demás características relacionadas con el contenido frecuencial del sonido y que son también utilizadas para predecir la calidad subjetiva de la acústica de una sala.

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha presentado el funcionamiento del sistema de acústica variable activa *Constellation* de Meyer Sound Laboratories, Inc. y se ha estudiado la viabilidad del sistema para variar el tiempo de reverberación de una sala multipropósito con la finalidad de adaptarlo a distintos tipos de evento. Los resultados obtenidos muestran la capacidad del sistema para proporcionar resultados óptimos y su flexibilidad en adaptar el espacio acústico con una alta calidad.

Se ha visto que, además del tiempo de reverberación, hay otros parámetros relacionados con la curva energética de la sala que influyen en la percepción de calidad acústica. El estudio de la capacidad del sistema de acústica activa para variar y adaptar estos parámetros es una línea de trabajo futuro interesante para completar el estudio de este sistema en particular.

Asimismo, se ha mencionado que, para valorar la calidad subjetiva de un recinto, además de los parámetros acústicos relacionados con la energía temprana y tardía existen otros relacionados con el contenido frecuencial que también son susceptibles de ser modificados con el sistema *Constellation*. Sin duda sería investigación pertinente para trabajos futuros.

No obstante, los datos aquí presentados hacen referencia al funcionamiento de un solo sistema. Existen cientos de instalaciones de sistemas de acústica variable activa de diferentes compañías con procesamiento y metodologías diferentes para los que la literatura publicada es escasa. Ampliar las investigaciones en este campo sería un gran avance para el estudio de estos sistemas y mejoraría el conocimiento y comprensión existente al respecto incluso dentro del propio campo de la acústica.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

ACS. <https://www.acs.eu/acs/> (último acceso: 14 de Enero de 2018).

Bakker, R., y S. Gillan. «The History of Active Acoustic Enhancement Systems.» *Proceedings of the Institute of Acoustics*. Birmingham: Institute of Acoustics, 2014.

Barron, M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. London: E. and F. N. Spon, 1993.

Beranek, Leo. *Concert and Opera Halls. How they sound*. Nueva York: Acoustical Society of America, 1996.

Carrión Isbert, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Edicions UPC, 1998.

Ellison, Steve, y K Hoover. «Electronically variable room acoustics - motivations and challenges.» *ICA 2013*. Montreal: Acoustical Society of America, 2013.

Ellison, Steve, y Mark Poletti. «Control of Room Acoustic Parameters by the Variable Room Acoustics System.» *Reproduced Sound 20: Improving the Listening Experience*. Oxford: Institute of Acoustics, 2004.

Ellison, Steve, y Roger Schwenke. «The Case for Widely Variable Acoustics.» *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*. Melbourne: ISRA, 2010.

*Event Acoustics*. <http://www.eventacoustics.com/Variable-Acoustics-and-Sound-Effects.aspx> (último acceso: 14 de January de 2018).

García, Suzaflow. *Criterios de ruido*. 22 de Noviembre de 2016. <http://ruidoyvibracionesesimez.blogspot.com.es/2016/11/criterios-de-ruido.html> (último acceso: 20 de Enero de 2018).

Hardiman, A. «Electronic acoustic enhancement systems: Part one.» *Lighting and Sound America*, March 2009: 88-96.

Hardiman, A. «Electronic acoustic enhancement systems: Part two.» *Lighting and Sound America*, April 2009: 74-79.

ISO 3382 Acoustics. «Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance Spaces.» 2009.

Kinsler, Lawrence E., Austin R. Frey, Alan B. Coppens, y James V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. 4th. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.

Lares. <http://www.lares-lexicon.com/welcome.html> (último acceso: 10 de Enero de 2018).

Möller, Henrik, Anssi Ruusuvuori,, Olli Salmensaari, y Oskar Lindfors. «DESIGNING HALLS WITH VARIABLE ACOUSTICS.» *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting*. Reykjavik: Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, 2008.

Meyer Sound Laboratories, Inc. «Constellation brochure.» *Constellation*. Meyer Sound Laboratories, Inc., 2006.

Meyer Sound Laboratories, Inc. *UPM-1XP UltraCompact Wide-Coverage Loudspeaker Datasheet*. Berkeley, 2014.

Poletti, M. «The Philosophy of the Variable Room Acoustics System.» *AV INFO*. <http://bnoack.com/index.html?http&&bnoack.com/acoustic/enhancement-philosophy.html> (último acceso: 12 de Enero de 2018).

Poletti, M. A. *Active Acoustic Systems for the Control of Room Acoustics*. Melbourne,: Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA, 2010.

Poletti, Mark A. «The stability of multichannel sound systems with frequency shifting.» *Acoustical Society of America*, 2004: 853-871.

Poletti, Mark. «The Control of Early and Late Energy Using the Variable Room Acoustic System.» *Proceedings of ACOUSTICS 2006*. New Zealand: ACOUSTICS, 2006.

*SIAP Acoustic Systems*. <https://siap.nl/es/> (último acceso: 11 de Enero de 2018).

Stewart, Rebecca, y Mark Sandler. «Statistical Measures of Early Reflections of Room Impulse Responses.» *Proc. of the 10th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07)*. Bordeaux: Conference on Digital Audio Effects, 2007.

*Vivace.* <http://www.mbbm-aso.de/en/vivace/vivace-raumklang-reinvented/>  
(último acceso: 14 de Enero de 2018).

Wiener Hofburg Orchester. *Wiener Hofburg Orchester.*  
<http://www.hofburgorchester.at/index.php?id=9&folder=49&lang=en> (último acceso:  
23 de 12 de 2017).