



Capítulo 6

Acústica de salas para música. Parámetros acústicos físicos y rasgos perceptuales.

María Andrea Farina

Acústica de salas para música. Parámetros acústicos físicos y rasgos perceptuales.

María Andrea Farina

1. Introducción

Una sala para música queda definida por su calidad acústica, que se obtiene a partir de los juicios de valor estético emitidos por los espectadores en base a lo que oyen, sus expectativas musicales, sus gustos individuales y lo que han aprendido que es correcto para su época. Como toda evaluación perceptual, depende y está definida en gran parte por la cultura musical del grupo de sujetos consultados, que varía con el tiempo y el lugar que se tome en consideración. También puede variar de individuo a individuo. Es más, el mismo individuo puede modificar su evaluación de la calidad acústica del mismo espacio en diferentes momentos.

Por supuesto, la calidad acústica además depende del comportamiento físico de las ondas sonoras en el recinto. El gran tema del estudio científico de la acústica de salas es precisamente el vínculo -complejo, multidimensional y cambiante- entre los campos físicos y la percepción de esos mismos campos.

El primer intento histórico de relacionar un aspecto físico de un espacio con lo que se oye en su interior fue realizado por Wallace Sabine a fines del siglo XIX. Sabine definió el *Tiempo de Reverberación* como el tiempo, medido en segundos, que tarda el nivel de presión sonora en caer 60 dB -hasta que deja de oírse- a partir del momento en el que cesa la fuente de señal. Su cálculo vincula el tamaño del recinto y la cantidad de material acústico absorbente en su interior con una primera y sencilla concepción de calidad perceptual. Fue durante muchos años, y sigue siendo en parte, la principal variable a considerar en el proyecto acústico de una sala.

Otros aspectos físicos que definen la acústica de una sala son su tipología arquitectónica y el factor de escala. El comportamiento acústico de un espacio destinado a la música y, por lo tanto, su calidad sonora, quedan determinados en gran medida por el *Tiempo de Reverberación*, el tamaño y la forma.

Tiempo de Reverberación y programa musical

Cuando se interpreta música en un recinto queda de manifiesto un vínculo estrecho entre su arquitectura, su acústica y el estilo musical de la pieza de música que se va a interpretar, determinado por el tempo, la densidad cronométrica, la textura musical, la sonoridad y la formación instrumental.

Con relación a la calidad acústica, se han individualizado dos polos de preferencia por parte del público que se basan en la *Claridad* y en la *Plenitud de Sonido*. Algunos oyentes prefieren campos acústicos muy definidos y claros, en los que pueden oír cada sonido por separado, mientras que otros eligen sonoridades suntuosas y envolventes. No existe un campo acústico tal que sea considerado unívocamente bueno por la totalidad del público (Wilkins y Plenge, 1975).

A nivel perceptual, cuando un músico habla de *Claridad* o *Definición* hace referencia al grado en que los sonidos individuales se separan unos de otros en una representación musical. Podría definirse la *Claridad* de acuerdo al grado de separación de los sonidos entre sí en un fragmento musical o hablado. Otro concepto importante es la *Plenitud de Sonido* que generalmente se relaciona con la reverberación: si el valor del *Tiempo de Reverberación* es alto, mayor será la plenitud percibida del sonido.

En un sentido amplio, un fragmento musical podría tener gran *Claridad* si el valor de la reverberación fuese bajo. Del mismo modo, si el *Tiempo de Reverberación* fuese alto el mismo fragmento podría percibirse con una *Claridad* insuficiente. Ocurre lo mismo con el lenguaje hablado, cuanto menor es la reverberación mayor es la inteligibilidad -relacionada con la *Claridad*- y viceversa. Las posibles combinatorias se encuentran muy bien expresadas en los gráficos creados por Leo Beranek que se muestran en la figura 1.

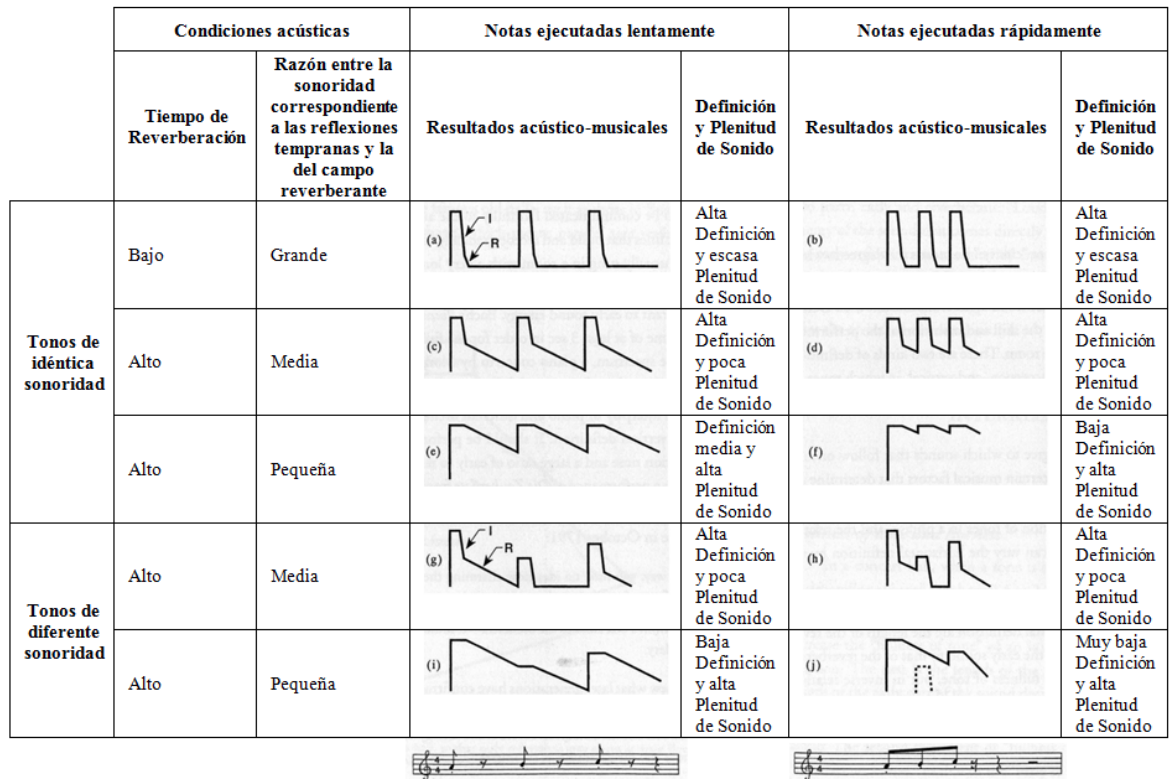


Figura 1. Relaciones entre tempo, Tiempo de Reverberación y Claridad. Extraído y traducido de Leo Beranek (1996). "Concert and opera halls. How they sound".

Si el *Tiempo de Reverberación* es bajo, la *Claridad* y la *Definición* serán altas, resultando escasa la *Plenitud de Sonido* -como se observa en los gráficos a y b de la figura 1-. En este caso la evolución temporal de cada una de las notas del ejemplo se distingue muy bien. En cambio, cuando la reverberación es alta, la *Claridad* y la *Definición* disminuyen y aumenta la *Plenitud de Sonido* -gráficos c y d de la figura-. La sección final del decaimiento de los sonidos se solapa, en estos casos, con la reverberación de la sala. El *Tiempo de Reverberación* queda directamente relacionado con el incremento, a nivel perceptual, de la *Plenitud de Sonido* de manera independiente al tempo de la obra.

En un tempo lento, si el *Tiempo de Reverberación* posee un valor grande y la *Claridad* es pequeña, disminuye la *Definición* y se mantiene alta la *Plenitud de Sonido*. Parte del ataque y el decaimiento de los sonidos quedan ocultos en la reverberación del recinto; las notas quedan ligadas, perdiéndose parte de su extinción natural. En un tempo rápido prácticamente se pierde la *Definición* y no queda posibilidad de percibir articulaciones de sonidos de corta duración,

por ejemplo, en *staccato* -gráficos e y f-.

Con *Tiempos de Reverberación* altos, si los sonidos poseen menor intensidad a medida que se suceden, la inteligibilidad del discurso disminuye y la *Claridad* y la *Definición* se reducen. Si, además, el tempo musical es rápido, todas las variables que permiten discriminar individualmente los sonidos se tornan más desfavorables -gráficos g, h, i y j-.

En resumen, la calidad con que un fragmento musical le llega al oyente depende tanto de factores musicales -como tempo, densidad cronométrica, habilidad e intención de los ejecutantes- como de la acústica particular de la sala.¹

Afortunadamente, los músicos pueden acomodar el tempo y la articulación de la interpretación a las características acústicas de las salas. Podemos citar un ejemplo histórico: la *Academia de Música* de Filadelfia, sala que posee un bajo *Tiempo de Reverberación*, fue hasta el año 2001 el lugar de residencia de la Orquesta de Filadelfia. Las mediciones acústicas realizadas en el año 1992, a sala ocupada, dieron el valor de 1,2 s para las frecuencias medias (Kirkegaard, 1992). Por su parte, el *Symphony Hall* de Boston posee un *Tiempo de Reverberación* de 1,85 s en el mismo rango de frecuencias (Hidaka/Beranek, 1992; Griesinger/Kirkegaard, 1993). Cuando la Orquesta Sinfónica de Boston tocaba en la *Academia de Música* sus integrantes interpretaban la música en un tempo de ejecución más rápido para acomodarse a las características del campo interior, menos reverberante, de la sala de Filadelfia. Los músicos de Filadelfia adoptaban la estrategia contraria al tocar en Boston, tocando las obras en un tempo más lento. Los músicos perciben las características acústicas del campo interior de una sala de manera inmediata y se adaptan a ella.

Algunos músicos muy experimentados, durante la prueba de sonido previa a un concierto, evalúan tempos y dinámicas muy contrastantes para testear la sala. Tocan lo más rápido y lo más lento posible para evaluar la respuesta acústica temporal y fuerzan los *pp* y *ff* hasta alcanzar la paleta dinámica apropiada. Respecto a la dinámica, en una sala con un bajo *Tiempo de Reverberación* no es posible desplegar un gran rango dinámico mientras que en una sala muy reverberante las posibilidades para que un músico disponga de un gran un rango entre un *pp* y un *ff* se maximizan.

En algunas épocas y estilos los compositores también tomaron en cuenta la acústica de las salas. Bach, en sus composiciones para órgano compuestas en

los períodos de Weimar (1708 – 1717) y Leipzig (1723 – 1750) incorpora la acústica de los templos en su música. Por ejemplo, la complejidad musical de las piezas compuestas en la Iglesia Luterana de Santo Tomás en Leipzig es muy grande y se adaptan a la perfección a su campo acústico. Si se interpretaran en una catedral católica, más reverberante, se perderían los detalles y la esencia estructural.

En la actualidad existen una gran cantidad de espacios donde se interpreta música. Estos lugares podrían dividirse en dos grandes grupos: los espacios proyectados específicamente para hacer música (los auditorios, los teatros de ópera, las salas para música de cámara) y, los lugares que son utilizados por los músicos pero que fueron concebidos inicialmente para otro uso, los que podríamos llamar “ambientes acústicos” (un espacio público abierto o cerrado, una plaza, una iglesia, un galpón, un estadio, un bar) -la música electroacústica, por ejemplo, muchas veces no está limitada a salas de música tradicionales donde se escucha de acuerdo a un estándar de calidad sonora y acústica-. Los espacios que conforman estos dos grupos se comportan de manera diferente; sin embargo, en la práctica musical actual se usan casi de manera indistinta.

En este capítulo se describirán los parámetros acústicos más importantes que se utilizan en el diseño y en el análisis de salas para música². Queda por explorar, en un próximo capítulo, si otros espacios -los ambientes acústicos- son susceptibles de ser analizados con algunos de estos parámetros.

2. Parámetros acústicos

En la actualidad existen una gran cantidad de parámetros que permiten caracterizar una sala para música y comprender, en parte, su funcionamiento. Estos parámetros se pueden dividir en geométricos y acústicos. Los parámetros acústicos, a su vez, pueden ser físicos o perceptuales. A partir del análisis de la documentación gráfica de la obra de arquitectura se obtienen los parámetros geométricos (forma de la sala, dimensiones -largo, ancho, alto-, volumen, superficies -características y distribución-, área del escenario, superficie ocupada por el público, capacidad).

En cuanto a los parámetros acústicos físicos, existe una gran cantidad que obliga a una selección que tenga en cuenta la descripción que cada uno pueda aportar y las posibilidades de aplicación de acuerdo al instrumental y la metodología

de medición propia de cada uno. Pueden clasificarse en los siguientes cuatro grupos³:

- **Parámetros temporales:** detallan el comportamiento de las señales acústicas en el tiempo. Por ejemplo, el *Tiempo de Reverberación* (TR, T₃₀) y la *Reverberación Temprana* (EDT).
- **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 espaciales:** describen la distribución de la energía acústica en el espacio. Por ejemplo, la *Fracción de Energía Lateral* (LF) y el *Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural* (IACC).
- **Razones de energía o cocientes energéticos:** comparan la energía de dos porciones de una señal acústica. Por ejemplo la *Claridad* (C₈₀, C₅₀), la *Definición* (D) y el *Centro del Tiempo* (T_s).

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. La correlación entre estos parámetros y los físicos es motivo de estudio y debate entre especialistas.

2.1. Parámetros acústicos físicos

Respuesta al impulso

El comportamiento de una sala frente a un estímulo sonoro -en forma de señal impulsiva- se denomina respuesta al impulso. Como un impulso posee la totalidad del espectro concentrado en un infinitésimo de tiempo, la respuesta contiene toda la información posible del recinto en una posición determinada. La respuesta al impulso obtenida en cada oído del oyente $f_i(t)$ y $f_d(t)$ es el resultado de la convolución (que se simboliza mediante *) entre la señal temporal emitida por la fuente acústica $p_n(t)$ y las funciones de transferencia que tipifican el recorrido total de ambas señales con sus reflexiones $g_i(t)$ y $g_d(t)$:

$$\underline{f}_d(t) = \underline{p}_n(t) * \underline{g}_d(t)$$

$$\underline{f}_i(t) = \underline{p}_n(t) * \underline{g}_i(t)$$

Que al presentarse de manera discreta:

$$g_{d,i}(t) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Señal directa} = A_0 w_0 (t - \Delta t_0) = \delta(t) \\ \text{Reflexiones} = A_n w_n (t - \Delta t_n) \\ \text{Respuesta al impulso de la cabeza} = h_{d,i}(t) \end{array} \right.$$

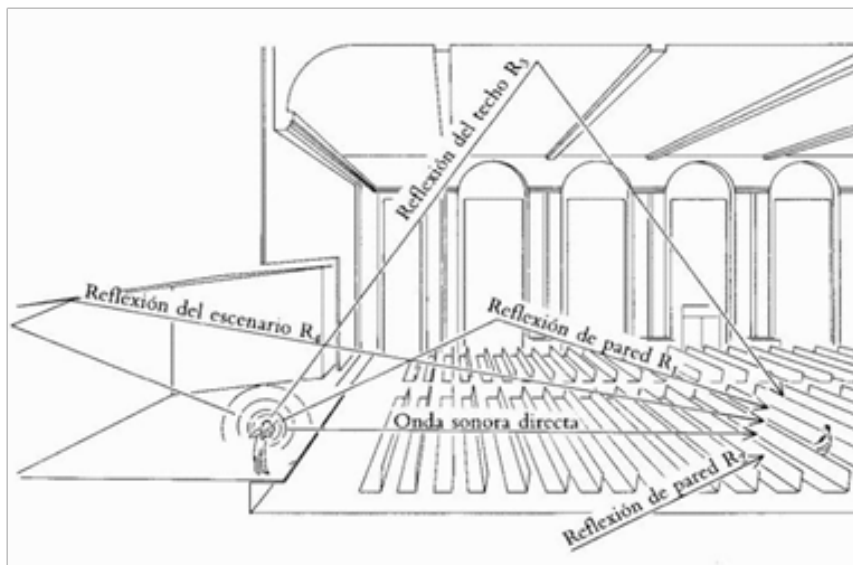


Figura 2. Esquema del patrón de reflexiones: señal directa y reflexiones. Extraído de John Pierce (1985). "Los sonidos de la música".

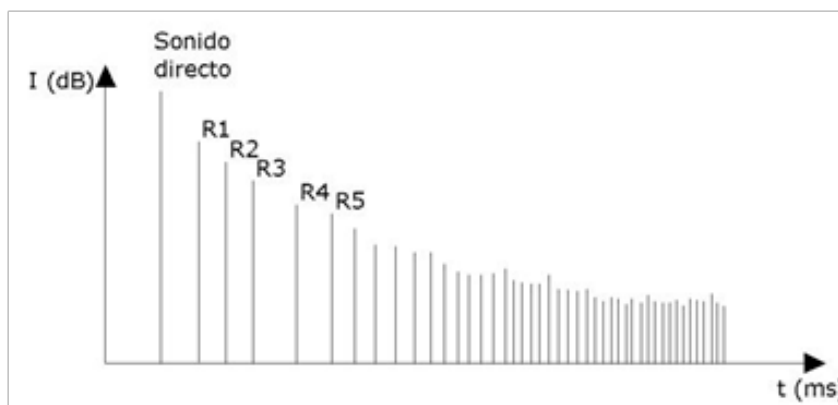


Figura 3. Reflectograma en un punto de una sala: la señal directa arriba al oyente en t_0 y cada una de las reflexiones llegan en t_n y con intensidad w_n .

Si se suman todas las reflexiones, la respuesta al impulso se convierte en la suma de las respuestas individuales de cada reflexión:

$$\therefore f_{(d,i)}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_n(t) * A_n w_n(t - \Delta t_n) * h_{n(d,i)}(t)$$

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:

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

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

Función de crecimiento de la energía

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

$$ERF(\tau) = \int_0^{\tau} h^2(t) dt$$

2.1.1. Parámetros temporales

Tiempo de Reverberación (TR)

En base a investigaciones experimentales sobre salas “tipo vivas”, con escasa absorción (de superficies muy reflexivas o poco absorbentes), Sabine propuso sus hipótesis principales a finales del siglo XIX. En 1902 estas hipótesis fueron

demostradas teóricamente por Franklin al considerar un recinto con una distribución uniforme del material absorbente, que contribuía a establecer un reparto homogéneo de la energía y un campo sonoro difuso.

Uno de los atractivos de la teoría de Sabine era su sencillez, pues estableció que la calidad acústica de una sala dependía de solo tres parámetros independientes entre sí: la sonoridad, el balance y la reverberación (Sabine, 1922). La sonoridad está relacionada con la cantidad de energía acústica puesta en juego, que depende de la potencia de la fuente sonora y de las características físicas del recinto. El balance incluye los atributos temporales, espaciales y espectrales que rigen la preservación del timbre de los sonidos y su distribución pareja en el espacio. La reverberación determina la evolución temporal de la energía acústica desde el momento en que cesa de ser emitida por la fuente. En el modelo de Sabine, el *Tiempo de Reverberación* depende de dos magnitudes independientes: el volumen del recinto y la absorción acústica total.

La intensidad del sonido decrece siguiendo una ley exponencial que fue planteada por Sabine como hipótesis de trabajo y que luego fue verificada experimentalmente en recintos sencillos:

$$e^{-kt} \quad (1)$$

donde:

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 sonido.

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

$$I(t) = I_0 e^{-kt} \quad (2)$$

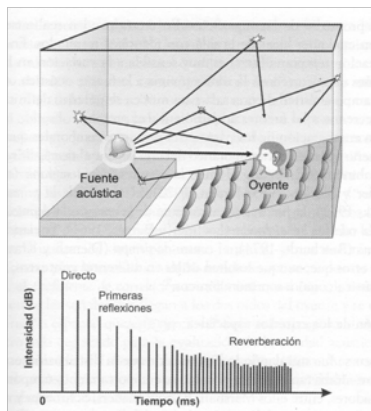


Figura 4. Patrón de reflexiones en una sala y reflectograma en un sector de la platea producto de las reflexiones múltiples sobre las distintas superficies del espacio. Extraído de Gustavo Basso (2009). "Música y espacio".

Sabine definió *Tiempo de Reverberación* como el tiempo que debe transcurrir para que la intensidad $I(t)$ del sonido que se extingue quede reducida a una millonésima de la intensidad de emisión I_0 . Por tanto, la definición equivale a decir que transcurrido este tiempo el sonido ha sufrido una atenuación de 60 dB.

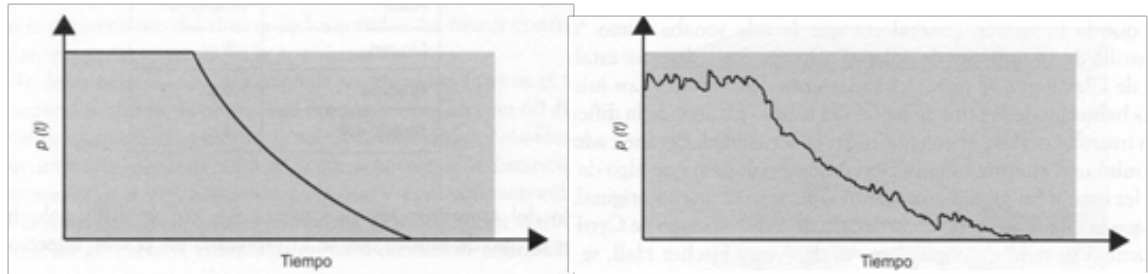


Figura 5. Decaimiento exponencial teórico del nivel de presión sonora en una sala de alta difusión (izquierda) y medición del nivel de presión sonora en una sala de difusión media (derecha).
 Extraído de Gustavo Basso (2009). "Música y espacio".

La absorción de las superficies se puede expresar en función de sus coeficientes de absorción. El coeficiente de absorción α relaciona la energía absorbida y la incidente:

$$\alpha = E_a/E_i$$

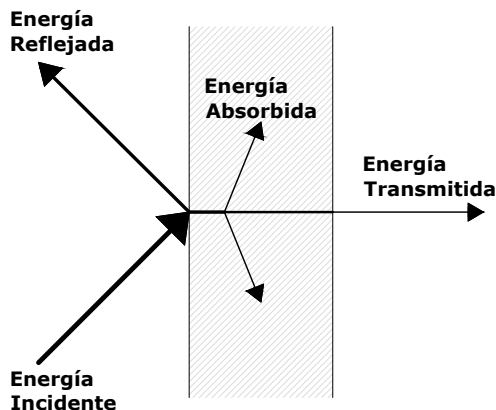


Figura 6. Reflexión, absorción y transmisión de sonido.

Después de múltiples experiencias y basándose en la ley exponencial de decrecimiento (2), dedujo que el *Tiempo de Reverberación* de un local viene dado por la fórmula⁴:

$$TR = \frac{0,16 V}{S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3 + \dots + S_n \alpha_n} \quad (3)$$

donde:

S_n corresponde a cada una de las superficies interiores del recinto y α_n es el coeficiente de absorción del material de revestimiento de cada superficie. Si la absorción promedio se define como:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad (4)$$

y la superficie total:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (5)$$

La expresión (3) puede escribirse de la siguiente forma:

$$TR = \frac{0,16 V}{S \bar{\alpha}} \quad (6)$$

El coeficiente de absorción promedio $\bar{\alpha}$ es un coeficiente que relaciona la energía absorbida total con la energía incidente total, cuyo valor teórico nunca puede ser mayor a la unidad. Es un coeficiente de absorción estimado donde la media aritmética ponderada de los coeficientes fue elegida de forma arbitraria sin un fundamento físico que la justifique.

Sabine realizó numerosos experimentos hallando la constante k de varias salas y los coeficientes de absorción de numerosos materiales.

Reverberación Temprana (EDT)

Hacia el año 1965, Bishnu Atal, Manfred Schroeder y Gerhard Sessler descubrieron que existía una alta correlación entre el tiempo de reverberación temprano, tomado en los primeros 160 ms, y la reverberación perceptual que distinguen los oyentes. En 1970, Vilhelm Jordan definió la *Reverberación Temprana* (Early Decay Time - *EDT*) 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 et al., 1965; Jordan, 1970). Este parámetro se relaciona con el comportamiento de las primeras reflexiones dentro de 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 habrá diferencia entre los valores de *TR* y *EDT*. Para las salas donde la distribución de la absorción no es uniforme o para recintos acoplados con características acústicas muy diferentes, los valores de *TR* y *EDT* no serán coincidentes.

El *EDT* se relaciona mejor que el *TR* con la impresión perceptual de la reverberación.

Retardo de la Primera Reflexión (ITDG₁)

Beranek, en 1962, subraya la importancia de este parámetro y lo define como el tiempo que transcurre entre la llegada del sonido directo y la primera reflexión destacada.

El Retardo de la Primera Reflexión (Initial Time Delay Gap - *ITDG*₁) se relaciona con la intimidad sonora de la sala e indica el grado de identificación entre el oyente y la fuente acústica. Es decir, determina el grado de inmersión o de distanciamiento, con relación a la actividad hablada o musical, que percibe el oyente (Beranek, 1962). El *ITDG* se mide a partir de la respuesta al impulso de la sala. Su valor corresponde a un punto de la sala considerando las bandas de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz. El valor recomendado varía según los distintos autores. Según Higiní Arau conviene que sea inferior a los 20 ms, admitiendo como máximo un valor de 40 ms (Arau, 1999).

Retardo de la Reflexión Principal (ITDG₂)

En 1983, Yoichi Ando propone el *Retardo de la Reflexión Principal (ITDG₂)* como el tiempo que transcurre entre la llegada del sonido directo y la reflexión más significativa. La definición de reflexión significativa es contextual. Según Ando, es la reflexión que se ubica en el baricentro de todas las reflexiones posteriores a la señal directa (Ando, 1983). Se mide también a partir de la respuesta al impulso de la sala. En una sala muy seca, con un bajo *TR*, esta reflexión puede ser muy pequeña. En cambio, si la sala es muy viva o tiene algún reflector cercano al escenario, puede llegar casi al nivel del sonido directo.

2.1.2. Estandarización de la energía del sistema Nivel Sonoro Normalizado (G)

El *Nivel Sonoro Normalizado (Strength - G)* se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora, producido por la misma fuente, medido 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.

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

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

Cuando se mide *G* hay que considerar la directividad de la fuente. En la práctica de campo se estila medir con fuentes omnidireccionales, pero en una simulación digital es posible incluirla. A continuación se muestra, a modo de ejemplo, la distribución de este parámetro en la platea de la *Sala Parainfo* de la Universidad Nacional del Litoral obtenida a partir de la implementación de un modelo acústico digital de simulación por computadora.

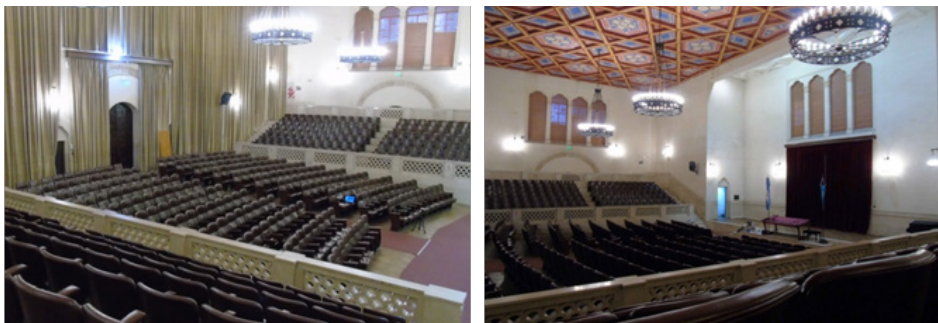


Figura 7. Fotografías de la *Sala Parainfo* de la Universidad Nacional del Litoral.⁵

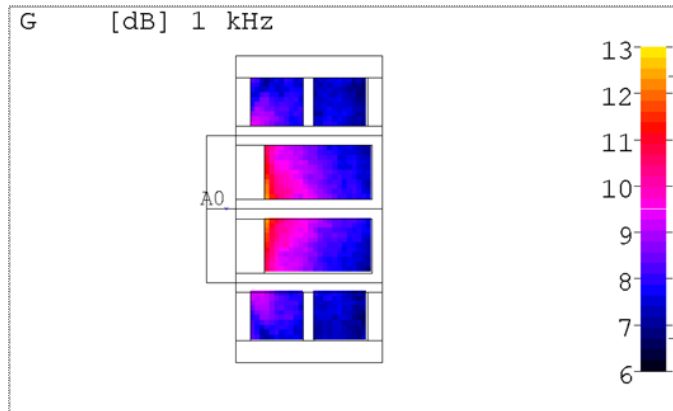


Figura 8. Sala Paraninfo de la Universidad Nacional del Litoral. Distribución de G en platea. Imagen tomada de la simulación de la sala.

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).

2.1.3. Parámetros espaciales

Fracción Lateral de Energía (LF)

Michael Barron definió, en 1981, la *Fracción Lateral de Energía* (Lateral Fraction - 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 o patrón polar en forma de ocho ($h_8^2(t)$), colocado de manera transversal, con la de un micrófono omnidireccional ($h^2(t)$) (Barron, 1981).

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

$h_8(t)$ es la respuesta al impulso de un micrófono cuya direccionalidad posea lóbulos de captación en forma de ocho dispuestos en el plano horizontal de manera de ofrecer la máxima sensibilidad a la energía lateral (90° y 270°). El límite inferior de integración del numerador se ajusta a 5 ms para evitar cualquier fracción de sonido directo (0°) que pudiese tomar el micrófono en ocho.

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

Algunos autores sugieren una modificación a la ecuación -se supone que la impresión espacial perceptual varía con el coseno del ángulo horizontal- mientras que la relación anterior 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 ocho (Basso, 1998). Es decir que la fracción de energía que llega lateralmente dentro de los primeros 80 ms puede medirse a partir de las respuestas al impulso de un micrófono direccional de respuesta en ocho que no se ve influido de manera significativa por el sonido directo -elimina cualquier energía sonora proveniente en forma directa desde las cercanías de la posición de medición y desde el cielorraso o desde un reflector superior- y reacciona ante la energía acústica proveniente de las direcciones laterales. El micrófono omnidireccional permite normalizar los valores porque registra el total de la energía proveniente de cualquier dirección.

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

Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural (IACC)

Hacia 1974, Schroeder y su equipo propusieron la utilización de un parámetro físico binaural, el Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural (Interaural Cross Correlation Coefficient - IACC), como la variable más importante para la evaluación de la acústica interior de una sala (Schroeder *et al.*, 1974). Este parámetro es quizás el que mejor describe la difusión tridimensional de un campo acústico. Se lo dedujo a partir de la función de correlación cruzada $\Phi_{d,i}(\tau)$ entre las señales que llegan a ambos oídos de un oyente:

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

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 queda definido por medio de la siguiente expresión:

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

La correlación cruzada mide el grado de similitud entre dos señales mediante un proceso iterativo: se integran los valores de multiplicar ambas ondas a medida que se van desplazando por infinitésimos hasta un tiempo definido de antemano. 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, el valor es alto.

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 de τ de ± 1 ms, que es el tiempo que le lleva a la onda acústica recorrer la distancia promedio entre los dos oídos.

En la figura 9 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-.

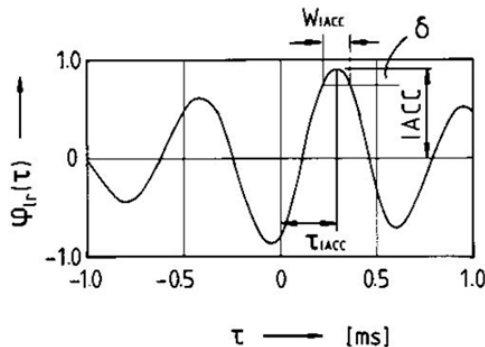


Figura 9. Correlación cruzada entre dos señales y definición del IACC.

El valor del *IACC* será 1 si las ondas que llegan a los dos oídos de un oyente son iguales y si las dos ondas son estadísticamente independientes valdrá 0. Schroeder propuso este parámetro como el más destacado para la evaluación de la calidad acústica de una sala. Desde ese momento el *Tiempo de Reverberación* dejó de ocupar la posición de privilegio que había mantenido desde principios de siglo XX.

En la figura 10 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 Gi-*

nastera del Teatro Argentino de La Plata. El valor del $IACC$ se puede extraer de estos ecogramas calculando la correlación cruzada entre las dos señales.

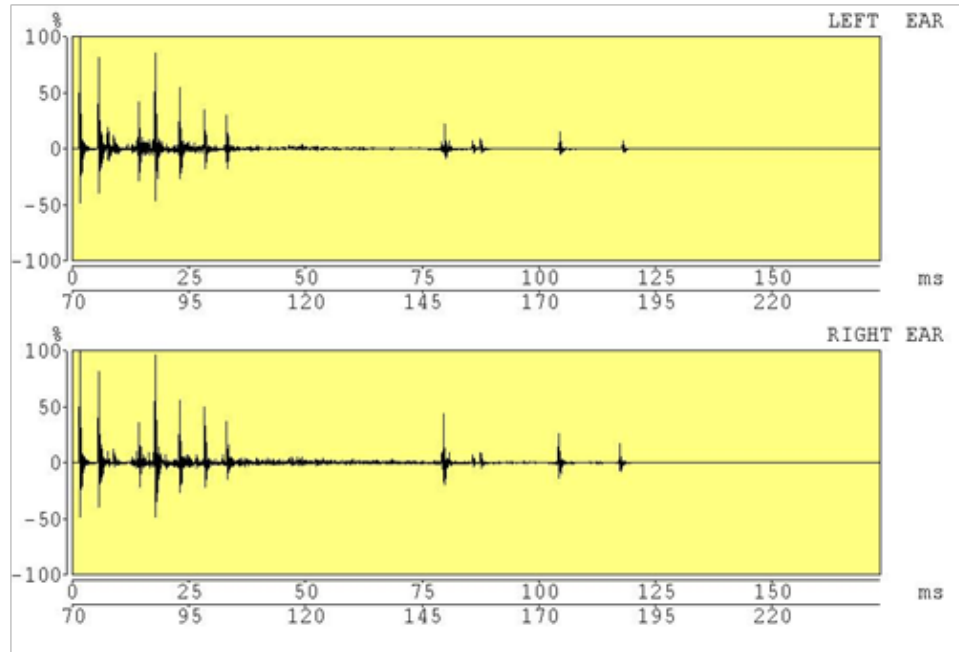


Figura 10. Ecogramas de los oídos derecho e izquierdo -segunda bandeja de la *Sala Ginastera del Teatro Argentino* de La Plata-. El valor del $IACC$ en este caso fue 0,26 y el Factor de Espacialidad 0,74. Simulación de la sala realizada por Gustavo Basso.

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 y compara el patrón de reflexiones tempranas que arriba a ambos oídos del espectador. El $IACC_L$ (tardío) evalúa el período posterior a los 80 ms -considera el sonido reverberante-. 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 $IACC_L$ es la medida de la *Sensación de Espacialidad (LEV)* que se vincula con la sensación de estar rodeado por el sonido.

A partir del $IACC$, en 1996 Beranek definió el *Factor de Espacialidad (1-IACC)* que se emplea actualmente. Si adopta el valor 1, la correlación entre los sonidos en los dos oídos es nula. Como referencia, el criterio de Ando, Barron y Takayuki Hidaka establece que el *Factor de Espacialidad* debe ser mayor que 0,60 en una buena sala (Beranek, 1996 y Ando *et al.*, 1997).

En 1994, Okano *et al.* encontraron que las bandas de octava entre 500 Hz y 4 kHz eran igualmente importantes para la determinación del *Ancho Perceptual de la Fuente*. Sin embargo, debido a la menor intensidad de las señales de la música sinfónica en región de 4 kHz, esta banda se elimina cuando se establece un valor promedio. El $IACC_{E3}$ se define entonces como el promedio del valor del $IACC_E$ en las bandas de octava con frecuencia central en 500 Hz, 1.000 Hz y 2.000 Hz y el $IACC_{L3}$ es el promedio del $IACC_L$ en esas mismas bandas de frecuencia (Norma ISO 3382).

El concepto de $IACC$ fue estudiado por Ando en salas simuladas. En su teoría este parámetro, junto con el TR , el *Nivel Sonoro Normalizado* (G) y el *Retardo de la Reflexión Principal* ($ITDG_2$), es uno de los cuatro estadísticamente independientes que permiten dar cuenta de la calidad acústica de una sala de conciertos. Ando encontró que para valores medios y altos de *Factor de Espacialidad* $1-IACC_{E3}$, la correlación con el TR , EDT , C_{80} y $ITDG_2$ es baja. Sin embargo, existe correlación positiva con el *Nivel Sonoro Normalizado* (G) ya que el incremento de la energía de las reflexiones tempranas aumenta el valor del $1-IACC_E$ y de G . De todas maneras, la correlación perceptual sigue siendo baja ya que los oyentes son capaces de separar la sonoridad de la espacialidad en salas reales y no sustituyen un parámetro con otro. Cuando el valor del $1-IACC_{E3}$ es bajo, sólo hay correlación con el *Retardo de la Reflexión Principal* $ITDG_2$ (Ando, 1985).

Los valores de $1-IACC$ no permiten identificar los cambios en el *Ancho Perceptual de la Fuente* a frecuencias bajas pues son muy pequeños para frecuencias por debajo de 300 Hz. La *Razón para Bajas Frecuencias* (BR) parecería ser el parámetro acústico que mejor se correlaciona con la calidad acústica de una sala en esta parte del espectro (Beranek, 1996). Algunos autores proponen el *Nivel Sonoro Normalizado* (G) a bajas frecuencias como descriptor de la respuesta de la sala en graves (Beranek, 2004).

Cuando un oyente está inmerso en un campo acústico que tiene un valor de *Factor de Espacialidad* alto se siente rodeado por el sonido y dicha sensación de inmersión en el ambiente, que incluye tanto a la fuente como a su entorno cercano, es uno de los factores más apreciados a la hora de evaluar la calidad acústica de una sala para música (Basso, 2009).

2.1.4. Razones de energía

Claridad a 80 ms (C_{80})

La *Claridad* (Reichardt, 1975) relaciona la cantidad de energía inmediata, que llega al oyente durante los primeros 80 ms, con la energía sonora tardía que se produce después de transcurridos los 80 ms. Se la define matemáticamente con la siguiente expresión cuyo valor se expresa en dB.

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

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. La integración se inicia con la llegada de la energía sonora directa en el punto receptor.

Tiene aplicación para señales musicales o de gran autocorrelación (> 30 ms) (Basso, 1998).

Si la *Claridad* tiene por valor 0 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 -la energía temprana coincide con la energía tardía o reverberante-.

El inconveniente principal de esta definición es la gran sensibilidad que posee el parámetro para reflexiones cercanas a los 80 ms, que no se corresponde con el cambio perceptual asociado. Para evaluar esta característica se realizó la simulación de una señal con una gran reflexión (0 dB respecto del sonido directo) a 78 ms y 82 ms y se verificó que el valor de la *Claridad* se modificó de +4 dB a -3 dB, sin embargo, el cambio a nivel perceptual resultó casi nulo (Basso, 1998). En la ecuación, si una reflexión muy potente se produce a 78 ms la energía asociada se evalúa en el numerador y, si ocurre a 82 ms, en el denominador; por lo tanto, lo que a nivel perceptual no se detecta, a nivel matemático da por resultado valores muy diferentes.⁶

Un C_{80} alto significa que la energía sonora temprana es superior a la tardía. Esto implica que dentro de los primeros 80 ms se producirán un mayor número de reflexiones que provienen de superficies cercanas a la fuente o al oyente. Cuando esto sucede, generalmente tendremos que el *EDT* será mucho más

pequeño que el TR medio del recinto (Arau, 1999). Este fenómeno se puede dar en salas donde el cielorraso es relativamente bajo y las reflexiones especulares en dirección al oyente sean muy direccionales e intensas.

Algunos autores han establecido valores óptimos de acuerdo al uso musical de un espacio. Para el caso de las salas de concierto, Barron establece que el valor óptimo de C_{80} para frecuencias medias se encuentre entre $-2 \text{ dB} < C_{80} < 2 \text{ dB}$ (Barron, 1993). Walter Reichardt, quien definió el parámetro, sostiene que su valor no debe ser nunca inferior a 0 dB (Reichardt, 1975). Por su parte, Lehmann sugiere que no debe ser inferior a los 3 dB (Lehmann, 1986). Arau lo fija -extendiendo el límite superior de Barron- entre $-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$.

Para salas de ópera, Arau establece como valores óptimos entre $2 \text{ dB} < C_{80} < 6 \text{ dB}$ y para salas de teatro y conferencias $C_{80} > 6 \text{ dB}$.

Beranek menciona como peculiaridad que de acuerdo a situaciones y roles musicales específicos se prefieren distintos valores de *Claridad*. Durante un ensayo, un director de orquesta expresa satisfacción respecto de la sala cuando percibe con gran definición todos los detalles musicales y el valor de C_{80} se ubica entre 1 dB y 5 dB . Dirigiendo un concierto o como oyente, la misma persona prefiere un espacio acústico más reverberante con valores de C_{80} entre -1 dB y -4 dB (Beranek, 1996).

Aparentemente sería deseable que el valor fuera positivo. Sin embargo, que su valor sea negativo no es inadecuado en todos los casos; por un lado, porque existen diferencias en las preferencias personales de los oyentes y algunos de ellos eligen campos sonoros más reverberantes y menos definidos y, por otro, porque el modelo presenta una limitación en los casos de reflexiones potentes en el entorno de los 80 ms , donde la *Claridad* puede variar entre valores positivos y negativos (como se mencionó anteriormente), y la diferencia a nivel perceptual pueda ser casi nula.

Respecto a la reverberación, la música se percibirá con mayor *Definición* o *Claridad* con valores bajos de TR y el valor correspondiente a C_{80} será positivo. Si el TR tiene un valor grande, los detalles musicales no estarán tan definidos y el valor de la *Claridad* será negativo -la energía sonora tardía es superior a la de los primeros 80 ms - (Beranek, 1996). De esta forma, la *Claridad* está directamente vinculada, junto a la reverberación, con la inteligibilidad.

A nivel perceptual, Beranek menciona que cuando un músico habla de *Claridad* o *Definición* se refiere al grado en que los sonidos individuales se separan unos de otros. Depende de manera crítica de las características musicales de la pieza y de las habilidades e intenciones de los ejecutantes, pero está también íntimamente relacionada con la acústica de una sala (Beranek, 1996).

Entonces podría definirse la *Claridad* de acuerdo al grado de separación de los sonidos entre sí en una representación musical o hablada: si hay más energía en la primera parte de la señal los sonidos o las sílabas serán muy definidas y en el caso contrario quedarán más solapadas entre ellas. El grado de *Claridad* entonces depende de las necesidades de la representación. Si es para palabra hablada desearíamos comprender el mensaje y se necesitará, por lo tanto, más energía en el comienzo de la señal. Si es una representación musical dependerá del estilo. Una obra de textura contrapuntística con un tempo rápido, un *allegro* por ejemplo, necesitará más energía en la primera parte de la señal (las señales cambian rápidamente) mientras que algunas obras para órgano o de tempo lento, como el canto gregoriano, admitirán campos más reverberantes y menos claros. En estos casos, la existencia de gran cantidad de energía en la parte final de la señal no sería un problema por las características del lenguaje musical (la señal cambia muy lentamente).

El músico o el orador pueden manipular la respuesta acústica: si el sonido resultara poco claro, pueden acortar la duración de las notas, por ejemplo articulando en *stacatto*, dejando que la acústica del espacio se encargue de solaparlas. Por el contrario, si el sonido fuera demasiado claro, pueden alargar la duración de las notas articulando en *legato*.

A continuación se presenta la distribución del parámetro *Claridad* a 80 ms en la platea de la *Sala Paraninfo*.

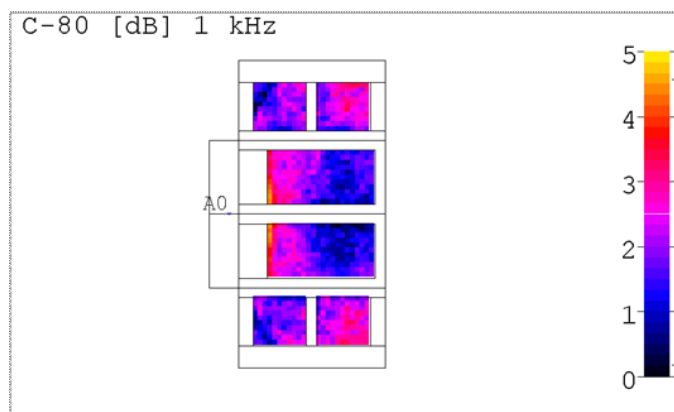


Figura 11. *Sala Paraninfo*. Distribución de C_{80} en platea. Imagen tomada de la simulación de la sala.

Claridad a 50 ms (C_{50})

La *Claridad* a 50 ms relaciona la energía que llega al oyente durante los primeros 50 ms con la que le llega en forma tardía. Tiene aplicación para la voz hablada o para señales de baja autocorrelación (< 30 ms) (Basso, 1998).

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

El inconveniente principal, como en el caso anterior, es la gran sensibilidad a las reflexiones de gran energía cercanas a los 50 ms.

Definición (D)

La *Definición* fue propuesta por Rolf Thiele en 1953. Se la define por medio de la siguiente expresión porcentual que relaciona la energía temprana (presente en los primeros 50 ms de la señal) con la energía total de la señal.

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

Si bien resulta un parámetro altamente correlacionado con la *Claridad* a 50 ms (linealmente dependientes), no pueden ser usados indistintamente para comparar salas. Los límites de integración en el denominador para la *Claridad* están entre los 50 ms y el infinito y en la *Definición* se encuentran entre 0 e infinito y, por lo tanto, no son intercambiables.

Como en el parámetro anterior, conserva la sensibilidad a las reflexiones de gran energía cercanas a los 50 ms (Basso, 1998).

Un valor bajo de *Definición* nos indica que la energía sonora reflejada que se produce dentro de los 50 ms, después de la llegada del sonido directo, es pequeña en relación a la energía sonora reflejada total que alcanza el punto receptor.

Un recinto con un valor de *Definición* bajo se percibe como poco íntimo y normalmente va asociado a un exceso de *TR* -la sala es muy viva- (Arau, 1999).

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%. En estas salas, si aumenta la *Definición*, la calidad acústica empeora. Las salas con valores altos de *Definición* se encuentran mejor preparadas para la expresión hablada -teatro o sala de conferencias- siendo para estos casos el valor adecuado igual o superior al 65%. En ópera la situación es intermedia y los valores de *Definición* deberían estar, según Arau, entre 50% y 65%.

La *Definición* resultó uno de los primeros parámetros que intentaron describir la claridad distintiva de un sonido (Basso, 1998).

En la figura 12 podemos ver la distribución de los valores de *Definición* en la platea de la *Sala Paraninfo*.

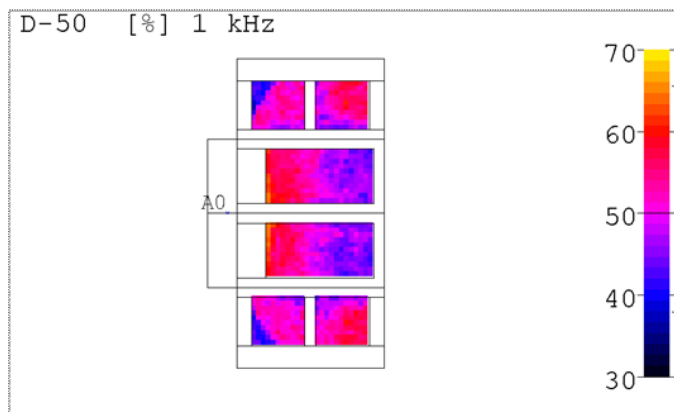


Figura 12. *Sala Paraninfo*. Distribución de D en platea. Imagen tomada de la simulación de la sala.

Centro de Tiempo (Ts)

En 1986, Dietsch y Kraak lo definen como el baricentro temporal de la respuesta al impulso de la sala.

$$t_{c(\tau)} = \frac{\int_0^\tau t \cdot h^2(t) dt}{\int_0^\tau h^2(t) dt} \qquad t_c = \lim_{\tau \rightarrow \infty} t_{c(\tau)}$$

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 (t_c es el momento primario de $h(t)^2$).

El principal problema hallado en la medición de $t_c(\tau)$ es que la integración del numerador de la ecuación tiende a infinito cuando t tiende a infinito, debido a que el ruido de fondo nunca llega a ser cero (Basso, 1998). Está altamente correlacionado con el *TR* y con la *Claridad*; por ejemplo, al aumentar el valor del *TR* aumenta el del *Centro de Tiempo*.

En la figura 13 se aprecia la distribución de los valores del parámetro en la platea de la *Sala Paraninfo*.

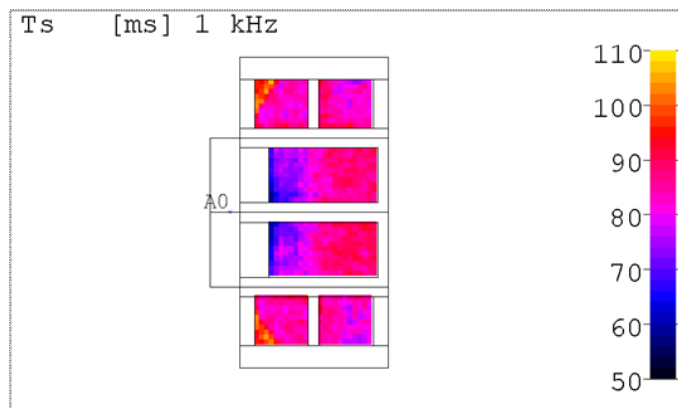


Figura 13. *Sala Paraninfo*. Distribución de T_s en platea. Imagen tomada de la simulación de la sala.

2.1.5. Parámetros espectrales

Razón para Bajas Frecuencias (BR)

La *Razón para Bajas Frecuencias* (Bass Ratio - *BR*) 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). Como medida física se utiliza:

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

Se dice que una sala tiene calidez acústica -a nivel perceptual- si presenta una buena respuesta a las frecuencias graves -representa la riqueza en baja frecuencia-.

Arau indica como valor óptimo para música 1,2 y para teatro desde 0,9 hasta 1,3 tendiendo preferiblemente a 1,1 (Arau, 1999). Los criterios de Barron y John Bradley & Gilbert Soulodre imponen como condición que el *BR* sea mayor a 1 (Barron, 1995 y Bradley & Soulodre, 1995). Hidaka y Beranek 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 1,32 para teatros de ópera (Hidaka y Beranek, 2000).

Razón para altas frecuencias

Se dice que el sonido de una sala es brillante si presenta una buena respuesta a frecuencias altas. 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.

$$\text{Razón alta frec} = \frac{TR(2 \text{ kHz}) + TR(4 \text{ kHz})}{TR(500 \text{ Hz}) + TR(1 \text{ kHz})}$$

El valor de este parámetro tiene que ser lo más alto posible en salas muy grandes, siendo deseable que no sea menor a 0,8 -es difícil que pueda llegar a 1 debido a la absorción del aire- (Arau, 1999).

2.2. Rasgos perceptuales

Estos parámetros califican la respuesta de los oyentes ante un espacio acústico. 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).⁷ 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* (Fullness of Tone) es un término perceptual, no está definido físicamente y generalmente se lo relaciona con la reverberación. Un sonido pleno es un sonido con mucha reverberación y baja *Claridad*. Si es alto el valor de la reverberación, mayor será la *Plenitud de Sonido*; si es bajo el valor de la *Claridad*, también será alta la *Plenitud de Sonido*.

Beranek habla de la *Vivacidad* (Liveness) como *Plenitud de Sonido* en la zona de las frecuencias medias y altas -mayor reverberación en la zona aguda del espectro-. Por el contrario, la *Calidez* (Warmth) es *Plenitud de Sonido* en la zona de bajas frecuencias (Beranek, 1996).

Definición

Beranek establece dos tipos de *Definición*: 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.⁸

La *Definición Horizontal* refiere al grado en el que los sonidos se suceden cada uno separado del siguiente. Los compositores pueden indicar ciertos aspectos musicales que determinen 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 físicos que afectan la *Definición Horizontal* son el *Tiempo de Reverberación* y la *Razón entre la energía temprana y reverberante*, los mismos dos factores que determinan la *Plenitud de Sonido* pero en relación inversa: un aumento en la *Definición Horizontal* se relaciona con una disminución en la *Plenitud de Sonido*.

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 y cómo llegan a la audiencia, el grado de ensamble de las señales de los diferentes instrumentos en el espacio del escenario, de la

respuesta relativa de la sala a baja, media y alta frecuencia y de la razón entre la energía temprana y reverberante.

El grado de *Definición Horizontal* y *Vertical* es el producto de una suma de factores musicales y acústicos y depende del lenguaje de la obra musical, de la forma de ejecución y de las características del espacio donde se la interpreta.

Ancho Perceptual de la Fuente (ASW)

Es el primero de los factores en los que se divide la Espacialidad (Morimoto, 1993). El *Ancho Perceptual de la Fuente* (Apparent Source Width - ASW) se define como el ancho o la amplitud horizontal del evento sonoro -se lo percibe espacial y temporalmente fusionado con el sonido directo-.

Se relaciona con la textura lateral y la sensación de estar inmerso en el campo sonoro.

La correlación del *Ancho Perceptual de la Fuente* con el *Coefficiente de Correlación Cruzada Interaural* es alta.

Sensación de Espacialidad (LEV)

También llamada *Espacialidad*, *Impresión Espacial* o *Sensación de Envoltura del Oyente* (Listener Envelopment - LEV), es la sensación que experimenta un oyente de estar rodeado o de ser envuelto por el sonido.

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

Sonoridad

La *Sonoridad* es, en parte, el correlato perceptual del parámetro físico *Nivel Sonoro Normalizado*. Desde la ciencia acústica, Sabine definió la calidad acústica de una sala para música a partir de tres parámetros: la reverberación, la sonoridad y el balance. Se puede estimar la *Sonoridad* en una sala de acuerdo a su *Tiempo de Reverberación* y a su tamaño.

En relación al tamaño del recinto, 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. Además, la posibilidad de hablar de calidad acústica de una sala queda también relacionada con su respuesta en dinámica que se traduce en mantener muy bien los *pp* y poseer altos niveles en los *ff*. Los *ff* de gran energía son posibles si las salas no son excesivamente grandes y tienen poca absorción.

La *Sonoridad* queda afectada 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 a 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*- y, 4. La absorción acústica -las superficies de gran tamaño tratadas con materiales absorbentes también reducen la *Sonoridad*- (Beranek, 2004).

3. A modo de coda

Podemos afirmar que los lugares donde se interpreta la música funcionan como extensiones de los instrumentos musicales. Un recorrido histórico muestra que, en la mayoría de los casos, los espacios precedieron a la música (las salas de concierto y la música orquestal, las iglesias y el canto gregoriano) y que gran parte del repertorio musical es concebido pensando en sitios específicos. Tanto las salas como los ambientes acústicos definen ciertos aspectos del discurso musical que involucran desde la concepción de la música hasta su interpretación. La composición musical muchas veces incorpora elementos del lugar en el que se interpreta, así se toman decisiones en relación a la selección y cantidad de instrumentos, disposición espacial de los músicos, textura, articulaciones, etc.

En la música tradicional existe un estándar de salas para música -lugares construidos específicamente para hacer música- y de grupos instrumentales (los auditorios, los teatros de ópera, las salas para música de cámara, las orquestas, los ensambles) a partir de los cuales muchos factores se pueden predecir. En cambio, en la música contemporánea, la interacción entre el ambiente acústico y los grupos instrumentales es muy diferente al enfoque tradicional. Por este motivo, se hace necesario contar con herramientas que permitan estudiar el espectro de posibilidades que le brindan a los músicos y compositores los lugares no convencionales para hacer música.

Los parámetros citados en este capítulo se utilizan tanto para el análisis como para el diseño de salas para música. Permiten comprender las causas físicas de lo que se oye -entender la acústica de una sala y su interacción con la música-. Además, en la práctica, estos parámetros se utilizan para analizar salas que pueden necesitar una reforma arquitectónica y en el diseño de nuevos espacios.

4. Referencias

Ando, Yoichi (1983). "Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall". *Journal of the Acoustical Society of America*, 74, 873-887.

Ando, Yoichi (1985). *Concert Hall Acoustics*. Springer Verlag, Berlin.

Ando, Yoichi *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, 635-643.

Ando, Yoichi (1998). *Architectural Acoustics. Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. Springer Verlag, New York.

Arau, Higini (1996). "Teoría general de las magnitudes energéticas del sonido en recintos con distribución asimétrica de la absorción". *Revista de Acústica*, Vol. 27, Nº 1 y 2.

Arau, Higini (1999). *ABC de la acústica arquitectónica*. CEAC, Barcelona.

Atal, B., Schroeder, M. y Sessler, G. (1965). Paper G32, *Proceedings of the Fifth International Congress on Acoustics*. Liège.

Barron, Michael (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. E & FN Spon, London.

Barron, Michael (1995). "Bass sound in concert auditoria". *Journal of the Acoustical Society of America*, 97 (2), 1088-1098.

Basso, Gustavo (1998). "Salas para música y prosa", mimeo.

Basso, Gustavo, *et al.* (2009). *Música y Espacio: ciencia, tecnología y estética*. Editorial de la UNQ, Bernal.

Beranek, Leo (1996). *Concert Halls and opera houses: How they sound*. Acoustical Society of America, New York.

Beranek, Leo (1962). *Music, Acoustics, and Architecture*. Wiley, New York.

Beranek, Leo (2004). *Concert Halls and opera houses*. Springer, USA.

Bradley, J. y Gilbert, S. (1995). "The influence of late arriving energy on spatial impression". *Journal of the Acoustical Society of America*, 97 (4), 2263-2271.

Bradley, J. y Gilbert, S. (1995). "Subjective evaluation of new room acoustic measures". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (1), 294-301.

Bradley, J. y Gilbert, S. (1995). "Objective measures of listener envelopment". *Journal of the Acoustical Society of America*, 98 (5), 2590-2598.

Dietsch, L. y Kraak, W. (1986). "Ein objectives Kriterium zur Erfassung von Echos-torungen bei Musik- und Sprachdarbietungen". *Acustica*, Vol. 60, 205-216.

Fischetti, A. et al. (1992). "Relations between Subjective Spatialisation, Geometrical Parameters and Acoustical Criteria in Concert Halls". *Applied Acoustics* 37, 233-247.

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), 368-383.

Kuttruff, H. (1991). *Room Acoustics*. Elsevier Applied Science, Londres.

Lehmann, W. (1986). "Technical communication". *Acustica*, Vol. 45.

Lochner, J. y Burger J. (1958). "The subjective masking of short time delayed echoes by their primary sounds and their contribution to the intelligibility of speech". *Acustica*, Vol. 8, 1-10.

Lochner, J. y Burger J. (1960). "Optimum reverberation time for speech rooms based on hearing characteristics". *Acustica*, Vol. 10, 394-399.

Méndez, Antonio et al. (1994). *Acústica Arquitectónica*. Universidad del Museo So-

cial Argentino. Buenos Aires, Argentina.

Morimoto, Masayuki *et al*, (1993). "Relation between Auditory Source Width in Various Sound Fields and Degree of Interaural Cross-Correlation". *Applied Acoustics* 38, 291-301.

Norma ISO 3382-1-2009 (2009). "Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces". International Standard Organization.

Pierce, John (1985). *Los Sonidos de la Música*. Ed. Labor, Barcelona.

Reichardt, W., Abdel, A., Onsy, W. y Schmidt, W. (1975). "Definition und Messgrundlage eines objektiven Masses zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit beim Musikdarbietung". *Acustica*, Vol. 32, 126-137.

Sabine, W. C. (1922). *Collected Papers on Acoustics*. Harvard U. Press, reprinted by Península.

Schroeder, 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, 1195-1201.

Thiele, R. (1953). "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrueckwuerfe in Raumen". *Acustica*, Vol. 3.

Wilkens H. y Plenge G. (1975). "The correlation between subjective and objective data of concert halls", *Auditorium Acoustics*. Applied Science Publishers, London.

1 La relación entre las características de la señal musical y las del recinto fueron estudiadas en profundidad por Yoichi Ando (1998).

2 Aquí se desarrollan únicamente los parámetros que caracterizan el área ocupada por el público en una sala. Existe además un grupo de parámetros que describen la respuesta acústica del escenario.

3 En general, los parámetros que siguen, varían su valor 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 hacer un estudio espectral de cada uno de ellos.

4 Existen otras fórmulas diferentes, entre las que se destacan las de Eyring y Norris, Millington y Sette, Fitzroy, Pujolle, Kuttruff y Arau.

5 El Paraninfo fue inaugurado en 1938. Fue sede de las reformas de las constituciones nacionales de la República Argentina de 1957 y 1994.

6 Lochner y Burger, entre 1958 y 1960, afirmaron que no hay que evaluar una reflexión inmediatamente antes o después de un límite temporal definido (por ejemplo, para C_{80} , 80 ms y 50 ms para C_{50}) y propusieron emplear una zona de transición lineal o de compensación -de manera que entre ciertos límites temporales la respuesta perceptual no cambie drásticamente-.

7 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 y, en este contexto hacemos referencia exclusivamente a lo que se percibe.

8 Beranek a nivel perceptual agrupa Claridad y Definición.