

¿ES EL CRITERIO ACUSTICO EL PARADIGMA DE LA EXCELENCIA ACÚSTICA EN EL DISEÑO DE SALAS?

Higini Arau-Puchades (*). Miembro de la SEA
ARAUACUSTICA. C/Travesera de Dalt 118,3º1ª,08024 BARCELONA
h.arau@arauacustica.com

ABSTRACT: Hace más de una centuria que la acústica nació como ciencia y son muchas las cuestiones que aún hoy nos formulamos.

Hay personas relevantes dentro del campo de la acústica arquitectónica que son de la opinión que en sus diseños, para conseguir la excelencia acústica, participan un 50% de Física y otro 50% de Vudú. Lo cierto es que las mejores salas del mundo existen desde hace varios siglos. O sea son salas de generación espontánea sin que la intervención humana participase con leyes acústicas que regularizasen su construcción. Incluso creemos que la espiral logarítmica del perfil epidaureo obedece a un sistema de prueba y error encaminado a conseguir un trazado óptimo de buena visibilidad.

También debemos recordar que el fracaso estruendoso de la sala de conciertos construida en el Lincoln Center de Nueva York (1962), ahora destruida, sirvió a su autor para elaborar un libro, que publicó el mismo año que se inauguró la sala, donde expuso un conjunto de criterios acústicos de admirable interés que en teoría utilizó para diseñar su sala. Pero finalmente resultó como si el autor del libro [1], por todos conocidos, y uno de los más eminentes científicos que han pisado la Tierra, no lo hubiera leído para aplicarlo a su famosa sala de conciertos antes de construirla. O quizás aprendió del fallo el por qué del mismo.

Quizás sea cierto lo del Vudú que comentan algunos, que piensan que mejor que calcular, es mejor utilizar la intuición, la mística del misterio y el azar.

No obstante somos de la opinión que Criterio Acústico, la ley de la experiencia, es la hoja de ruta que nos indica los objetivos que deben cumplirse para que un diseño sea perfecto desde el punto de vista acústico. Quizás el Criterio Acústico aún no sea lo ideal y completo que deseamos, o bien nunca lleguemos a entender qué es la excelencia acústica? En esta comunicación intentaremos realizar un repaso de las principales magnitudes de calidad que definen el Criterio Acústico, interrelacionándolo con los pros y contras que afectan al diseño acústico, tanto para salas de concierto, cámara, ópera y teatro.

1_INTRODUCCIÓN

Desde que W.C. Sabine desarrolló la teoría de la Reverberación 1985 y fue el consultor acústico del Boston Symphony may 1905, que es la primera sala del mundo donde como consultor realizó un estudio acústico, empezó a nacer la inquietud, entre los científicos consultores, de los años 1920 - 1950, de cómo obtener la sala ideal?

Entre ellos tenemos F.R. Watson, Vern O. Knudsen, P.E. Sabine, M. Nair, Samuel Lifschits, muchos de ellos habían diseñado salas de concierto.

Incluso Knudsen también realizó un viaje de trabajo para ver y analizar salas de concierto de Europa. Después de todo esto Knudsen escribió [2] que para obtener una sala ideal deben tenerse ciertas condiciones especiales:

1. Los músicos no deben distraerse por ruido ningún ruido ni interior ni exterior.
2. Los espacios para la orquesta, solistas, coro, órgano y la audiencia deben disponerse y articularse adecuadamente.
3. Debe preverse el refuerzo del sonido por reflexión y resonancia mediante un diseño apropiado de las superficies próximas al escenario, lo que dá soporte a

la creación de la música hace más fácil cantar y tocar. Así estos músicos oirán su propia música dentro del abrigo de la música del conjunto.

4. Tener una apropiada reverberación y resonancia de modo que cada nota persista de modo suficiente de manera que el artista sea capaz de determinar de manera precisa su verdadero tono.etc.

5. Deben evitarse focalizaciones en la orquesta, o en el escenario, ni deben producirse ecos o interferencias de cualquier superficie de la sala.

6. Las propiedades acústicas de la sala deberían ser independientes del tamaño de la audiencia. La sala debería ser aproximadamente la misma utilizada para ensayos con sólo músicos, o para sala totalmente llena.

Semejantes declaraciones también las realizó F.R. Watson en 1941. [3]

Importantes son en este sentido también los trabajos de Knudsen – Harris 1950 [4], los trabajos de Hope Bagenal 1930 “The practical Acoustics of Concert Rooms and Opera Houses” [5], y Parkin and Humphreys [6] y Sabine, P.E. [7]

A continuación enumeramos y explicamos las distintas magnitudes de calidad del sonido, en la actualidad existentes, intentando realizar una exposición histórica y a su vez dando soluciones prácticas para lograr la mejora de cada una de ellas.

2_MAGNITUDES ENERGÉTICAS DE EVOLUCIÓN TEMPORAL

A_RESPUESTA IMPULSIONAL

El comportamiento de una sala frente a un estímulo sonoro, cuando se la excita con una señal impulsional, función delta o señal de duración muy breve y de amplitud elevada, se denomina respuesta impulsional, $h(t)$. En cada representación de la respuesta impulsional se muestra la amplitud de la energía sonora (en mPa) en función del tiempo (en ms). Las mediciones acústicas se realizan en sala vacía ya que, esta situación, es más desfavorable en la producción de reflexiones indeseables.

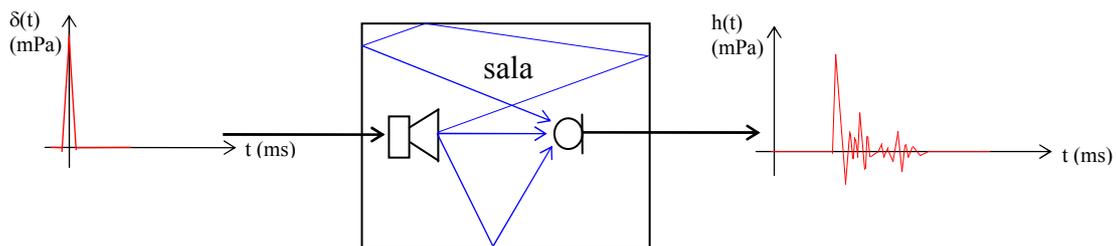


Figura 1.1: Diseño esquemático sobre la obtención de la respuesta impulsional de una sala

La respuesta impulsional contiene toda la información de la sala en la posición de medición. Es evidente que para posiciones distintas del micrófono o de la fuente sonora obtendremos respuestas impulsionales diferentes. De ella se pueden obtener la mayoría de los parámetros que se describen a continuación.

B_REFLEXIONES Y ECOS

De la respuesta impulsional se pueden deducir las reflexiones indeseables que se producen en el recinto y en especial las reflexiones que pueden considerarse de eco. Una representación habitual de la respuesta impulsional

es el ecograma. El ecograma no es nada más que la representación logarítmica de la respuesta impulsional. A menudo es, predictivamente, más válida para la determinación de las reflexiones y los ecos.

$$\text{Ecograma (t)} = 10 \times \log \frac{h^2(t)}{h_{\text{máx}}^2} = 20 \times \log \frac{h(t)}{h_{\text{máx}}} \quad (1)$$

Al estar normalizado respecto al valor máximo, todos los valores representados en un ecograma son inferiores a 0 dB. Para cada reflexión estos valores son indicativos del desnivel respecto al sonido directo. El ecograma representa la energía sonora relativa al sonido directo (en dB) en función del tiempo (en ms).



Figura 1.2: Ecograma de una sala

En este caso el criterio acústico es muy estricto admitiendo como favorables las reflexiones que se producen con un retardo máximo respecto al sonido directo inferior o igual a los 50 ms para salas de conferencias y de teatro, de 60 ms para salas de ópera y de 80 ms para salas de conciertos. Así, por ejemplo, una reflexión importante más allá de los 50 ms puede resultar favorable para música y nada deseable para voz. Así, si el sonido directo ha llegado al cabo de t_d ms (milisegundos) y una reflexión importante al cabo de t_r ms, ésta se considerará perjudicial si ha llegado con un retardo superior ($t_r - t_d$) a:

$$t_r - t_d > \begin{cases} 80 \text{ ms} & \text{para música} \\ 60 \text{ ms} & \text{para ópera} \\ 50 \text{ ms} & \text{para palabra} \end{cases}$$

Estos reflexiones retardadas pueden ser tolerables si éstas se desvanecen contenidas dentro del decaimiento de la curva de reverberación.

El factor de mérito definido para los ecogramas viene a penalizar esas reflexiones importantes producidas más allá de los límites temporales indicados anteriormente y que superan el comportamiento de la caída de la reverberación..

Así, para cualquier de los casos (música, ópera, teatro) el factor de mérito sería:

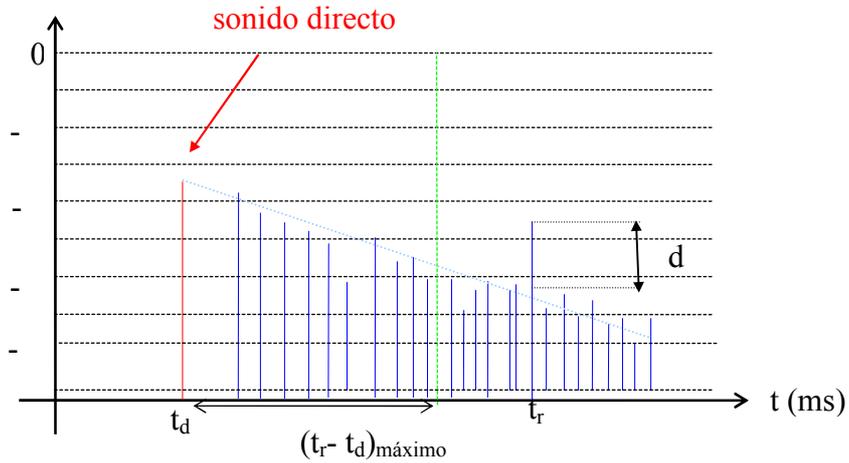


Figura 1.3: Obtención de d (dB) a partir del ecograma

$$M_{\text{ecograma}} = \begin{cases} 1 & \text{para } d \leq 0 \\ 0.5 & \left\{ \begin{array}{l} (10-d)/10 \\ \text{para } 0 < d < 10 \end{array} \right. \\ 0 & \text{para } d \geq 10 \end{cases} \quad (2)$$

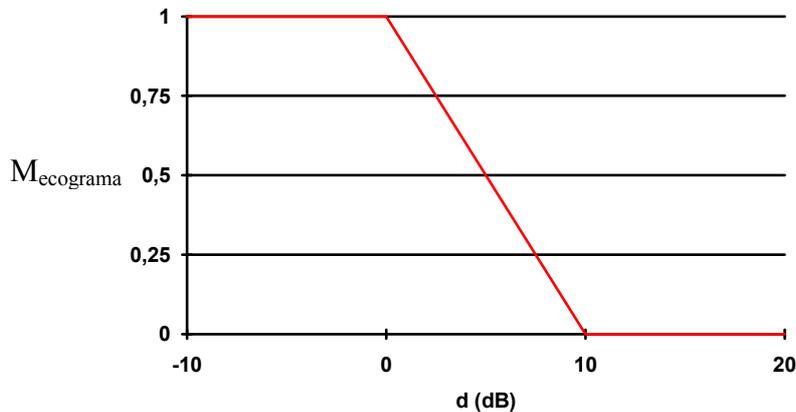


Figura 1.3: Factor de mérito para un eco

C_TIEMPO DE RETARDO INICIAL DEL SONIDO (ITDG)

Del ecograma también se obtiene el tiempo de retardo inicial del sonido (Initial Time Delay Gap). El ITDG, correspondiente a un punto de la sala, es el intervalo existente entre la llegada del sonido directo y la primera reflexión significativa en dicho punto, considerando las bandas de frecuencia entre 125 Hz y 4 kHz. Este ITDG fue por primera vez propuesto por L.L:Beranek [1].

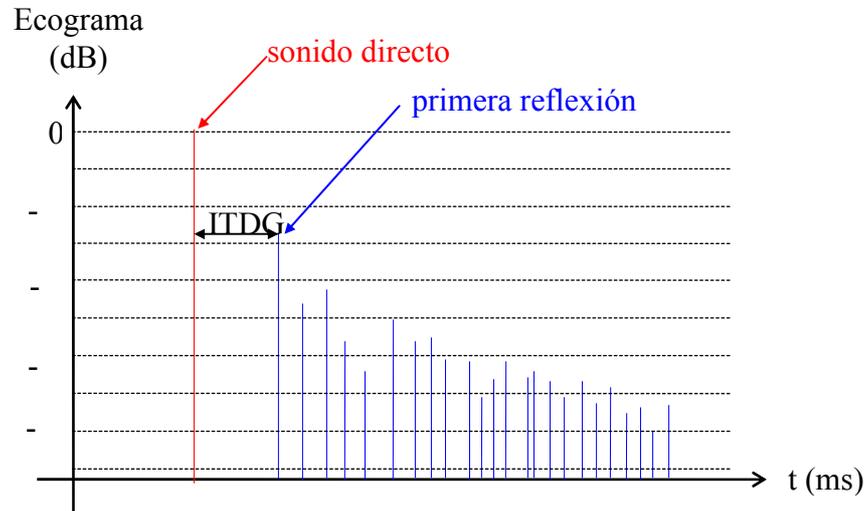


Figura 1.4: Obtención del ITDG a partir del ecograma

El valor recomendado de este parámetro varía según distintos autores. No obstante, conviene que sea inferior a los 20 ms admitiendo, como máximo, un valor de 40 ms.

El ITDG se corresponde con la impresión subjetiva de intimidad sonora, según Beranek. La intimidad viene a indicar el grado de conexión o identificación entre el oyente y la fuente sonora, o sea, si el oyente se siente inmerso o distante de la actividad hablada o musical que está escuchando.

Este parámetro se mide utilizando la respuesta impulsional, o el ecograma, y también se puede medir por frecuencias en bandas de octava.

El factor de mérito de este caso sería:

$$M_{\text{intimidad}} = \begin{cases} 1 & \text{para } 0 < \text{ITDG} \leq 20 \text{ ms} \\ 2 - (\text{ITDG} / 20) & \text{para } 20 < \text{ITDG} < 40 \text{ ms} \\ 0 & \text{para } \text{ITDG} \geq 40 \text{ ms} \end{cases} \quad (3)$$

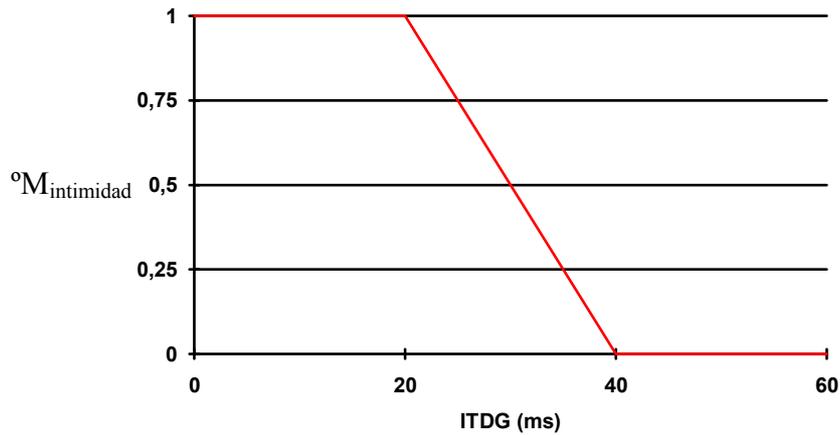


Figura 1.4: Factor de mérito para un valor dado de ITDG

Este parámetro depende en realidad de la energía lateral producida esencialmente por las paredes laterales, y algunas de otras superficies, como propuso M.Barron [8] (1971). Así tenemos que las salas relativamente estrechas, con proporción cercana a la áurea, tienen muy buenas reflexiones laterales y un corto ITDG dando una muy buena impresión espacial, como advirtieron Barron_ Marshall [9],(1981).

D_TIEMPO REVERBERACION.

Cuando se para una fuente sonora que estaba radiando en un recinto determinado, un oyente, situado en la sala, seguirá oyendo el sonido durante un lapso de tiempo en que la energía presente en la misma tarde en ser absorbida por sus superficies límites.

La ciencia acústica o la acústica de salas nació con Wallace Clement Sabine, aproximadamente allá el 1895. El fue profesor asistente en Harvard. Cinco años de investigación le permitieron desarrollar su fórmula de cálculo de la reverberación: $T_a = cte$. La fórmula de la hipérbola en donde T es el tiempo de reverberación, medido en s, que es inversamente proporcional a la absorción de una sala. Una fórmula muy sencilla [10], que vale:

$$T = 0.162 V / a, \text{ donde } a = S\alpha, \quad (4)$$

Donde a son las unidades de absorción en m^2
y S la superficie total de paredes del recinto y α
el coeficiente de absorción acústico medio
(media aritmética de los coeficientes de absorción de la
sala), y V el volumen del recinto en m^3 .

Como mas absorbentes sean las superficies, menor será el T. Una sala con un T elevado se denomina *viva* mientras que una con un T bajo se la califica de *apagada*.

Subjetivamente el tiempo de reverberación se interpreta como el tiempo de persistencia de un sonido en un recinto hasta hacerse inaudible. Pero técnicamente se le define como el tiempo (s) que transcurre desde que el foco emisor se para, hasta que el nivel de presión sonora establecido en la sala haya disminuido en 60 dB.

Según normativa de ensayo, la pendiente que debe escogerse para la determinación del T debe hallarse entre los niveles -5 dB a -35 dB del proceso de decaimiento del sonido.

El T de una sala varía con la frecuencia considerada. Generalmente, para salas destinadas a aplicaciones musicales: música sinfónica, ópera, cámara y teatro T es algo mayor a baja frecuencia y va disminuyendo a medida que la frecuencia aumenta. Si este espectro típico de reverberación sigue unas proporciones adecuadas se le reconoce con el nombre de **curva tonal**, que debe variar según sea el uso de la sala. Esta curva se halla relacionada con las especificaciones que se formulan para los índices de calidez, a veces denominado “warmth o bass ratio”, y el índice de brillo.

Antes del 1990 la medición del T se realizaba con la ayuda de un nivel registrador gráfico, la sala se excitaba con un sonido estacionario emitido por una fuente sonora que se interrumpía de repente y entonces se registraba la razón de decaimiento del sonido con el tiempo. Como fuentes sonoras se utilizaban ruidos blanco, rosa y a veces el sonido de pájaro, “tone warble”, siendo ahora el tipo de sonido el pseudo aleatorio MLS (maximum sequences” y la fuente sonora se le denominaba fuente isotrópica, que ahora actualmente es la dodecaédrica.

Pero entonces Manfred Schröder en 1965, [11] inventó un procedimiento, que es ahora el MLS, que elimina la dificultad del inicio de la curva de reverberación que varíe considerablemente de una fuente de excitación a otra.

La medida de este parámetro conviene hacerla a las frecuencias de bandas de octavas desde 125 Hz a 4 kHz.

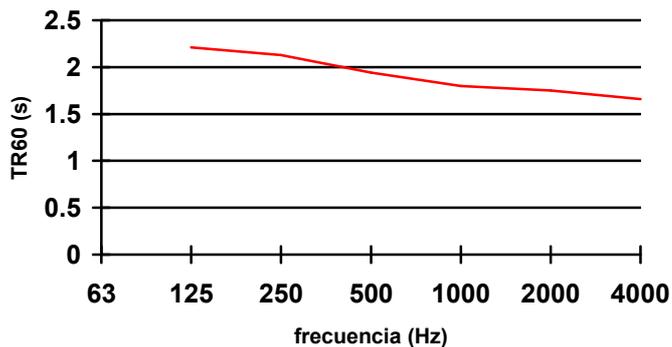


Figura 1.5: Forma típica del tiempo de reverberación en una sala destinada a música sinfónica

El tipo lineal de curva de decaimiento lineal de una sola pendiente se muestra en la figura 1.6. A esta forma lineal usualmente se la reconoce como propia de un campo difuso o también de un espacio Sabínico, puesto que Sabine trabajó bajo la hipótesis de campo difuso o de reparto uniforme de la absorción en la sala, que en su caso era de baja absorción.

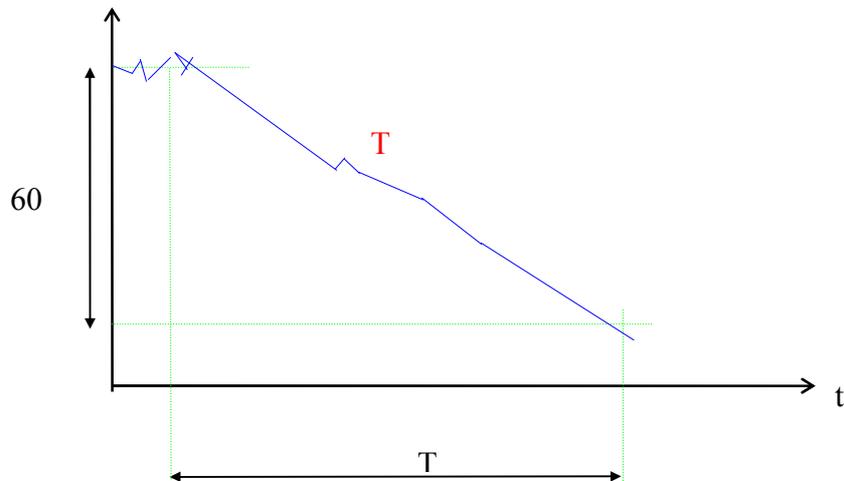


Figura 1.6: Forma de la curva de decaimiento tipo lineal campo difuso

No obstante la fórmula de W.C. Sabine dió un error importante en la predicción del tiempo de reverberación del Boston Symphony Hall que le tuvo apesadumbrado hasta su muerte. El error fue subsanado por L.L. Beranek [1] quien descubrió que la absorción debe darse por unidad de área m^2 , en este caso área de audiencia, y no por unidad de objetos, en este caso el número de personas. El eminente científico L.L. Beranek descubrió que la potencia absorbida por el área de audiencia, coro y orquesta, incrementa de manera proporcional al área del suelo que éstos ocupan, casi independientemente del número de personas sentadas en esta área. Una corrección arista se añade a las áreas de audiencia y coro. Con estas hipótesis son válidas las siguientes densidades de asientos: 0.5 a 0.75 m^2 .

Otras teorías fueron formuladas con la hipótesis de distribución uniforme de la absorción o campo difuso, entendido como reparto uniforme de la energía sonora en la sala, como son las debidas a C.F. Eyring [12], (1930), Norris [13], (1932) G.A. Sette, (1933) [14], G.A. Millington [15], (1932) y muy posteriormente H. Kuttruff, (1979) ([16]).

Tratando la distribución de no uniformidad de la absorción o bien campo sonoro no difuso, es decir in-homogeneidad en el reparto de la energía en la sala tenemos la aproximación empírica de Fitzroy D., (1959) [17], y anterior a esta formulación existía en el libro de Hope Bagenal (1944), [18], una definición intuitiva de la reverberación de una sala en la que se indicaba que el tiempo de reverberación se componía en valor medio de los periodos de reverberación que se establecen entre los tres pares de paredes paralelas del recinto, sin indicar cómo se calculaban estos periodos ni su valor medio. Muy posteriormente a esta propuesta y con el mismo propósito de conseguir una formulación, que permitiera calcular el tiempo de reverberación para el caso no difuso y coincidiera con Sabine y Eyring para el caso difuso, fue emitida por H. Arau - Puchades, [19], (1988). Esta teoría supone una secuencialidad de las reflexiones entre paredes paralelas, o enfrentadas, como se supone en las teorías de Sabine y Eyring, y una simultaneidad entre paredes perpendiculares. Y finalmente efectúa una aproximación logarítmico normal de los coeficientes de absorción, que son proporcionales a las razones de decaimiento del sonido

en cada dirección, para conseguir una compatibilidad del libre camino medio $4V/S$ que obedece a una ley Gaussiana.

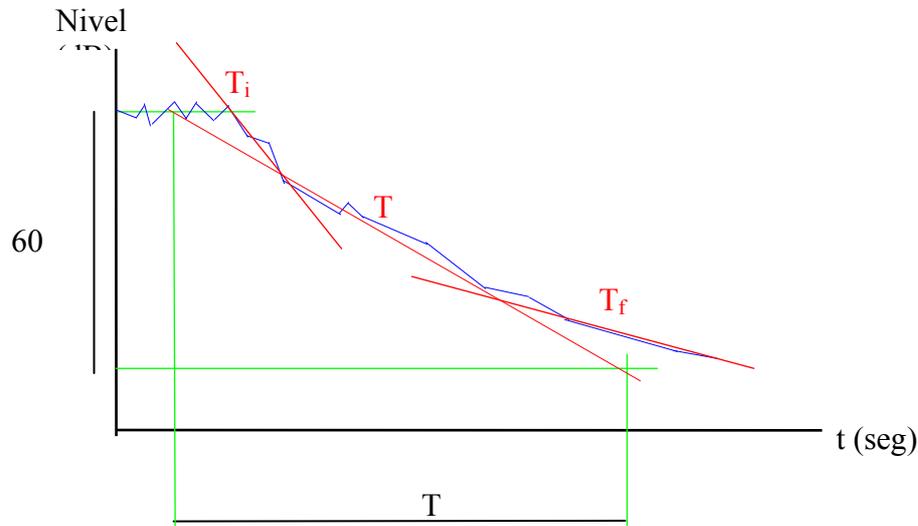


Figura 1.7: Forma de la curva de decaimiento tipo no lineal campo no difuso

El criterio acústico establece que, para sala llena con audiencia y para un volumen determinado, el tiempo de reverberación medio $T_{mid\ optimo}$ (valor medio de los valores de T de 500 y 1000 Hz) debe estar entre un valor máximo y un valor mínimo escogidos para la aplicación concreta de uso a la que esté destinada la sala: sea palabra teatro o conferencia, música de cámara, o bien música sinfónica. Estos son, deducido por H.Arau, [20]:

Concierto:	$T_{mid\ optimo\ max} = 0.600 V^{0.1325}$	
	$T_{mid\ optimo\ min} = 0.5125 V^{0.1328}$, (5a)
Cámara:	$T_{mid\ optimo\ max} = 0.5123 V^{0.1328}$	
	$T_{mid\ optimo\ min} = 0.4245 V^{0.1331}$, (5b)
Ópera:	$T_{mid\ optimo\ max} = 0.509 V^{0.1325}$	
	$T_{mid\ optimo\ min} = 0.396 V^{0.1273}$, (5c)
Teatro:	$T_{mid\ optimo\ max} = 0.368 V^{0.1505}$	
	$T_{mid\ optimo\ min} = 0.264 V^{0.1394}$, (5d)

Estas curvas han sido determinadas por regresión de las propuestas de muchos autores, algunos citados, y casos propios.

Ahora estamos en condiciones de definir la sala ideal como aquella sala que cuando se ocupa (con audiencia) obtiene el Tiempo de Reverberación óptimo que se ha definido en (5a) a (5d), según sea el caso, y cuando la sala esté vacía debe tener unas butacas que den una absorción acústica parecida a la de la audiencia sobre butacas. Esto cumpliría el punto 6 definido por Vern O. Knudsen indicado en la sección 1. En este caso puede predecirse el tiempo de reverberación, a frecuencias medias) T_{mid} según indica H.Arau, que, nosotros la denominamos ley del dimensionado, [21]:

$$V / S_A = 7.361 (1+\beta) T_{mid} \quad , (6)$$

$V\ m^3$ es el volumen sala , escenario músicos y coro, en salas de concierto y salas de cámara.

En salas de teatro y ópera V es el volumen de la sala sin incluir el palco escénico.

S_A es el área de audiencia que puede valer entre 0.6 a 0.74 pero

tomando como valor medio: 0.7 m² / butaca

En el que el caso habitual es $\beta = 0$, ver [20]. [21]. El caso general debe verse en [20]

En esta propuesta los materiales de la sala se se han supuesto tienen una absorción máxima del orden de 0.05 y la absorción importante se debe tan sólo a la audiencia.

Si el T_{mid} es superior al T_{mid} óptimo, según el caso que corresponda, esto significaría que sobra volumen o falta audiencia, o en todo caso le falta absorción adicional, lo cual debe sopesarse con mucho cuidado si hay que ponerla o no, pues pueden haber otros factores que aconsejen no hacerlo.

E_ CALIDEZ

La calidez y el brillo son dos parámetros que se obtienen a partir del T y que dan una idea de la respuesta de la sala a baja y a alta frecuencia.

Se dice que una sala presenta calidez acústica si presenta una buena respuesta a las frecuencias graves. Como medida objetiva de la calidez, se suele utilizar la relación entre el valor medio del T a frecuencias graves (125 Hz y 250 Hz), T_{low} , y el valor medio del T a frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz), T_{mid} .

$$I_{calidez} = \frac{T(125Hz) + T(250Hz)}{T(500Hz) + T(1kHz)} = \frac{T_{low}}{T_{mid}}, \quad (7)$$

La palabra calidez se ha adoptado en el léxico acústico para representar la riqueza de baja frecuencia, la suavidad y la melosidad de la música en la sala. El criterio acústico para música es muy estricto indicando que la calidez valga 1.2 como valor óptimo; no obstante, para teatro puede valer desde 0.9 hasta 1.3, siendo bueno tender al valor 1.1. Para aumentar la calidez o reducirla deben utilizarse resonadores membrana.

F_ BRILLO

De forma similar, se dice que el sonido de una sala es brillante si presenta una buena respuesta a frecuencias altas. El brillo de una sala depende fundamentalmente de la relación entre el valor medio de los T a frecuencias altas (2 kHz y 4 kHz), T_{high} , y el valor medio de los T correspondientes a frecuencias medias, T_{mid} .

El adjetivo brillante se ha elegido como indicativo de que el sonido en la sala es claro y rico en armónicos.

$$I_{brillo} = \frac{T(2kHz) + T(4kHz)}{T(500Hz) + T(1kHz)} = \frac{T_{high}}{T_{mid}} \quad (8)$$

El valor de esta magnitud tiene que ser lo más alto posible, teniendo presente que es difícil que pueda llegar a 1 debido a la absorción del aire, pero intentando que no sea en ningún caso inferior a 0.8. Así, en este caso, sólo se define un factor de mérito apto para música y teatro.

G_ TIEMPO DE REVERBERACIÓN INMEDIATO “EARLY DECAY TIME” (EDT)

El EDT se define como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor deja de emitir sonido, hasta que el nivel de presión sonora ha disminuido en 60 dB, calculado según la pendiente correspondiente a los primeros 10 dB del decaimiento sonoro. Frecuentemente, la pendiente de esta

zona puede ser mas corta o mas larga que la caída correspondiente a 10 dB, por lo que denominamos al tiempo de reverberación asociado a esta pendiente tiempo de reverberación inmediato, T_i , lo cual se ajusta mas a la realidad del fenómeno que no al corsé del lenguaje normativo. Esta medida tiene mucho que ver con lo que pasa con las primeras reflexiones que se producen en un recinto.

En una sala con difusión homogénea del sonido, lo que implica la existencia de una distribución uniforme de reparto de la absorción en ésta, la caída del nivel de presión sonora es prácticamente lineal. Por tanto, en esta situación no habrá poca o ninguna diferencia entre los valores del T y del EDT obtenidos. Cuando se tiene distribución no uniforme de la absorción en el recinto, y éste es el caso real de todas las salas, los valores de EDT son generalmente menores que los del T. Efecto que también se produce en recintos acoplados de características acústicas muy diferentes. En [19] y completado en [20] , H.Arau propuso un método de cálculo del EDT como consecuencia de su teoría de la reverberación.

Igual que en el caso del T, el EDT varía en función de la frecuencia y se mide siguiendo el método de Schröder.

El EDT está más relacionado con la impresión subjetiva de la reverberación de un recinto que el T. Esto querrá decir que una sala con unos EDT substancialmente menor que T sonará, desde un punto de vista subjetivo, más apagada para música pero más inteligible para la voz. En el caso de teatros resulta adecuado, [20] , que el valor del EDT_{mid} esté entre $0.6T_{mid}$ y $0.75T_{mid}$, para ópera entre $0.75T_{mid}$ y T_{mid} , y para salas de concierto entre $0.9T_{mid}$ y T_{mid} .

3_RELACIONES ENTRE MAGNITUDES ENERGÉTICAS

A_ DEFINICIÓN (D_{50})

Matemáticamente el Índice de definición, definido por Thiele, [22], se expresa mediante la siguiente relación:

$$D_{50} = \left| \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} * 100 \right| (\%), \quad (9)$$

donde $p(t)$ es el valor de la presión sonora instantánea en punto receptor, producido por un sonido impulsional emitido desde una fuente sonora. La integración se inicia después la llegada de la energía sonora directa en el punto receptor.

Un valor bajo de la definición implica que la energía sonora reflejada que se produce dentro de los 50ms, después de la llegada del sonido directo, es pequeña, en relación a la energía sonora reflejada total que alcanza al punto receptor.

Un recinto con un índice de definición pequeño se percibe como poco íntimo, y normalmente ello lo produce un exceso de tiempo de reverberación, es decir que la sala sea muy viva.

Una sala dedicada a conciertos que tiene buena acústica, en la zona de las frecuencias centrales de 500 y 1000 Hz, presenta un índice de definición menor a 0.5 (50%). En las salas de concierto, a medida que el Índice de definición aumenta, subjetivamente tenemos la impresión de que la calidad acústica del recinto empeora.

Si la definición del sonido incrementa, ello quiere decir que la sala se halla mejor preparada para la expresión hablada, como puede ser necesario en salas de teatro, o bien salas de conferencia. Así cualquier valor de D igual o superior a 0.7 es un valor adecuado para este tipo de salas.

En salas de ópera la situación es intermedia entre la música y la voz, con prevalencia hacia la música, por lo que el valor D preferible es D = 0.5 a 0.6, cuando el sonido se emite del escenario.

Pero cuando el sonido se emite desde el foso entonces es mejor que sea D = 0.3 a 0.5

B_ÍNDICE DE CLARIDAD MUSICA C₈₀

El índice de claridad matemáticamente se expresa mediante la siguiente relación:

$$C_{80} = 10 \log \left| \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right|, \text{ dB}, \quad (10)$$

También se denomina "Early to Late sound index" siendo p(t) la respuesta impulso en la posición del receptor, con t=0 arranca el sonido directo.

Esta expresión nos da idea de la sonoridad de la música. Esta relación se indica en dB y nos da información, en términos logarítmicos, de la cantidad de energía sonora inmediata que se produce dentro de los primeros 80 ms respecto a la energía sonora tardía que se produce después de transcurridos los 80 ms.

Por ello tenemos que un C₈₀ alto, significa que la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía, entonces diremos que el sonido es muy claro. Esto quiere decir que dentro de los primeros 80 ms se producirán muchas más reflexiones que provienen de paredes o techos próximos al oyente, que reflexiones generales debidas a restantes superficies de la sala. Cuando esto sucede obtendremos generalmente que el tiempo de reverberación inmediato, dentro de los primeros 10 dB de caída, llamado EDT será mucho más pequeño que el tiempo de reverberación medio del recinto.

Este fenómeno es altamente detectado en balcones y en anfiteatros en los que el techo sea relativamente bajo, y en techos de salas en que no se produzca la difracción del sonido y que la reflexión especular sea muy direccional e intensa hacia el oyente

En salas de concierto, según Barron [23], establece que el valor óptimo del Índice de Claridad, en las frecuencias centrales, se halle comprendido dentro del siguiente intervalo: -2 dB < C₈₀ < 2 dB, aunque Reichardt et al [24],

sostienen que C₈₀ no debe ser nunca inferior a 0 dB, y Lehmann et al. [25], sugiere que C₈₀ no debe ser inferior a 3 dB. Así por tanto, nosotros estableceremos como rango de compromiso que C₈₀ debe hallarse entre:

Salas de concierto: $-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$

No tenemos noticia que se haya establecido anteriormente una clasificación del Índice de Claridad óptimo para salas de ópera o para teatros y salas de

conferencias, pero sin embargo de acuerdo a nuestra experiencia emitiremos la siguiente:

Salas de ópera: $2 \text{ dB} < C_{80} < 6 \text{ dB}$

Cuando el sonido es emitido desde el escenario

Salas de ópera: $-2 \text{ dB} < C_{80} < 4 \text{ dB}$

Cuando el sonido es emitido desde un foso bien diseñado

Salas de teatro: $C_{80} > 6 \text{ dB}$

C_ÍNDICE DE CLARIDAD LENGUAJE C₅₀

Una fórmula totalmente paralela a la anterior, [26], es la expresión (11) que nos indica la sonoridad del lenguaje:

$$C_{50} = 10 \log \left| \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right|, \text{ dB}, (11)$$

Valores apropiados para el lenguaje son. $C_{50} > -1.5 \text{ dB}$

D_CENTRO BARICENTRICO TEMPORAL, C_{tb}

L.Cremer [27] 1982, presentó la propuesta comentando que matemáticamente era posible caracterizar la distribución de una función decreciente positiva, tal como $p^2(t)$, con relación la distancia t (en tiempo), desde el origen $t=0$ mediante los momentos de grado n , relacionado al área total encerrado por la curva,

Para el caso más simple tenemos el caso $n=1$ cuyo momento define la distancia t desde el origen al centro de gravedad del área de la curva de decay, lo cual se muestra en la expresión (12):

$$C_{tb} = \left| \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right|, \text{ s}, (12)$$

Valores del C_{tb} apropiados para música, son: $130 \pm 20 \text{ ms}$.

E_FRACCION DE ENERGIA LATERAL INMEDIATA LE_f

Esta magnitud fue propuesta por Mike Barron y Marshal [28] en 1981 como una medida lineal de la impresión espacial SI que fue deducida mediante pruebas subjetivas con un sistema de simulación. Se mide como la razón entre la energía recibida por un micrófono de figura octeto con su punto nulo apuntando a la fuente y la energía recibida por un micrófono omnidireccional en la misma posición.

$$LE_F = \left| \frac{\int_{0.005}^{0.08} p^2(t) \cos^2 \alpha dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt} \right| , \quad (13)$$

El LE_F se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oído dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía recibida de todas direcciones en el mismo intervalo de tiempo.

Esta relación se mide a las frecuencias de octavas entre 125 a 1000 Hz.

Los valores recomendados para una sala de conciertos están entre 0.10 a 0.35. Barron y Marshall dedujeron:

1. Que en una sala de conciertos, el grado de impresión espacial SI está directamente relacionado a la razón de la energía de reflexión lateral temprana con relación a la energía total de reflexión temprana.
2. Las reflexiones laterales tempranas en las frecuencias entre 125 a 1000 Hz son esenciales para la creación de un alto grado de espacial impresión SI. Frecuencias > a 1500 Hz no contribuyen significativamente sobre el SI.
3. El SI depende del nivel total en la recepción, si la música es muy suave entonces no contribuye en el SI.
4. Las reflexiones del techo no en enmascaran a las laterales de pared.

E_ CORRELACIÓN CRUZADA INTERAURAL IACC

La IACC se define como la correlación cruzada entre las respuestas impulsionales medidas con los dos oídos y esto es indicativo del grado de semejanza existente entre las señales que llegan a los mismos.

Si los dos señales son iguales el IACC valdrá 1, mientras que los señales si son aleatoria mente independientes entonces el IACC será 0.

Hidaka, T [29] define dos IACC: El $IACC_E$, correspondiente a los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo a cada oído, y el $IACC_L$ calculado a partir de los 80 ms hacia delante. En los dos casos la medición se hace utilizando un casco artificial (“dummy head”) y a las frecuencias de 500 a 4000 Hz. El valor medio se denominan: $IACC_{4E}$ i $IACC_{4L}$ respectivamente. Se considera que ambos IACC han de ser inferiores a 0.4.

Se dice que el $IACC_E$ está relacionado con la impresión espacial de la sala. Cuanto más bajo sea mayor será la impresión espacial.

También se dice que el $IACC_L$ es indicativo del grado de difusión conseguido en la sala. Al igual que antes, tenemos que un valor bajo de $IACC_E$ significa que la difusión será suficientemente buena. Esto significa que en la sala de conciertos deberían haber superficies difusoras.

F_ NIVEL TOTAL DE SONIDO $L_T(10)$ TOTAL SOUND LEVEL” O “STRENGTH, G”

El nivel total de sonido, conocido por “Total Sound Level” $L_T(10)$ o “Strength”G, se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente sonora cualquiera, en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por una fuente omnidireccional de la misma potencia situada en campo libre y medido a una distancia de 10 metros de la fuente. Ambos niveles se miden por bandas de octava (desde 125 Hz a 4 kHz).

Es conveniente que los valores de $L_t(10)$ en los distintos puntos de la sala y a las distintas frecuencias de interés sean siempre superiores a 0 dB.

El valor de $L_t(10)$ se corresponde con la impresión de sonoridad de la sala y depende de la distancia al escenario, de la energía de las primeras reflexiones y del tiempo de reverberación (T). No obstante, en [30] puede verse que depende mucho más del EDT que del T, como siempre se había sospechado.

$$M_{TSL} = \begin{cases} 0 & \text{para } (L-L_0) \leq -10 \\ 1 + (L-L_0)/10 & \text{para } -10 < (L-L_0) \leq 0 \\ 1 & \text{para } (L-L_0) > 0 \end{cases} \quad (14)$$

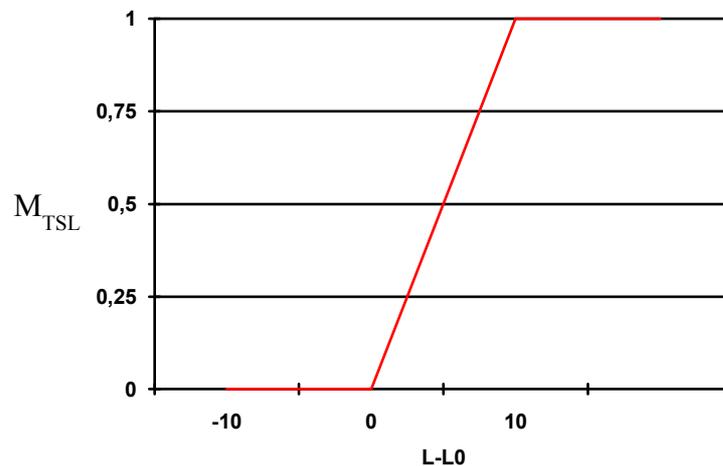


Figura 1.6: Factor de mérito para un valor dado de $L_t(10)$

G_ SOPORTE OBJETIVO ESCENARIOS, ST1

El nivel de la energía temprana, o inmediata, recibida con relación a la energía emitida, es importante para músicos con la posibilidad de escucharse a sí mismos y al resto de la orquesta así como de la facilidad de interpretación conjunta de las diferentes secciones, y en este sentido es posible que la reverberación tenga una influencia negativa en esto.

Basado en este hallazgo, debido a A.C. Gade 1989 [31], tenemos el soporte ST1, que describe la relación entre la energía de las reflexiones inmediatas y la energía del sonido directo. Esta relación es medida a 1 m de la fuente, o sea de la posición de un músico, y 1,2 m del suelo, con todos los atriles colocados en el escenario. La medición con un escenario vacío representará la situación de un pequeño ensemble, pero cuando se incluyen las sillas con los músicos sentados tendremos el caso de la orquesta. La ocupación del escenario es importante en la medición.

En el numerador de la expresión (11) representamos la energía de la energía temprana que nos llega desde la envolvente del escenario y de más allá y en el denominador representamos la energía del sonido directo del músico.

$$ST1 = 10 \log \left| \frac{\int_{0.02}^{0.1s} p^2(t) dt}{\int_0^{0.01s} p^2(t) dt} \right|, \text{ dB} \quad (11)$$

La distancia de 1m citada intenta ser comparable a la distancia entre los oídos del músico con su propio instrumento. El ST1 intenta medir como las reflexiones inmediatas colaboran a mejorar el propio esfuerzo del músico, con relación el sonido directo, como lo oído por él mismo. Un alto ST corresponde a un fuerte sentimiento de soporte y viceversa. Dependiendo del instrumento que se toque el soporte umbral percibido puede corresponder a valores de ST alrededor de -15 a -10 dB. Los valores deben ser indicados en cuatro octavas desde 250 a 2000 Hz, dándose el valor medio, y todos los valores medidos del escenario deben promediarse para dar un valor único del escenario.

Sabemos que los instrumentos de cuerda son los que más soporte objetivo requieren, y los timbales y la percusión son los potencialmente los más altos y requieren menos soporte que las cuerdas.

En salas de concierto de renombre tienen un ST entre -16 a -13 dB, valores más negativos no son apropiados.

Las salas de cámara tienen un ST de -12 a -8 dB

Gade encontró una relación entre los valores de soporte medido en escenarios y el volumen de la plataforma de músicos. Como máximo el área de la plataforma de músicos no debe ser superior a 190 m², lo que no incluye el área del coro. El volumen V es: V= plataforma x altura al techo o reflectores. Con lo que demuestra que el soporte objetivo está inversamente relacionado con el volumen de la zona de músicos.

H_ÍNDICE DE INTELIGIBILIDAD

Los índices de inteligibilidad no son materia fundamental en una sala de conciertos, pero sí en una sala de teatro. En realidad, la inteligibilidad para música no tiene que ser muy buena mientras que para teatros un requisito esencial, quedando el caso de ópera como un intermedio de los dos anteriores.

El índice de inteligibilidad, definido por STI de Lochner-Burger [32], o bien RASTI de Houtgast-Steeneken [33], se obtiene como una función que depende del T, de la relación de la señal respecto al ruido en la sala y de los posibles ecos.

El criterio clasifica la inteligibilidad de la manera siguiente:

Mala:	0 < STI < 0.30
Regular:	0.30 < STI < 0.45
Aceptable:	0.45 < STI < 0.60
Buena:	0.60 < STI < 0.75

Excelente $0.75 < STI < 1$

4.- CRITERIO NC QUE SE DEBE CUMPLIR EN FUNCIÓN DEL USO DEL RECINTO Y CRITERIO DE VELOCIDADES DEL AIRE EN LOS CONDUCTOS DEL AIRE EN FUNCIÓN DEL NC ESCOGIDO: NOISE CRITERIA

La evaluación, [20], del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca sobre un espectador se hace por comparación de los niveles existentes en la sala vacía, con todas las instalaciones en funcionamiento, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC ("Noise Criteria"). Estas curvas son usadas también para establecer el nivel de ruido máximo recomendable para distintos espacios en función de su uso. Es evidente que una sala de conciertos no puede presentar un ruido ambiente muy elevado. Criterio de diseño NC del de fondo en relación a las velocidades máximas admisibles por el criterio acústico según la NC que se requiere cumplir, son:

Nº Posición	Recinto	NC	dB(A)
1	Sala Conciertos	15	25
2	Salas de cámara	15	25
3	Salas de ópera	25	35
4	Salas Teatro	30	35
5	Salas de ensayos	25	35

NC: Nivel de ruido (dB en bandas de octava)

NC	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
15	47	36	29	22	17	14	12	11
20	51	40	33	26	22	19	17	16
25	54	44	37	31	27	24	22	21
30	57	48	41	35	31	29	28	27
35	60	52	45	40	36	34	33	32

Nivel de vibración: Así mismo, el nivel de vibración producido por las instalaciones o cualquier otro agente externo, la evolución temporal de la misma no ha de ser superior a $0,008 \text{ m/s}^2$ (eficaz) en el rango de frecuencias entre 0 y 1000Hz.

v (m/s): Criterio para a sistemas de distribución d'aire en los conductos en relación a la NC a cumplir

Velocidades de aire recomendadas (en m/s)			
Velocidad del aire en el punto terminal	A 3 m del punto terminal	De 3 a 6 m.	De 6 a 9 m.

NC 15 impulsión	1.27	1.52	1.78	2.16
NC 15 retorno	1.52	1.78	2.16	2.54
NC 20 impulsión	1.52	1.78	2.16	2.79
NC 20 retorno	1.78	2.16	2.54	3.3
NC 25 impulsión	1.78	2.16	2.79	3.55
NC 25 retorno	2.16	2.54	3.3	4.06
NC 30 impulsión	2.16	2.54	3.55	4.31
NC 30 retorno	2.54	3.05	4.06	4.82
NC 35 impulsión	2.54	3.05	4.05	5.08
NC 35 retorno	3.05	3.55	4.57	5.84

5_ CONCLUSIONES:

En esta comunicación hemos intentado definir las bases en los que se asienta el criterio acústico, creo que podemos decir que si cumplimos todos los criterios enunciados seguramente obtendremos una muy buena sala, quizás la mejor. Pero nunca sabremos esto porque todo depende del gusto de quien escucha, y todos somos de gustos muy diferentes. Así por tanto es mejor dejarlo al vudú como hemos comentado. Además la desconfianza de los clientes es máxima, pues creen que la Acústica es un misterio, y tienen razón porque mientras no aprendamos a pensar que el sonido son ondas y estudiar como éstas progresan por el espacio arquitectónico sabremos muy poco cómo resolver perfectamente los problemas. Así por tanto el paradigma del enunciado ha quedado sin solución a la espera de que nazca el que haya de crear la Acústica unificada.

6_ REFERENCIAS

- [1] Beranek, L.L. (1962) *Musics, Acoustics and Architecture.*, Wiley, New York.
- [2] Knudsen, o.Vern.(1931) "Acoustics of Music Rooms"J, *Acoust. Soc. Am.*p 434-467.
- [3] Watson, F.R. (1941) *Acoustics of Auditoriums.* Mac Graw Hill, Third ed.
- [4] Knudsen – Harris (1950) "Acoustical Designing in Architecture", I
- [5] Hope Bagenal (1930) "The practical Acoustics of Concert Rooms and Opera Houses"
- [6] Parkin and Humphreys (1958)"Acoustics, Noise and Buildings. Faber and Faber , London.
- [7] Sabine, P.E. *Acoustics and Architecture.* Mac Graw Hill. New York
- [8] Barron, M.(1971) The subjective effects of first reflections in concert halls – The need for lateral reflections, *J.Sound Vib.* 15, 475-494.
- [9] Barron, M – Marshall, A.H. (1981) Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls. *J.Sound Vib.* 77, 221-232.
- [10] Sabine W.C.(1927) *Collected papers on acoustics.*
- [11] Schröder, M.R.(1965)" New Method of measuring reverberation time" *J.Acoust. Soc.Am.* 37, 409-412.
- [12] Eyring, C.F.(1930) Reverberation time in dead rooms, *J. Acoust. Soc. Am.* 1, 217-241.
- [13] Norris R.F. j.– Andréé C.A. (1931) *J. Acoust. Soc. Am.* Vol 3. p. 361
- [14] Sette W.J., (1933), A New Reverberation Time Formula, *J.Acoust. Soc. Am.* Vol.4, p193-210.,
- [15] Millington G.A.(1932), Modified Formula for Reverberation, *J.Acoust. Soc. Am.* Vol 4, p 69- 82
- [16] H. Kuttruff , (1973) *Room Acoustics* , Wiley, New York
- [17] Fitzroy D. (1959) Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption, *J. Acoust. Soc. Am.* Vol 31, p 893.
- [18] Bagenal H. (1941) *PRACTICAL Acoustics and Planning Against Noise.* P 33.
- [19] Arau-Puchades H.. *An improved Reverberation Formulae*, Vol. 65, nº4, 163-180.
- [20] Arau Higini, (1999) *ABC de la acustica Arquitectónica*, Ed. Ceac
- [21] Higini Arau (/1997) Variation of the Reverberation Time of Places of public Assembly with audience size. *Journal of Building acoustics*, Volume 4 Number.

- [22] Thiele R. *Acustica* 3 (1953) p.291
- [23] Michael Barron (1993) *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Ed. E& FN Spon
- [24] Reichardt et al., (1975) *Acustica* nº126
- [25] Lehmann W. (1986) *Acustica.*, Vol 45 nº256.
- [26] Marshall, L.G. (1991) Experience with early – to- late reverberation ratios as a measure of auditorium acoustics, *J. Acoust. Soc. Am.* 89, 1876 (A).
- [27] Lothar Cremer, Helmut Müller and Theodore J.Shultz (1978) *Principles and Applicatios of Room Acoustics*. Ed. Applied Science Publishers.
- [28] Barron M.- Marshall , (1981)
- [29] Hidaka T. Okano T., Beranek L.L. Studies of Interaural Cross Correlation IACC and its relation to subjective evaluation of the acoustics of concert halls. 122 nd Meeting of Acoust. Soc. Am. Houston, Texas, November.
- [30] Higiní Arau (1998), General Theory of the Energy Relations in Halls with Asymmetrical Absorption, *J. Building Acoust.*, Vol 5 nº3.
- [31] Gade A.C. (1985) Objective Measurements in Danish Concrct Halls. *Proc. Inst. Acoust.* 7, 9-16.
- [32] Lochner j.P.A.-Burger J.F. (1960) *Acustica* Vol 8 nº1 1958 y *Acustica* Vol 10 nº394.
- [33] Houtgast T.-Steeneken ,H. (1985) A review of the MTF concept in rooms Acoustics and its use for estimating Speech Intelligibility in Auditoria, *J.Acoust, Sic. Am.*, Vol 77 nº3.