

5 - ESPACIO SONORO

5.1 - PARÁMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS PARA LA VALORACIÓN DE SALAS.

Hasta hace no muchos años, el tiempo de reverberación era, prácticamente, la única cualidad objetiva que se tenía en cuenta en el diseño de salas y auditorios. Pero este parámetro no nos proporciona información sobre muchas características importantes que presenta una sala, ni nos permite detectar fallos acústicos en el diseño de ésta. Además, salas acústicamente diferentes pueden tener tiempos de reverberación similares. Por tanto, surgió la necesidad de buscar otros parámetros que complementaran y perfeccionaran el estudio acústico de una sala.

5.1.1 - Reverberación y Tiempo de Reverberación, T, Rt o Tr.

La reverberación se define como la mayor o menor persistencia del sonido que se oye en una sala después de que la fuente cesa súbitamente de emitir. Es una magnitud muy adecuada para caracterizar un aspecto muy importante de la acústica de una sala.

Lo importante es encontrar un único parámetro representativo de las cualidades acústicas de la sala que pueda obtenerse experimentalmente y que sea independiente del punto de estudio. Wallace Clement Sabine descubrió que la reverberación de un recinto era inversamente proporcional a la cantidad de absorción del mismo, había nacido la célebre ecuación de reverberación de Sabine, empleada universalmente hasta nuestros días como parámetro primordial para la caracterización acústica de una sala.

Sabine probó que la reverberación era un parámetro adecuado para tal fin. Para ello midió la duración de la audibilidad de la reverberación, comprobando que era la misma en todos los puntos del recinto. Pero la reverberación no sólo depende de la sala sino también de la intensidad de la fuente. Así, Sabine empleó distinto número de tubos de

órgano soplados con igual presión de aire, observando que la energía decrecía en la misma fracción de su valor inicial.

Como la pérdida instantánea de energía es siempre un porcentaje constante de la cantidad instantánea de energía presente, el decrecimiento se puede expresar como:

$$E = E_0 \cdot e^{-Kt}$$

con:

- K una constante característica del recinto llamada constante de amortiguamiento
- t el tiempo transcurrido a partir del cese súbito de la emisión de sonido, medido en segundos

De la misma forma, si la intensidad de emisión es I_0 , al cabo de un tiempo t la intensidad será:

$$I = I_0 \cdot e^{-Kt}$$

Sabine definió el tiempo de reverberación T como el tiempo necesario que ha de transcurrir para que el valor de la energía caiga una millonésima parte del valor inicial. En escala de niveles se definió como el tiempo necesario para que el nivel de energía caiga 60dB.

Lo que mide realmente T es la velocidad de caída del sonido dentro de una sala. Si en la expresión del decrecimiento de energía se hace $t = T$ y se sustituye E por $E_0 / 10^6$ resulta:

$$K = \frac{T}{6 \ln 10} = \frac{T}{13.8}$$

Tan importante como hallar el tiempo de reverberación es preverlo y ajustarlo a un valor determinado según las características del recinto en proyecto. Para ello existen diversas expresiones, siendo las descritas a continuación las más empleadas:

1. Fórmula de Sabine: tras numerosos experimentos basándose en la ley exponencial de la caída de energía, Sabine estableció la siguiente fórmula:

$$T = \frac{0,161V}{\sum \alpha_k S_k} \quad (\text{en s})$$

con:

- V el volumen de la sala (en m³).
- S_k las diferentes superficies de la sala (en m²)
- α_k los coeficientes de absorción de las superficies (adimensional).

La cantidad de energía sonora que desaparece de la sala en cada segundo, cuando la unidad de energía incide perpendicularmente sobre una pared con área superficial S y coeficiente de absorción α es:

$$A = \alpha S$$

donde A se denomina **Área de Absorción Equivalente**.

En general, los límites de una sala están formados por materiales diferentes, ocupando S_k áreas diferentes y con α_k coeficientes de absorción diferentes, por lo que el área de absorción equivalente total de la sala:

$$A_{\text{tot}} = \sum_{k=1}^n \alpha_k S_k$$

siendo n el número de superficies con diferente valor de α.

Para caracterizar con un solo número el efecto acústico de los contenidos de una sala se emplea el coeficiente de absorción sonora de valor medio, resultado de promediar aritméticamente sobre la totalidad de las superficies de la sala:

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_K S_K}{\sum S_K}$$

El valor del coeficiente de absorción de un material está comprendido entre 0 (material totalmente reflectante) y 1 (absorción total). El valor de α está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

Según la expresión, T está determinado por el volumen de la sala y por el área de absorción equivalente de la misma, independientemente cómo está distribuida la absorción.

En un recinto vacío la reverberación suele ser alta, disminuyendo a medida que se introduce el mobiliario (especialmente si es tapizado), y, sobre todo, la audiencia.

Realmente la ecuación de Sabine completa incluye un término referido a la absorción del aire:

$$RT = \frac{0'161 V}{A_{tot} + 4mV} \quad (\text{en sg})$$

En esta expresión, como puede comprobarse, aparece un nuevo término, m , siendo éste la constante de atenuación del sonido en el aire (en m⁻¹)

2. Fórmula de Eyring: el planteamiento de Eyring difiere del de Sabine al suponer que la absorción no se realiza de forma continua y, por tanto, sin seguir una ley matemática. Antes de exponer su expresión, conviene analizar dos conceptos: camino libre medio y exponente de absorción.

• **Camino libre medio:** la onda sonora recorre diferentes trayectos entre choque y choque con las superficies límites de la sala. Estos caminos dependen de la forma de la sala y de la distribución de las direcciones del sonido reflejado, pero no de los coeficientes de absorción de las superficies reflectantes. Así, para una onda que sufre un gran número de reflexiones N en un tiempo t , se define la denominada longitud media del camino libre como :

$$l_m = \frac{ct}{N} \quad (\text{en m})$$

De forma que si distintas ondas experimentan en promedio el mismo número de reflexiones durante un tiempo de observación determinado, todas habrán recorrido el mismo camino libre medio.

Este camino se puede expresar en función del volumen de la sala y de la suma de las superficies que la forman según:

$$l_m = \frac{4V}{S} \quad (\text{en m})$$

• **Exponente de absorción:** Si I_0 es la intensidad inicial de la onda sonora, tras la primera reflexión su valor se reducirá hasta $I_0 (1 - \alpha)$, tras dos reflexiones valdrá $I_0 (1 - \alpha)^2$ y al cabo de N reflexiones el valor será $I_0 (1 - \alpha)^N$. Así, en un instante t , la intensidad será:

$$I(t) = I_0 (1 - \alpha)^{\frac{ct}{l_m}} = I_0 \cdot e^{\left[\ln(1 - \alpha) \right] \frac{ct}{l_m}}$$

considerando $N = ct / \ln$

Con esta ecuación pasa de describirse el decrecimiento de la intensidad de una función continua a hacerlo con una de tipo escalón, lo que equivale a reemplazar α por $\alpha' = -\ln(1 - \alpha)$, que es lo que se llama exponente de absorción y describe la caída que se produce en el tiempo necesario para que se efectúe un recorrido del camino libre medio.

Con todo esto, Eyring propuso la siguiente fórmula para el tiempo de reverberación:

$$T = \frac{0'161V}{s \left[-\ln \left(1 - \frac{\sum \alpha_K S_K}{\sum S_K} \right) \right]} \quad (\text{en s})$$

3. Fórmula de Millington – Sette: En este caso se considera cada superficie con su coeficiente de absorción correspondiente y que cada onda sonora se encuentra en su camino las paredes de forma sucesiva. Su expresión es:

$$T = \frac{0'161V}{\sum \alpha'_{K} S_K} \quad (\text{en s})$$

Se observa que si algún α vale la unidad, la superficie correspondiente ha de multiplicarse por el $\ln 0 = \infty$, con lo que el tiempo de reverberación resultará ser cero, en contradicción con la realidad.

Consideraciones a tener en cuenta para las tres fórmulas:

- Las tres suponen la existencia de buena difusión sonora.
- La absorción continua que requiere el supuesto de Sabine para deducir su fórmula, implica un reparto homogéneo de los absorbentes con un coeficiente de absorción bajo

para que la lentitud de la extinción permita la regular distribución de la energía sonora. Sin embargo, es de cálculo más sencillo que las otras dos.

- Aplicar el exponente de absorción de Eyring requiere una absorción uniforme, lo que implica que los coeficientes de absorción de todas las superficies han de ser muy parecidos.

- En el criterio de Millington – Sette se condiciona la reflexión al tamaño de la superficie. Aquí lo importante no es la uniformidad de los absorbentes sino que la superficie de los mismos sea suficientemente grande como para posibilitar la correcta reflexión de todas las longitudes de onda. Además, si el coeficiente de absorción de algún material vale la unidad, dicha fórmula no puede aplicarse.

Por tanto, la fórmula de Sabine se emplea:

- Si el coeficiente de absorción medio es $\leq 0,2$.
- Si los absorbentes están distribuido de forma homogénea.
- Si los diversos coeficientes de absorción no ofrecen muchas garantías.
- En estudios previos y, en general, para poca exactitud.

La expresión de Eyring es aplicable en los siguientes casos:

- Para una distribución homogénea de los materiales absorbentes.
- Para un coeficiente de absorción medio $> 0,2$.
- Si se conocen con exactitud los diversos coeficientes de absorción.
- Para cálculos más precisos.

Por último, Millington – Sette se aplica:

- Si no hay uniformidad en la distribución de los materiales absorbentes.
- Si las superficies son suficientemente grandes y no hay ninguna fuertemente absorbente.

- Si se conocen con exactitud los coeficientes de absorción.
- Si se requiere precisión de cálculo.

Independientemente de la fórmula empleada para el cálculo, el valor más representativo del tiempo de reverberación es el denominado R_{tmid} , que se obtiene como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz.

$$R_{tmid} = \frac{RT(500\text{ Hz}) + RT(1\text{ kHz})}{2} \text{ (en s)}$$

El valor más adecuado de R_{tmid} depende, en general, tanto del volumen del recinto como de la actividad prevista a realizar en el mismo. Cuando se trata de salas destinadas a la palabra, conviene que los valores de RT sean bajos para obtener buena inteligibilidad. Sin embargo, en salas de concierto, son recomendables valores apreciablemente más elevados para que la audición musical resulte óptima. En la siguiente tabla se muestran los valores recomendados de R_{tmid} para diferentes tipos de salas, suponiéndolas ocupadas.

Tipo de sala	R_{tmid} Sala ocupada (sg)
Sala de conferencias	0'7 – 1'0
Cine	1'0 – 1'2
Sala polivalente	1'2 – 1'5
Teatro de ópera	1'2 – 1'5
Sala de conciertos (música de cámara)	1'3 – 1'7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1'8 – 2'0
Iglesias, catedrales (órgano y canto coral)	2'0 – 3'0
Locutorio de radio	0'2 – 0'4

5.1.2 - Tiempo de Caida Inicial, EDT (“Early Decay Time”)

Definido por Jordan, el EDT es el tiempo que tarda una señal bruscamente interrumpida en descender 10 dB, es decir, es el Tiempo de Reverberación correspondiente a la pendiente medida sobre los 10 primeros dB. Este parámetro es similar al que desarrollaron Schroeder, Atal y Sessler, aunque el último, denominado

Tiempo de Reverberación inicial, obtenía el Tiempo de Reverberación a partir de los primeros 15 dB de caída.

Este parámetro presenta especial relevancia puesto que se ha comprobado que un oyente es más sensible a la primera parte del proceso de descenso de energía. Los primeros 10 dB de caída, una vez se ha cortado la excitación y la señal comienza a caer, están muy relacionados con el efecto subjetivo de la reverberación. Puede aplicarse a la determinación del coeficiente de absorción de un material de prueba para medidas de reverberación puesto que la pendiente inicial se relaciona con la constante de amortiguamiento de todos los modos de vibración excitados.

En un espacio muy difuso donde la caída es totalmente lineal, el Tiempo de Reverberación y el Tiempo de Caída Inicial deberían coincidir.

Jordan lo consideró importante por varios aspectos: simplicidad en las medidas, correlación con aspectos subjetivos y posibilidad de comparar los valores obtenidos en modelos a escala con valores obtenidos en salas reales. A partir del Tiempo de Caída Inicial, se obtuvo un nuevo parámetro llamado Índice de Inversión, que se estudia en el siguiente apartado.

Una vez obtenidos los valores del EDT, se puede trabajar de tres formas:

- Se mide el Índice de Inversión a partir del EDT medido en escenario y audiencia.
- Comparación de valores del EDT con los valores del Tiempo de Reverberación medido entre -5dB y -35dB. Es recomendable que el valor de EDT de una sala sea mayor que los valores de Tiempo de Reverberación recomendados.
- Estudio de la variación de EDT para diversas posiciones medidas en la sala. De este modo se puede comprobar la mayor o menor uniformidad del campo sonoro en la sala.

5.1.3 - Índice de Inversión, II

El Índice de Inversión es el cociente entre el Tiempo de subida en el área de audiencia y el del área del escenario, o bien, el cociente entre el Tiempo de Caída Inicial de la sala y el del escenario. Es decir:

$$\Pi = \frac{\text{tr}(\text{área de audiencia})}{\text{tr}(\text{área del escenario})} = \frac{\text{EDT}(\text{sala})}{\text{EDT}(\text{escenario})}$$

Es recomendable que el valor de este parámetro sea ≥ 1 .

5.1.4 - Tiempo de Subida, t_r

Establecido también por Jordan, se define como el tiempo (en ms) necesario para que la señal impulsiva alcance un nivel de -3dB con relación al estado estacionario. Esto, suponiendo que el proceso de crecimiento de la energía del sonido en una sala es complementario al proceso de decrecimiento y que sigue su misma curva pero invertida (según la teoría de Sabine).

Este criterio se basa en el hecho de que la integración (hacia delante) de la respuesta al impulso corresponde a la excitación en estado estacionario. Podemos definir el Tiempo de Subida como el instante en que las energías inicial y final son iguales.

$$t_r = \int_0^{t_r} p^2(t) dt = \int_{t_r}^{\infty} p^2(t) dt$$

Es un parámetro de fácil cálculo, basado en la estructura temporal de la respuesta al impulso y, aunque más crítico que el Tiempo de Caída Inicial explicado, apropiado para el cálculo del Índice de Inversión. Jordan recomendaba que los valores del Tiempo de Subida debían ser menores en el escenario que en la audiencia, y que todos los valores medidos deberían ser menores o iguales que los teóricos.

5.1.5 - Distinción, D

Es posible determinar la distinción a partir de la respuesta al impulso de la sala y se emplea para valorar la acústica de una sala respecto a la inteligibilidad de la palabra. Se define como la relación del sonido útil (para la palabra), y el sonido total. El denominado sonido útil es el que se escucha hasta el límite de perceptibilidad del eco, es decir, 50 ms.

$$D = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Donde:

- D = Coeficiente de Distinción.
- p(t) = Presión sonora instantánea.

Al aire libre esta relación alcanza su valor máximo: la unidad. También puede darse el valor de D como porcentaje.

Thiele esperaba que la inteligibilidad de la palabra fuera mayor cuanto mayor fuese el valor de la Distinción. Razonamiento que parece lógico teniendo en cuenta que si la energía total es pequeña con relación a la energía útil, los sonidos procedentes de la voz de verían menos afectados unos por otros.

Beranek y Schultz introdujeron una modificación en la expresión anterior:

$$\frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p(t)^2 dt} = \frac{1-D}{D}$$

Esta expresión proporciona la relación de sonido reverberante a sonido inicial y se representa en curvas como función de la frecuencia. Definieron así el llamado Índice de Reverberación R, que se explica a continuación.

5.1.6 - Índice de Reverberación, R

Establecido por Beranek y Schultz, se define como diez veces el logaritmo de la relación energía reverberante y energía útil (energía que llega al oyente en los primeros 50 ms), es decir:

$$R = 10 \log \frac{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{1-D}{D}$$

Donde:

- p(t) es la presión instantánea
- D es la Distinción.

Este índice nos informa si una sala es muy reverberante o muy seca. También proporciona una valoración de la sala desde el punto de vista musical.

5.1.7 - Índice de Claridad, C o C₈₀

El concepto de Claridad es similar al de Distinción pero, si bien ésta última resulta útil para la palabra, la Claridad lo es para la música.

El índice de claridad o claridad musical C, indica el grado de separación entre los diversos sonidos individuales integrantes en una composición musical.

Se define como la relación, expresada en dB, entre la energía que llega antes de 80 ms y la que llega después de ese tiempo, tomando como referencia el sonido directo. Desarrollado por Reichardt, quien observó las duraciones más cortas de las notas musicales y de los transitorios de los instrumentos musicales, optando por un valor de límite de perceptibilidad para la música de 80ms (mientras que Thiele optó por un límite de 50ms para la palabra). La elección de dicho intervalo temporal se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de este intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo y, por tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical, constituyendo así las denominadas primeras reflexiones.

La claridad musical no sólo depende de la relación energética que da origen a su definición, sino que también es función de una serie de factores puramente musicales, así como de la habilidad de los intérpretes.

$$C \text{ (dB)} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Siendo $p(t)$ la respuesta al impulso en la posición del oyente con el sonido directo en $t=0$.

Un valor positivo de C_{80} indica que el denominador de la ecuación es menor que el numerador, y que la energía relativa a la zona de las primeras reflexiones es mayor que aquella relativa a las reflexiones tardías. En este caso el sonido percibido presenta una elevada nitidez subjetiva, mientras que al contrario, un valor negativo, indica un sonido menos nítido. Los valores recomendados oscilan entre -2dB y 2dB .

Este criterio, al igual que la Distinción, se obtiene a partir de la respuesta al impulso. Sin embargo, a pesar de su similitud, hay una diferencia en el denominador, puesto que la energía útil para la música se divide entre la energía perjudicial, mientras que en la Distinción, es una relación energía útil a energía total. Este índice, C , intenta

caracterizar la claridad de la música en una sala, siendo el límite superior del numerador de 80 ms, ya que con la música una reflexión es menos detectable que con la palabra.

Existen otros criterios de concepto y definición igual al C_{80} . La diferencia con éste es el límite superior de la energía útil. Disponemos del denominado C_{50} (límite 50 ms), empleado por diversos investigadores para valorar la inteligibilidad de la palabra en las salas. Lochner y Burguer, al estudiar la Relación Señal – Ruido, establecieron un límite superior de la señal útil para la inteligibilidad de 95 ms, y en otras ocasiones el límite empleado ha sido de 35 ms. De los criterios mencionados, ha sido el Índice de Claridad el más empleado a lo largo de la historia.

5.1.8 - Relación Señal – Ruido

Los criterios ya explicados de Distinción, Claridad e Índice de Reverberación, tienen el inconveniente de que un mínimo desplazamiento en el tiempo de llegada de una reflexión potente puede cambiar significativamente el valor del criterio, dependiendo de a que lado del límite de perceptibilidad cae. Este “problema” rara vez ocurre en la práctica, pero para evitarlo, Lochner y Burguer introdujeron un factor de ponderación $a(t)$, dependiente del retardo t y del nivel relativo de la reflexión. Factor cuyo valor decrece desde 1 (para las reflexiones iniciales) a 0 (para las reflexiones posteriores a 95 ms). A la relación ponderada la denominaron Relación Señal – Ruido (aunque debería haberse llamado Relación Señal Ponderada – Ruido), cuya expresión es la siguiente:

$$= \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{perjud}}} = \frac{\int_0^{95 \text{ ms}} p^2(t) a(t) dt}{\int_{95 \text{ ms}}^{\infty} p(t)^2 dt}$$

Encontraron una buena concordancia sobre este índice y la inteligibilidad de la palabra obtenida directamente, al menos cuando el ruido de la sala tuviera aproximadamente el mismo espectro de potencia que la palabra. Intentaban que el parámetro no sólo permitiera predecir la inteligibilidad de forma efectiva, sino que

también sirviera para predecir durante el diseño y construcción de la sala, mediante un modelo a escala de la misma.

Más tarde, Latham, realizó una modificación de la Relación Señal – Ruido obtenida por Lochner y Burguer, relacionándola mucho mejor con la inteligibilidad de la palabra. Obteniendo la siguiente expresión:

$$\left(\frac{S}{N}\right)' \text{ (dB)} = 10 \log \frac{\int_0^{95 \text{ ms}} \alpha(p,t) p^2(f,t) dt}{\int p^2(f,t) dt + p_{\text{PNC}}^2 T}$$

Donde:

$S / N' = S / N$ modificada.

α = Fracción de energía útil integrada con sonido directo (medida por Lochner y Burguer)

p = Presión de sonido instantánea en N/m^2 .

t = Tiempo relativo al sonido directo en ms.

f = Octava a 1 kHz.

T = Duración del periodo de medida de la inteligibilidad.

p_{PNC} = Presión equivalente del nivel medio – máximo (aproximadamente L_{10}) del ruido ambiente especificado por la curvas PNC.

Este criterio se ha considerado como un método de aplicación de la inteligibilidad de la palabra en modelos a escala de auditorios, pero dejó de emplearse ya que no tenía en cuenta las fluctuaciones de ruido que se producen en la mayoría de los auditorios.

5.1.9 - Factor de Fortaleza, G

Introducido por Lehmann, la Fortaleza valora el sonido total producido por una fuente en un punto de la sala. De las diversas definiciones de este criterio (aunque en concepto con similares), la más empleada es la dada por la relación entre el nivel de presión en campo libre a 10m de la fuente y el nivel de presión en un punto de la sala.

Es el resultado de restar el L_p a 10 metros del escenario, menos el L_p que se mediría en una cámara anecoica con la misma fuente también a 10 metros de la fuente.

$$G \text{ (dB)} = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt}$$

Con:

- $p(t)$ = Respuesta al impulso en la posición de escucha.
- $p_A(t)$ = Respuesta al impulso a 10 m de la fuente en condiciones de campo libre.

En su último libro, Beranek muestra que los valores de este parámetro oscilan entre 0 y 9 dB, recomendando ser alto para que la sala tenga suficiente margen dinámico.

A partir de la expresión anterior se obtiene el Índice de Fortaleza como:

$G = 10 \log \gamma$ donde γ es la eficiencia acústica de la sala:

$$\gamma_x = \frac{\int_0^{\infty} p^2(x) dt}{\int_0^t p^2(r_s) dt \left(\frac{4\pi r_s^2}{S_0} \right)}$$

Con:

- x = Posición de la sala donde se calcula el parámetro.
- r_s = Posición de referencia, se toma la distancia a 10m.

Los valores de γ normalmente están comprendidos entre 0 y 10. Este coeficiente nos informa sobre la densidad de energía en estado estacionario en un punto de la sala, para una potencia de la fuente dada. Lehmann dice que este criterio no depende del tiempo de respuesta al impulso sino de la localización. Realmente fue Lehmann quien introdujo el parámetro como tal, pero ya anteriormente era descrita por Yamagushi, llamándolo “característica de transmisión del escenario a los asientos”.

5.1.10 - Respuesta de la Sala

Lechmann y Richardt propusieron el índice de Impresión de la Sala, R' , más tarde modificado por Jordan a la hora de valorar el efecto espacial en una sala y que nombró Respuesta de la Sala RR:

$$RR = 10 \log \left[\frac{\text{Energía lateral (25 - 80) ms} + \text{Energía total (80 - 160) ms}}{\text{Energía total (0 - 80) ms}} \right]$$

5.1.11 - Fracción de Energía Lateral o Eficiencia Lateral, LE (“Lateral Energy Fraction”)

Es, junto con la correlación cruzada interaural, uno de los parámetros que permite cuantificar el grado de la anchura aparente de la fuente (ASW). Según A.H. Mashall, se define como la relación entre la energía lateral inicial en el intervalo que va desde los 5 y los 80 primeros ms (con el límite de 5 ms se excluye el sonido directo), y la energía total dentro de esos primeros 80 ms.

$$LE = \frac{\int_{5 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} p^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}$$

θ es el ángulo entre la reflexión incidente y la dirección de máxima sensibilidad del micrófono.

El valor de este parámetro se calcula dividiendo la energía recibida por un micrófono bidireccional (con un mínimo de captación de energía en el eje de la fuente), entre la energía captada por un micrófono bidireccional situado en la misma posición.

Generalmente se emplea el valor medio de los LE correspondientes a las bandas de frecuencias de octava comprendidas entre 125 Hz y 1kHz, representándose por LE_{E4} :

$$LE_{E4} = \frac{LE(125 \text{ Hz}) + LE(250 \text{ Hz}) + LE(500 \text{ Hz}) + LE(1 \text{ kHz})}{4}$$

A mayor valor de LE_{E4} mayor será ASW y, por tanto, mayor grado de espacialidad del sonido.

5.1.12 - Coeficiente de Correlación Cruzada Interaural, IACC (“Interaural Cross Correlation”)

Es, junto con la eficiencia lateral, uno de los parámetros que permite cuantificar el grado de anchura aparente la fuente. Es una medida de la diferencia entre el sonido de los dos oídos. Si en ambos el sonido es semejante, el IACC es igual a la unidad, pero si el sonido en ellos es debido a señales aleatorias independientes, el IACC = 0.

Para fuentes impulsivas, el IACC:

$$1. \quad IACC = |\theta_{LR}(\tau)|_{\text{máx}}$$

$$2. \quad \theta_{LR}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t+\tau) dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

- $p_L(t)$ = presión instantánea en el oído izquierdo.
- $p_R(t)$ = presión instantánea en el oído derecho.
- p_L^2 = valor eficaz de la presión en el oído izquierdo.

- p_R^2 = valor eficaz de la presión en el oído derecho.
- θ oscila entre -1ms y $+1\text{ms}$.

La segunda expresión corresponde a la Correlación Cruzada Interaural normalizada, empleándose el módulo de su máximo en las aplicaciones dirigidas a la acústica de salas.

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

Hidaka define dos IACC:

- $IACC_E$ (la E corresponde a la inicial de “Early”), que corresponde a los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo. y es una medida de espaciosidad.

$$IACC_E = \max_{|\tau| \leq 1 \text{ ms}} \frac{\int_{0.005}^{0.08} h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{0.005}^{0.08} h_L^2(t) dt \int_{0.005}^{0.08} h_R^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{para } |\tau| \leq 1 \text{ ms})$$

- $IACC_L$ (L es inicial de “Late”), calculada a partir de los 80ms hasta 1s, siendo una medida de la difusión del campo de sonido reverberante posterior a las reflexiones iniciales.

$$IACC_L = \max_{|\tau| \leq 1 \text{ ms}} \frac{\int_{0.08}^1 h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{0.08}^1 h_L^2(t) dt \int_{0.005}^1 h_R^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{para } |\tau| \leq 1 \text{ ms})$$

Donde $h_L(t)$ y $h_R(t)$ son las respuestas impulsivas asociadas a los oídos izquierdo y derecho respectivamente.

Okano comprobó experimentalmente que las bandas de frecuencias más representativas eran las centradas en 500 Hz, 1kHz y 2kHz que, promediándolas, se obtienen las denominadas $IACC_{E3}$ y $IACC_{L3}$.

$$IACC_{E3} = \frac{IACC_E(500\text{Hz}) + IACC_E(1\text{kHz}) + IACC_E(2\text{kHz})}{3}$$

$$IACC_{L3} = \frac{IACC_L(500\text{Hz}) + IACC_L(1\text{kHz}) + IACC_L(2\text{kHz})}{3}$$

En lo referente a la anchura aparente de la fuente ASW, la que interesa es $IACC_{E3}$, que permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos, dentro de los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo. Cuanto más diferentes sean, mayor será el valor de $IACC_{E3}$. Normalmente se emplea el valor $(1 - IACC_{E3})$, ya que según aumenta éste, se consigue una mayor disimilitud entre ambas señales y mayor anchura aparente de la fuente sonora, es decir, mayor impresión espacial de la sala. Sin embargo, al ser un parámetro reciente, existen muy pocas salas en las que se ha medido, estableciéndose las siguientes categorías:

$(1 - IACC_{E3})$	Categoría acústica de las salas
0'66	Excelente
0'55	Muy Buena
0'41	Aceptable / Buena

Categoría de las salas en función del valor $(1 - IACC_{E3})$ según Beranek.

Beranek propone un valor óptimo para salas vacías de $\approx 0'70$.

El $IACC_{L3}$ permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos a partir de los 80ms desde la llegada del sonido directo. Cuanto más diferentes sean, menor será el valor de este parámetro.

Generalmente se emplea el valor de $(1 - IACC_{L3})$, correspondiente al grado de difusión del sonido, es decir, a LEV (sensación de sonido envolvente). Sin embargo no es tan fiable como $(1 - IACC_{E3})$ ya que valores obtenidos de medidas de diversas salas de categorías diferentes, son muy similares entre sí. Por esto no es válido como parámetro representativo de la difusión del sonido en una sala, únicamente puede afirmarse que si su valor es bajo, la sala presenta una pobre difusión del sonido.

$(1 - IACC_{L3})$	Categoría acústica de las salas
0'88	Excelente
0'87	Muy Buena / Excelente
0'85	Buena

Categoría de las salas en función del valor $(1 - IACC_{L3})$ según Beranek.

5.1.13 - Relación de Primeras Reflexiones ,ERR (“Early Reflection Ratio”)

Propuesto por Barron, se define como la relación entre la energía que llega al oyente en los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye sonido directo y primeras reflexiones) y la energía correspondiente a sonido directo. Es decir:

$$ERR = \frac{\text{Energía hasta 50ms}}{\text{Energía de sonido directo}}$$

Indica el número de primeras reflexiones existentes en un determinado punto de la sala. Si $ERR = 2$ significa que existe sólo una primera reflexión de la misma energía que la correspondiente al sonido directo. Debe intentarse que ERR sea lo más constante posible en todos los puntos, excepto en los próximos al escenario en los que suele haber ERR bajos debido a la escasa influencia de las superficies reflectantes en las zonas cercanas a los intérpretes. Este hecho, en la práctica, carece de importancia, ya que la inteligibilidad de la palabra siempre es correcta precisamente por dicha proximidad.

5.2 - FACTORES QUE DEFINEN LA CALIDAD ACÚSTICA DE UNA SALA DE CONCIERTOS

Para estudiar una sala de conciertos, es necesario utilizar un vocabulario de atributos acústicos relacionados con la calidad de la música que se escucha en estos recintos.

Beranek, en su último libro “Concert and Opera Halls, how they Sound”, describe estos atributos. Seguidamente se enumeran cada uno de estos términos.

5.2.1 - Intimidad o Presencia

Si escuchamos música en una sala y nos proporciona impresión de que la sala es pequeña, se dice que dicha sala tiene “intimidad” acústica. Beranek asocia la valoración de la intimidad acústica con la sensación que tiene el oyente de escuchar la música en un espacio de dimensiones más reducidas que las dimensiones reales de la sala. Barron, en cambio, emplea el término de intimidad acústica para denominar el grado de conexión o identificación entre el oyente y la orquesta, es decir, si el oyente se siente inmerso o, por el contrario, distante de la música que está escuchando (aunque es la definición de Beranek la más difundida).

La intimidad acústica está relacionada con el aspecto audible de un sonido, que indica a un oyente el tamaño de la sala en la que se ha producido un suceso sonoro. Cada estilo musical suena mejor en un recinto con el grado apropiado de intimidad acústica, que no tiene por qué ser de un determinado tamaño, simplemente que suene como si estuviera en una sala de tamaño adecuado. La impresión acústica del tamaño de una sala viene dada por el intervalo de tiempo entre sonido directo y primer sonido reflejado, es decir, del denominado intervalo inicial de retardo (“Inicial – Time – Delay Gap”), debiendo ser menor de 20 ms para poder decir que la sala es íntima.

En el lenguaje especial de la industria de grabación y radio, se dice que una sala íntima tiene “presencia”.

Ya los primeros compositores escribían su música pensando en el recinto donde había de ser interpretada, e incluso la adecuaban para que el resultado final fuese óptimo. Es el caso, por ejemplo, de la Pasión según San Mateo, de J.S.Bach, escrita especialmente para la Thomaskirche, de Leipzig, donde él había sido cantor. Es decir, un compositor concibe sus trabajos musicales con cierto grado de intimidad. Si se interpreta una pieza en una sala cuya intimidad no es la apropiada para la misma, el oyente inmediatamente percibe que algo referente a la acústica es inadecuado. La intimidad es un factor estrechamente ligado con el grado de aceptación de una sala para la música.

5.2.2 - Reverberación o Viveza (“Liveness”)

Una sala reverberante se denomina sala “viva”, mientras que una con un tiempo de reverberación corto se llama “muerta” o “seca”. La viveza se relaciona principalmente con el tiempo de reverberación a frecuencias medias y altas (superiores de 500 Hz), ya que una sala puede ser viva y deficiente a bajas frecuencias. Algunos autores, en lugar de llamarla viveza, lo denominan “Plenitud de Tono”, definida como la cualidad añadida al sonido producido por los instrumentos o voces cuando se compara una sala con el aire libre (impresión que nos la dan fundamentalmente las frecuencias medias y altas). Si una sala es suficientemente reverberante a frecuencias bajas se dice que suena “cálida”, como se explica a continuación.

5.2.3 - Calidez, BR (“Bass Ratio”)

Se dice que una sala tiene calidez acústica si presenta buena respuesta a bajas frecuencias. La palabra calidez representa, pues, la riqueza de graves, la suavidad y la melosidad de la música en la sala. Es la viveza de los bajos, o la plenitud tonal de las bajas frecuencias, o relleno de los graves. Este relleno ocurre cuando el tiempo de reverberación para las frecuencias bajas (menores a 250Hz), es algo mayor (de un 20 a

un 50%) que el correspondiente a frecuencias medias (entre 500 y 1000Hz) y altas (mayores de 1000 Hz).

La calidez acústica se obtiene como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de frecuencias de 125Hz y 250Hz y la suma de los correspondientes a las bandas de frecuencias de 500Hz y 1kHz:

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

Si las frecuencias bajas se amplifican de forma desigual debido al efecto de los modos propios de vibración, se produce un efecto llamado “boomy”, que suele aparecer en salas pequeñas (discotecas, estudios de grabación, etc) y que debe evitarse siempre que sea posible. En salas grandes es extraño su aparición por la mayor densidad en el espectro a bajas frecuencias. Cuando en una sala los bajos poseen demasiada fuerza o las altas frecuencias están muy atenuadas, los músicos dicen que la sala es “oscura”. Un ejemplo es el sonido que le llega al oyente del foso cubierto del Festpielhaus en Bayreuth, Alemania.

5.2.4 - Anchura Aparente de la Fuente Sonora, ASW

(“Spaciousness o Apparent Source Width”)

En la audición musical, la anchura aparente de la fuente sonora se asocia con la sensación de que el sonido que llega del escenario proviene de una fuente más ancha que la correspondiente a la fuente real. Cuando esto ocurre se dice que dicha sala tiene el atributo de “Spaciousness”.

La ASW constituye uno de los dos componentes básicos de la denominada espacialidad o impresión espacial del sonido. Cuanto mayor sea ASW, mayor será la impresión espacial del sonido y mejor resultará la valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala.

La anchura aparente de la fuente sonora, según Barron y A.H. Marshall, aumenta con la cantidad de primeras reflexiones que inciden lateralmente sobre el oyente, ya que el oído las suma junto con el sonido directo y la localización de la fuente tiende a ser ambigua. Además, hacen que aumente el grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a los dos oídos, tanto por la diferencia de caminos recorridos como por el obstáculo que representa la cabeza. Cuanto mayor sea la diferencia entre ambos sonidos, mayor será la ASW.

Para cuantificar el grado de ASW existen dos parámetros: la eficiencia lateral (LF), relacionada con la energía de primeras reflexiones laterales, y la correlación cruzada interaural ($IACC_E$), asociada al grado de similitud entre las primeras reflexiones que llegan a ambos oídos. Ambos parámetros están explicados en el apartado correspondiente a parámetros acústicos para la valoración de salas.

5.2.5 - Espacialidad del Sonido: Sensación de Sonido Envolvente, LEV (“Spaciousness: Listener Envelopment ”)

Junto con la anchura aparente de la fuente sonora ASW, es uno de los dos componentes básicos de la denominada espacialidad o impresión espacial del sonido.

Describe la impresión del oyente de la intensidad y direcciones desde donde los sonidos reverberantes parecen llegar. Este factor es tanto mayor cuando el sonido reverberante parece llegar a los oídos de los oyentes por igual desde todas las direcciones, es decir, que el grado de difusión sea elevado. Para ello es necesario que existan irregularidades y/o relieves en las superficies de la sala, o bien cualquier tipo de ornamentación. Cuanto mayor sea el grado de LEV, mayor será, a valoración subjetiva, la calidad acústica de la sala. Cuando un sonido es marcadamente envolvente se dice que el grado de LEV es alto.

5.2.6 - Índice de Difusión, SDI

El índice de difusión, SDI (“Surface Diffusivity Index”), propuesto por Haan y Frike, se determina mediante una inspección visual de la sala con el objetivo de averiguar el grado de irregularidades de las paredes laterales y del techo. El “grado de difusión” es como ellos llaman a la cantidad de irregularidades existentes, estableciendo la siguiente escala: para superficies con grandes irregularidades el grado de difusión es 1, para las intermedias 0,5 y para las lisas 0. Ponderando dichos valores por las superficies asociadas en cada caso, sumándolos y dividiendo el resultado por la superficie total de las paredes laterales y techo, se obtiene el SDI. ($0 \leq \text{SDI} \leq 1$)

Al 0 le corresponde difusión nula y al 1 difusión total. Cuanto mayor sea el valor de SDI, mayor es el grado de LEV, es decir, de la impresión acústica espacial en la sala. Se ha llegado a la conclusión de que el grado de difusión de paredes laterales y techo parece ser el principal motivo de las diferencias existentes entre las salas consideradas como excelentes y las catalogadas simplemente como buenas o mediocres.

5.2.7 - Loudness o Intensidad del Sonido

La intensidad del sonido apenas requiere definición. Claramente, un sonido emitido en una sala de concierto con asientos para 1000 oyentes presentará mayor intensidad que en una sala con asientos para 3000 o 5000 personas, teniendo ambas el mismo tiempo de reverberación. La música también suena más alta en una sala muy reverberante que en una sala acústicamente muerta, aunque ambas sean del mismo tamaño.

5.2.8 - Intensidad del Sonido Directo

El sonido directo producido por una orquesta, llega normalmente a las últimas filas de la sala con adecuada intensidad, siempre que la sala sea pequeña. Pero si la sala es grande, sobre todo si los asientos no tienen una adecuada inclinación, dicha intensidad de sonido directo será demasiado baja en las últimas filas.

Las mejores salas son las que presentan una longitud limitada y se suelen diseñar de forma que las superficies por encima y a los lados del escenario proyecten el sonido por igual hacia las últimas filas.

5.2.9 - Intensidad del Sonido Reverberante

En una sala en la que se ejecuta música, la impresión que recibe un oyente de la sonoridad de la misma se compone de la sonoridad de sonido directo y de sonido reverberante. El nivel de presión sonora producido por una fuente en campo libre disminuye a razón de 6 dB al doblar la distancia, de forma que según nos alejamos de la fuente, el sonido percibido es más débil. En salas pequeñas el sonido no decrece tanto como para que a las últimas filas no les llegue suficiente intensidad. Pero no ocurre lo mismo en salas de grandes dimensiones, de ahí que se diseñen con superficies reflectantes que proyectan el sonido hacia las últimas filas, ayudando también el empleo de suelo inclinado en el escenario.

El sonido reverberante está relacionado con el volumen de la sala y el tiempo de reverberación: en una sala grande con un tiempo de reverberación corto, no se conseguirá un nivel adecuado, sin embargo, en una sala pequeña, si el tiempo de reverberación es largo, puede molestar y hasta producir dolor al oyente cuando se ejecute un pasaje muy fuerte.

5.2.10 - Amplitud de Tono

En una sala reverberante, la reverberación de la misma hace que el sonido se mantenga un determinado tiempo después de que el instrumento que lo ha producido haya cesado de sonar. Así pues, el efecto de la reverberación sobre la música es aumentar la denominada Amplitud de Tono de un instrumento o de un conjunto de ellos. Un tono tiene cierta sonoridad para un oyente incluso cuando es escuchado en un espacio acústicamente muerto. Sin embargo, si dicho tono se produce en una sala reverberante, da la impresión de ser más sonoro y, si la reverberación persiste un tiempo suficiente, los sucesivos tonos se mezclarán con los reverberantes. De forma que la reverberación en una sala aumenta la sonoridad de los tonos individuales y cambia el carácter de las frases musicales mediante la mezcla de estos tonos, dando continuidad a la línea musical.

La reverberación en sí misma, no es deseable, pero tampoco indeseable. El compositor puede servirse de ella para producir un determinado efecto musical, y como tal, es parte de la música. Para aumentar la amplitud de tono de un instrumento (o un conjunto de los mismos), se combinan tres aspectos:

- la duración del tiempo de reverberación.

- la relación entre la sonoridad del sonido directo y sonido reverberante, cuanto mayor sea esta relación, mayor será la amplitud de tono.

- la sonoridad del tono frente al ruido de fondo.

Si la sala está diseñada para guiar el sonido de los músicos directamente a la audiencia, la mayoría de la energía de la música alcanza los oídos de la audiencia directamente. Si la sala está diseñada para que la música alcance libremente la parte superior, la energía del sonido directo se disipa. Se pueden diseñar los recintos combinando estas dos características, así, el diseño de una sala determina, no únicamente el tiempo de reverberación, sino también la relación energía directa y reverberante que llega a la audiencia y, por tanto, los dos parámetros que determinan la amplitud de tono.

5.2.11 - Definición o Claridad

Propuesto por Thiele la definición D (del alemán “Deutlichkeit”), se define como el grado en que los sonidos directos en la música ejecutada se distinguen separados unos de otros. Se dice que una sala tiene buena Definición cuando el sonido es limpio o claro, es decir, se pueden distinguir claramente unos instrumentos de otros y escuchar cada nota distintamente. En caso contrario se dice que el sonido es “borroso”. La Definición o Claridad depende fuertemente de factores musicales y de la habilidad del intérprete, aunque también está muy influenciada por la acústica de la sala.

Según Baxa y Seireg, el grado de definición representa la relación entre la energía que llega durante los primeros 50 ms tras la llegada del sonido directo a un punto y energía total que alcanza dicho punto en todo el tiempo.

$$D = \frac{\text{Energía hasta 50ms}}{\text{Energía total}}$$

Está relacionado con diversos atributos anteriormente mencionados, como son la intimidad (ya que depende de la colocación de las superficies interiores), con la viveza (depende del tiempo de reverberación), con la intensidad del sonido directo (depende de la distancia entre fuente y oyente) y con la intensidad del sonido reverberante (depende del volumen de la sala). Por tanto, la Definición o Claridad es una especie de integración de estos cuatro atributos.

Existen dos clases de definición: la horizontal, relacionada con los tonos tocados en sucesión; y la vertical, relacionada con los tocados simultáneamente.

La Definición horizontal se refiere al grado en que los sonidos que siguen a otros se mantienen separados. En ésta influyen muchos factores: por un lado factores musicales como el tiempo, la repetición de las notas o la sonoridad relativa de tonos contiguos. Y por otro lado los factores acústicos como la duración del Tiempo de Reverberación y la relación entre la sonoridad del sonido directo y la del sonido reverberante. Por tanto, un incremento de definición horizontal implica una disminución de la amplitud de tono.

La Definición vertical se refiere al grado en el que los sonidos producidos simultáneamente se oyen de forma separada. Se ve influenciada por la música, el intérprete, la acústica de la sala y la agudeza del oyente. Los factores acústicos de los que depende son la mezcla de los tonos en el escenario de los diversos instrumentos, el equilibrio entre los mismos, la respuesta de la sala a todas las frecuencias y la relación entre sonido directo y reverberante.

5.2.12 - Velocidad de la música relativa a la Amplitud de Tono y Definición

La amplitud de tono, así como la definición, están relacionadas con la velocidad con que se produce un sonido musical. Si la música se ejecuta de forma lenta, la relación entre sonido directo y reverberante es grande y se percibe claramente cada nota. Si la velocidad aumenta, se pierde algo de definición, pero todavía se distinguen las notas.

Cuando la relación entre sonido directo y reverberante disminuye, las notas más débiles apenas son audibles debido a la reverberación del tono anterior. Por último, cuando la música es rápida, se pierden completamente las notas más débiles, la definición es muy baja y la amplitud de tono enorme.

5.2.13 - Acústica Estridente

En salas cuyas paredes y superficies de los paneles colgantes sean planas y estén dispuestas para producir reflexiones cercanas al sonido directo, puede ocurrir que el sonido sea estridente o “chillón”. Este fenómeno puede prevenirse añadiendo pequeñas irregularidades a dichas superficies o curvándolas.

5.2.14 - Brillantez o Nitidez, Br

La Brillantez o Nitidez se relaciona con la presencia de las altas frecuencias y la existencia de caminos libres entre fuente y oyente, debido a que las altas frecuencias son absorbidas por el aire y la mayoría de los materiales. Es interesante la existencia de superficies pulidas cerca de la fuente que darán lugar a las reflexiones de recorrido breve.

El brillo se obtiene como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de frecuencias de 2kHz y 4kHz y la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de 500Hz y 1kHz:

$$Br = \frac{RT (2\text{kHz}) + RT (4\text{kHz})}{RT (500 \text{ kHz}) + RT (1\text{kHz})}$$

Se denomina sonido “brillante” cuando es claro, vivo y rico en armónicos. Aparece como consecuencia del realce de los agudos y lentitud de su disminución. Depende de diversos factores, como del Tiempo de Reverberación a frecuencias altas con relación a frecuencias medias, de la distancia entre fuente sonora y espectador, de la existencia de superficies reflectantes y del intervalo de tiempo entre el sonido directo y la primera reflexión.

Una sala tiene brillo si posee viveza a altas frecuencias, claridad e intimidad.

5.2.15 - Difusión

Es una medida de la distribución direccional de la energía sonora que llega a un punto, se refiere a la orientación espacial del sonido reverberante. La Difusión es óptima cuando el sonido reverberante parece que llega al oyente desde todas las direcciones por igual. El sonido de una orquesta se difunde en la sala al combinarse un Tiempo de Reverberación largo con abundantes superficies interiores irregulares. Si las superficies interiores de la sala son lisas, ya sean paredes o techos, la difusión será pobre ya que dichas superficies llevarán el sonido directamente del escenario a la audiencia sin reflexiones intermedias, es decir, no habrá dispersión de las ondas sonoras.

El sonido directo que alcanza la pared trasera de un auditorio es inferior al existente en el frente, pero en una sala reverberante el oyente tiene la impresión de que la sonoridad es más uniforme porque el sonido directo se combina con el sonido reflejado. En una sala viva, en la parte de delante, el sonido directo es más fuerte pero la reverberación no es pronunciada, mientras que detrás el sonido directo es más débil y la reverberación más patente.

5.2.16 - Equilibrio o Balance

Puede definirse como la cualidad de la acústica del escenario que hace que exista un equilibrio entre todas las secciones de la orquesta. Si se quiere un buen “equilibrio” es necesario tener en cuenta tanto el balance entre las diversas secciones de la orquesta, como el balance entre orquesta e instrumentos vocales o solistas.

Ningún grupo instrumental debe dominar sobre el resto. Un correcto balance favorece la interpretación conjunta de solistas, sean vocales o instrumentales, y orquesta. El equilibrio empeora si el escenario o alguna otra superficie cercana a los músicos refuerza ciertas secciones de la orquesta o no enfatiza adecuadamente a los solistas.

Deben considerarse aspectos acústicos y musicales. Por un lado, el escenario ha de diseñarse adecuadamente para conseguir amplitud, profundidad y altura, con superficies internas irregulares sin aberturas en el techo y sin paredes reflectantes al fondo de la audiencia.

A parte de los aspectos comentados, el Equilibrio o Balance está en las manos de los músicos, de sus posiciones y del control del director sobre los intérpretes.

5.2.17 - Matiz o Mezcla

Hace referencia a la forma en que se mezclan los sonidos de los diferentes instrumentos de la orquesta, de tal forma que al que los escucha le parecen armónicos. En parte depende de la colocación de la orquesta, que no debe colocarse ni de una forma demasiado ancha ni demasiado profunda. También depende del diseño del escenario y de la presencia de superficies que mezclen los sonidos antes de que salgan al escenario.

5.2.18 - Timbre y Color del Tono

El timbre viene determinado por el número e intensidad de armónicos que acompañan a un sonido fundamental cuando éste es emitido y que depende de las características de cada instrumento musical y de cada voz. Esta cualidad de los sonidos permite distinguir dos de ellos de igual tono emitidos por dos instrumentos musicales distintos, así como la voz de diversas personas.

El color del tono es el efecto producido por una combinación de timbres, ya sean voces o instrumentos en la interpretación de una composición musical.

Tanto el timbre de un instrumento o cantante, como el color de tono de una orquesta, se ven influenciados por el ambiente acústico en el que se produce la música. El color del tono de una orquesta en un asiento particular de un auditorio depende de cómo los sonidos de los diferentes instrumentos son dirigidos a esa parte de la sala. De

esta forma, si las superficies de las paredes o techo absorben las frecuencias medias o bajas, el sonido orquestal llegará deficiente en graves. Si el techo o el escenario proyectan el sonido de ciertos instrumentos sólo hacia unas zonas de la audiencia, afectará al color del recinto que diferirá según la posición del oyente.

5.2.19 - Conjunto

Hace referencia a la habilidad de los ejecutantes de tocar al unísono, con el fin de que suenen como uno solo. Para lograr un buen conjunto, los músicos o coristas deben tener capacidad para escuchar a sus compañeros. Si el escenario es muy amplio, o bien el foso poco profundo, ambos lados del coro u orquesta no oirán a los otros intérpretes, y, como consecuencia, el conjunto será muy pobre. Los responsables de llevar el sonido de una parte a otra del escenario, son, en general, el escenario y las superficies reflectantes a los lados y por encima del mismo.

Tras diversos experimentos, A.H. Marshall llegó a la conclusión de que las reflexiones primeras o tempranas (las que llegan dentro de los 50ms siguientes a la llegada del sonido directo), son fundamentales para lograr un buen conjunto, siendo las componentes de alta frecuencia las más importantes para los músicos.

5.2.20 - Proximidad de Respuesta o Ataque (“Attack”)

Los músicos deben tener la sensación de que la sala responde de forma inmediata a una nota. La inmediatez de respuesta se relaciona con la forma en que las primeras reflexiones de las superficies de la sala regresan al músico. Si las reflexiones llegan mucho después de que suene la nota, el músico la percibirá como un eco, si únicamente escucha las reflexiones de las superficies cercanas (las que rodean al escenario), perderán la sensación acústica de la sala.

La proximidad de respuesta está determinada por la intimidad, viveza, difusión, mezcla y eco.

5.2.21 - Sonoridad, Ruido y Margen Dinámico

El margen dinámico o dinámica de una sala es el rango de niveles sonoros en el que puede escucharse la música dentro de dicha sala. Va desde el mínimo nivel determinado por el ruido ambiente de la sala hasta el mayor nivel que pueda producir la orquesta. Un margen dinámico amplio es señal de buena acústica de la sala y está limitado por el ruido de fondo de la sala y por sus características acústicas. Debe controlarse el límite superior del rango dinámico ya que, si llega a ser muy alto, puede producir dolor en los oídos del oyente.

La sonoridad del sonido reverberante en una sala disminuye proporcionalmente al aumento del área de asientos de audiencia y de la cantidad de material absorbente de la sala. La sonoridad del sonido directo depende de la distancia entre oyente y escenario, del diseño de éste último y de las superficies reflectantes en el techo y en el extremo anterior de la sala.

Los ruidos procedentes de los sistemas de ventilación, fuentes externas como por ejemplo el ruido de tráfico, deberían ser menores que el producido por la audiencia. Por este motivo, frecuentemente el primer factor en un buen diseño de una sala musical es el aislamiento de la misma frente al ruido exterior.

5.2.22 - Textura

Se llama textura a la impresión subjetiva del sonido percibido por un oyente en un punto cualquiera de una sala producida por la forma en que las primeras reflexiones llegan a sus oídos. Una buena textura exige gran cantidad de primeras reflexiones dentro de los primeros 80ms desde que llega el sonido directo, una distribución uniforme de las mismas y la total ausencia de reflexiones discretas de nivel elevado.

La textura de una sala estrecha (íntima), con superficies difusoras en las paredes laterales y techo, es muy diferente a la de una sala en forma de abanico con paredes lisas. Hasta el momento no existe ningún sistema de medida de textura, por lo que sólo

puede establecerse el grado de textura en un punto de la sala mediante observación de la curva de decrecimiento energético.

5.2.23 - Eco

Un eco es una reflexión retrasada y lo suficientemente intensa como para resultar molesta a los oyentes. Puede producirse por las superficies de un techo muy alto que enfoca el sonido hacia una parte de la sala, o bien por una superficie grande y curvada en la parte posterior de la sala cuyo punto focal se encuentra cerca de las primeras filas de la misma o en el escenario. Es mucho mayor este fenómeno en salas con tiempo de reverberación corto, y en las primeras butacas de las salas grandes.

5.2.24 - Calidad Tonal

La Calidad Tonal es la belleza de los tonos o sus matices. Puede echarse a perder por una desigual absorción de ciertas superficies que producirían pérdidas en un determinada gama de frecuencias, o por una superficie metálica, dándole al sonido un matiz metálico. Los ecos flotantes también la degradan produciendo un zumbido fácilmente audible.

5.2.25 - Uniformidad Del Sonido

Un requisito fundamental de una buena sala es la Uniformidad de Sonido. En numerosas salas hay una zona en la que el sonido es pobre, como puede ser debajo de un palco, o bien zonas donde existen reflexiones que producen ecos, falta de claridad o sonidos borrosos.

Existe otro extraño efecto que se escucha desde los asientos, incluso en algunas de las mejores salas, siendo causado por un “cambio de fuente”. Es decir, una superficie

reflectante puede enfocar una cantidad de sonido hacia una parte de la audiencia, y los oyentes oirían el sonido como si emanase de la superficie en lugar de la orquesta.

5.3 - RUIDO ACÚSTICO

El ruido se define como “energía acústica audible que afecta negativamente al bienestar fisiológico o psicológico de las personas”, siendo una definición más usual la de “sonido no deseado”.

En función del nivel de presión sonora puede clasificarse en:

1. De elevado nivel de intensidad (nivel de ruido > 90 fonos), produce dolor y pérdida de audición, debiendo eliminarse.
2. De nivel de intensidad intermedia (40 fonos $<$ nivel de ruido < 90 fonos), pueden soportarse aunque son molestos.
3. De pequeño nivel de intensidad (nivel de ruido < 40 fonos), no producen trastornos físicos pero sí pueden producir trastornos psicológicos.

Para estudiar los diversos sonidos, en personas jóvenes, podemos descomponer el rango de frecuencias audibles en tres zonas:

1. sonidos graves (20 – 360 Hz)
2. sonidos medios (360 – 1400 Hz)
3. sonidos agudos (1400 – 20000 Hz)

El estudio de los niveles de ruido se lleva a cabo en diferentes bandas de frecuencia, denominándose este estudio análisis en frecuencia. El estudio se puede realizar en bandas de octava o en bandas de tercio de octava. Para analizar el ruido en las diferentes bandas de frecuencia es preciso emplear filtros que dejan pasar las componentes cuyas

frecuencias están comprendidas entre unos límites o frecuencias de corte, eliminando las componentes que están fuera de dichos límites. La banda permitida se llama banda de paso y la diferencia entre ambas frecuencias de corte es el ancho de banda.

Los filtros utilizados para las medidas de ruido deben tener bandas de paso de acuerdo a normas internacionales ISO-R.266 y la española UNE 74002/78 sobre frecuencias preferentes en medidas acústicas DIN 45401, ANSI S1.6-1967. Para llevar a cabo medidas de ruido se emplean sonómetros, en los que la presión sonora se transforma en tensión eléctrica por medio de un micrófono, y un voltímetro asociado al aparato proporciona la lectura en una escala graduada en dB.

Se trata de estudiar y conocer en profundidad las fuentes sonoras y sus características físicas para disminuir los niveles de ruido que generan y proteger a las personas. Las fuentes de ruido más importantes se engloban en dos grupos:

- a) fuentes de ruido externas a los edificios (tráfico rodado, tráfico aéreo, ruido producido por obras públicas, actividades industriales, actividades urbanas comunitarias, o agentes atmosféricos).
- b) fuentes de ruido internas a los edificios (debido a personas, impactos, instalaciones de fontanería, calefacción, ascensores y, el más común, el de ventilación, debiendo hacer que el aire se mueva hacia lugares adecuados).

El ruido puede ser tanto aéreo como estructural. El sonido aéreo se define como “sonido cuyo camino de transmisión desde la fuente al receptor es un líquido o un gas”, mientras que el sonido estructural es el “sonido para el que una parte importante del camino de transmisión desde la fuente al receptor lo constituye una estructura sólida en lugar de serlo un líquido o un gas”.

El conocimiento de estas fuentes permitirá saber cómo se producen los ruidos, así como se propagan, tratando por último de establecer una relación entre las magnitudes físicas de las fuentes sonoras y el grado de molestia que originan.

Los valores objetivos de las fuentes sonoras que se pueden medir son:

a) Nivel de potencia sonora

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (W_0 = 10^{-12} \text{ w})$$

b) Nivel de intensidad sonora

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (I_0 = 10^{-12} \text{ w/m}^2)$$

c) Nivel de presión sonora

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa})$$

5.3.1 - Índices de Valoración del Ruido

Los seres humanos se encuentran rodeados por el ruido en todas sus actividades, por lo que, si se desea conocer y valorar la reacción de una persona o de un colectivo ante el ruido, es necesario crear una escala que relacione la respuesta subjetiva de las personas con alguna propiedad física medible de la fuente sonora (potencia acústica emitida, intensidad acústica en un punto situado a una distancia r) mediante un único valor numérico que llamaremos **índice**.

De esta forma se podrán formar **criterios**, que proporcionarán valores del índice de ruido que no deben superarse. La comparación de los valores medidos de un índice, en un caso determinado de ruido, con los máximos valores admitidos, se dice que es hacer una **evaluación** del ruido estudiado.

La medida del nivel de presión sonora SPL o L_p puede realizarse sin ningún tipo de acentuación ni atenuación de las frecuencias integrantes del sonido objeto de análisis,

o bien ponderándolo. Dicha ponderación puede efectuarse de diversas formas, empleando las denominadas redes de ponderación.

- Ponderación A: Debido a la diferente sensibilidad del oído a las distintas frecuencias, los valores obtenidos empleando la escala lineal no guardan una relación directa con la sonoridad del sonido en cuestión. Para que la medida realizada sea más representativa de la sonoridad asociada a un sonido cualquiera, se emplea la red de ponderación A (Norma UNE 21.324/75).

Esta curva se aproxima a las curvas de igual sonoridad para niveles de presión sonora bajos. Se observa que la frecuencia de 1kHz queda inalterada y, por tanto, se puede considerar de referencia. Para frecuencias inferiores existe una importante atenuación de nivel. Sigue aproximadamente la curva isofónica de 40 fonos.

Los niveles de presión sonora medidos con la red de ponderación A se representan con las letras L_A y se expresan en dBA o dB(A). Es la ponderación más empleada.

- Ponderación B: Para niveles de presión sonora medios. Sigue aproximadamente a la isofónica de 70 fonos dB(B).

- Ponderación C: Para niveles de presión sonora altos. Sigue aproximadamente a la isofónica de 100 fonos dB(C).

- Ponderación D: Sigue aproximadamente el contorno de sonoridad (ruido de aviones) dB(D).

- Ponderación E: Realiza estimación del nivel sonoro percibido dB(E).

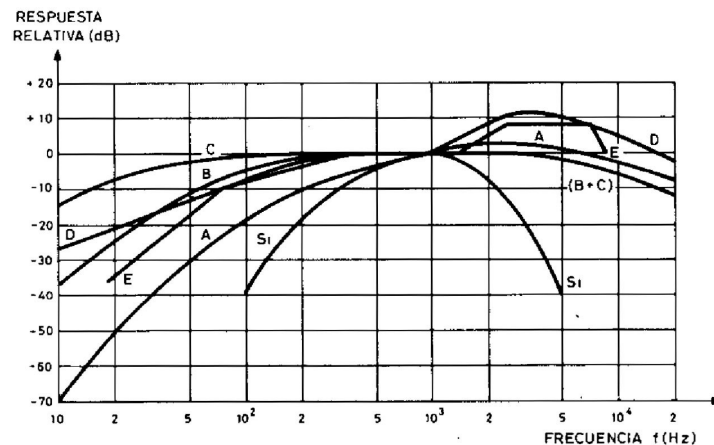


Fig 5.1: Curvas de ponderación de medida del ruido.

Se dice que el nivel de un sonido es de n fonos, cuando a juicio de un oyente normal la sonoridad, en escucha binaural, producida por el sonido, es equivalente a la de un sonido puro de 1000 Hz continuo, que incide frente al oyente en forma de onda plana libre progresiva y cuyo nivel de presión acústica es de n dB superior a la presión de referencia (unidad física no constante, aunque para nuestro oído lo es).

Son o sonio: Es la sonoridad de un tono de 1 KHz y un nivel de intensidad de 40 dB.

Frecuencia (Hz)	Ponderación A	Ponderación B	Ponderación C	Ponderación D
31'5	-39'4	-17'1	-3'0	--
40	-34'6	-14'2	-2'0	--
50	-30'2	-11'6	-1'3	-12'8
63	-26'2	-9'3	-0'8	-10'9
80	-22'5	-7'4	-0'5	-9'0
100	-19'1	-5'6	-0'3	-7'2

125	-16´1	-4´2	-0´2	-5´5
160	-13´4	-3´0	-0´1	-4´0
200	-10´9	-2´0	0	-2´6
250	-8´6	-1´3	0	-1´6
315	-6´6	-0´8	0	-0´8
400	-4´8	-0´5	0	-0´4
500	-3´2	-0´3	0	-0´3
630	-1´9	-0´1	0	-0´5
800	-0´8	0	0	-0´6
1000	0	0	0	0
1250	+0´6	0	0	+2´0
1600	+1´0	0	-0´1	+4´9
2000	+1´2	-0´1	-0´2	+7´9
2500	+1´3	-0´2	-0´3	+10´6
3150	+1´2	-0´4	-0´5	+11´6
4000	+1´0	-0´7	-0´8	+11´1
5000	0´5	-1´2	-1´3	+9´6
6300	-0´1	-1´9	-2´0	+7´6
8000	-1´1	-2´9	-3´0	+5´5
10000	-2´5	-4´4	-4´4	+3´4

Tabla 5.1: Ponderaciones A, B, C y D para diferentes frecuencias.

5.3.2 - Curvas de Valoración NR (“Noise Rating”)

Propuestas por Kosten y Van Os y pensadas para valorar el ruido exterior, permiten asignar al espectro de frecuencias de un ruido, medido en bandas de octava, un solo número NR (ISO R-1996), que corresponde a la curva que queda por encima de los puntos que representan los niveles obtenidos en cada banda de nuestro ruido.

La forma de estas curvas refleja el incremento de la sensibilidad del oído con el aumento de la frecuencia. La curva NR-15 representa un criterio muy estricto para estudios de grabación sonora mientras que las otras curvas sirven como referencia para grabaciones menos críticas o ambientes en los que el nivel de ruido aceptable es mayor.

NR	Niveles de presión sonora en bandas de octava (dB)								
	Frecuencias centrales (Hz)								
	31´5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

0	55´4	35´5	22´0	12´0	4´8	0	-3´5	-6´1	-8´0
5	58´8	39´4	26´3	16´6	9´7	5	1´6	-1´0	-2´8
10	62´2	43´4	30´7	21´3	14´5	10	6´6	4´2	2´3
15	65´6	47´3	35´7	25´9	19´4	15	11´7	9´3	7´4
20	69´0	51´3	39´4	30´6	24´3	20	16´8	14´4	12´6
25	72´4	55´2	43´7	35´2	29´2	25	21´9	19´5	17´7
30	75´8	59´2	48´1	39´9	34´0	30	26´9	24´7	22´9
35	79´2	63´1	52´4	44´5	38´9	35	32´0	29´8	28´0
40	82´6	67´1	56´8	49´2	43´8	40	37´1	34´9	33´2
45	86´0	71´0	61´1	53´6	48´6	45	42´2	40´0	38´3
50	89´4	75´0	65´5	58´5	53´5	50	47´2	45´2	43´5
55	92´9	78´9	69´8	63´1	58´4	55	52´3	50´3	48´6
60	96´3	82´9	74´2	67´8	63´2	60	57´4	55´4	53´8
65	99´7	86´8	78´5	72´4	68´1	65	62´5	60´5	58´9
70	103´1	90´8	82´9	77´1	73´0	70	67´5	65´7	64´1
75	106´5	94´7	87´2	81´7	77´9	75	72´6	70´8	69´2
80	109´9	98´7	91´6	86´4	82´7	80	77´7	75´9	74´4
85	113´3	102´6	96´9	91´0	87´6	85	82´8	81´0	79´5
90	116´7	106´6	100´3	95´7	92´5	90	87´8	86´2	84´7
95	120´1	110´5	104´6	100´3	97´3	95	92´9	91´3	89´8
100	123´5	114´5	109´0	105´0	102´2	100	98´0	96´4	95´0
105	126´9	118´4	113´3	109´6	107´1	105	103´1	101´5	100´1
110	130´3	122´4	117´7	114´3	111´9	110	108´1	106´7	105´3
115	133´7	126´3	122´0	118´9	116´8	115	113´2	111´8	110´4
120	137´1	130´3	126´4	123´6	121´7	120	118´3	116´9	115´6
125	140´5	134´2	130´7	128´2	126´6	125	123´4	122´0	120´7
130	143´9	138´2	135´1	132´9	131´4	130	128´4	127´2	125´9

Tabla 5.2: Valores del nivel de presión sonora correspondientes al Índice NR

Tipos de recintos	Rango de niveles NR que pueden aceptarse
Talleres	60 – 70
Oficinas mecanizadas	50 – 55
Gimnasios, salas de deporte, piscinas	40 – 50
Restaurantes, bares, cafeterías	35 – 45
Despachos, bibliotecas, salas de Justicia	30 – 40
Cines, hospitales, iglesias, pequeñas salas de conferencias	25 – 35
Aulas, estudios de televisión, grandes salas de conferencias	20 – 30
Salas de conciertos, teatros	20 – 25
Clínicas, recintos para audiometrías	10 – 20

Tabla 5.3 : Valores recomendados del Índice NR para diferentes locales.

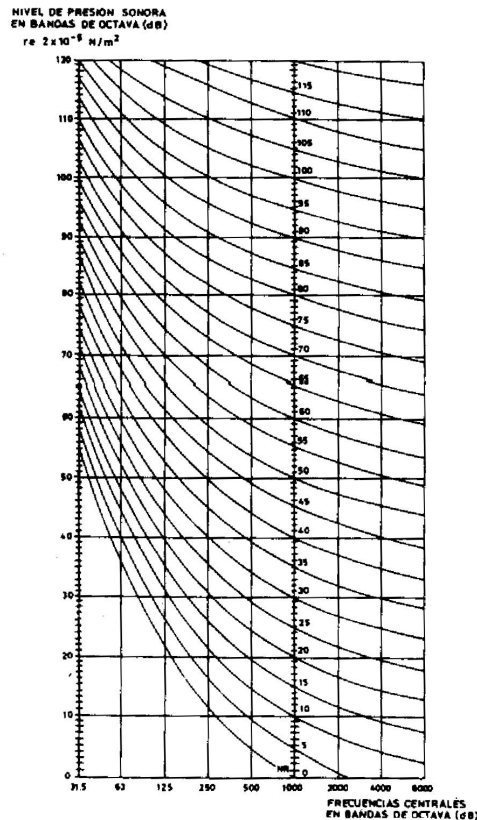


Fig5.2: Curvas NR

5.3.3 - Curvas de Valoración NC (“Noise Criteria”)

La evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca en un oyente, se realiza por comparación de los niveles de ruido existentes en un recinto, en cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC. Este índice fue descrito por L.L Beranek en 1957, derivado de su anterior criterio de interferencia de la palabra, que es la media aritmética de los niveles de ruido en tres bandas de octava (1,2 y 4 kHz). Las curvas NC dan el nivel de presión sonora en función de las frecuencias centrales de bandas de octava. Con él se pretendió relacionar el espectro de un ruido con la perturbación que producía en la comunicación verbal, teniendo en cuenta los niveles de interferencia de la palabra y los niveles de sonoridad.

Las curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Esto significa que, para una determinada curva NC, los niveles SPL máximos permitidos a bajas frecuencias son siempre más elevados que los correspondientes a frecuencias altas, puesto que el oído es menos sensible a frecuencias bajas. La forma de las curvas es similar a las NR, pero desplazadas hacia arriba, alrededor de 3 dB, para bajos niveles de presión acústica.

Las curvas NC también se emplean de forma generalizada para establecer los niveles de ruido máximos recomendables para diferentes tipos de recintos en función de su aplicación. Se dice que un recinto cumple una determinada especificación NC cuando los niveles de ruido de fondo, medidos en cada una de las bandas de octava, están por debajo de la curva NC correspondiente. Para evaluar este espectro de ruido, se cubre con él la familia de curvas, y el valor NC asignado al espectro corresponderá a la curva más alta de NC a la cual el espectro es tangente en algún punto. A partir de la curva NC-35 el nivel global de presión sonora (medido en dBA), del ruido de fondo medido, es aproximadamente 10 dB superior al correspondiente valor NC. Así, si el ruido de fondo que hay en un recinto es de 50 dBA, ello significa que dicho recinto cumple la especificación NC-40.

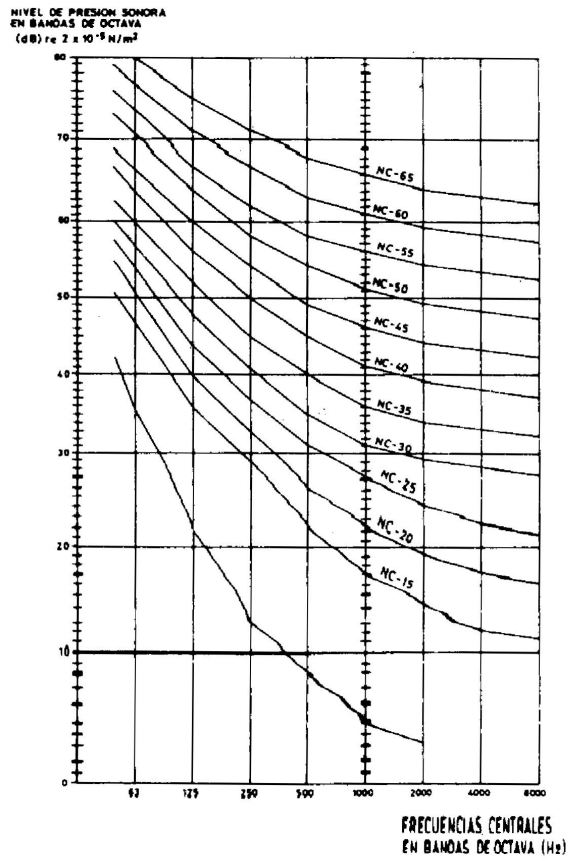


Fig 5.3: Curvas NC

NC	Niveles de presión sonora en bandas de octava (dB)							
	Frecuencias centrales (Hz)							
	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
40	64	57	50	45	41	39	38	37
45	67	60	54	49	46	44	43	42
50	71	64	58	54	51	49	48	47
55	74	67	62	58	56	54	53	52
60	77	71	67	63	61	59	58	57
65	80	75	71	68	66	64	63	62
70	83	79	75	72	71	70	69	68

Tabla 5.4: Valores del nivel de presión sonora correspondientes al Índice NC.

Tipos de recintos	Rango de niveles NC que pueden aceptarse
Fábricas para ingeniería pesada	55 – 75
Fábricas para ingeniería ligera	45 – 65
Cocinas industriales	40 – 50
Recintos deportivos y piscinas	35 – 50
Grandes almacenes y tiendas	35 – 45
Restaurantes, bares, cafeterías	35 – 45
Oficinas mecanizadas	40 – 50
Oficinas generales	35 – 45
Despachos, bibliotecas, salas de Justicia y aulas	30 – 35
Viviendas y dormitorios	25 – 35
Salas de hospitales y quirófanos	25 – 35
Cines	30 – 35
Teatros, salas de juntas, iglesias	25 – 30
Salas de conciertos y teatros de ópera	20 – 25
Estudios de registro y reproducción sonora	15 – 20

Tabla 5.5: Valores recomendados del Índice NC para diferentes locales.

5.3.4 - Curvas de Valoración PNC (“Preferred Noise Criteria”)

Webster y Klumpp afirmaron que las curvas NC debían modificarse para tener en cuenta el efecto enmascarante de los ruidos de baja frecuencia sobre la inteligibilidad de la palabra. Así, en 1971 propusieron las curvas PNC (“Preferred Noise Criteria”). Estas curvas PNC son menos tolerantes con el ruido de baja frecuencia, presentando valores que son alrededor de 1 dB menos que las curvas NC en las cuatro bandas de octava 125, 250, 500 y 1000 Hz, para la misma curva. En la banda de 63 Hz, los niveles permisibles son 4 ó 5 dB menores; en las tres bandas altas son 4 ó 5 dB inferiores. Estas curvas no han sido aceptadas internacionalmente, por lo que se consideran como recomendaciones, aunque se pueden usar igual que las curvas NC, que son las que se emplean en la práctica.

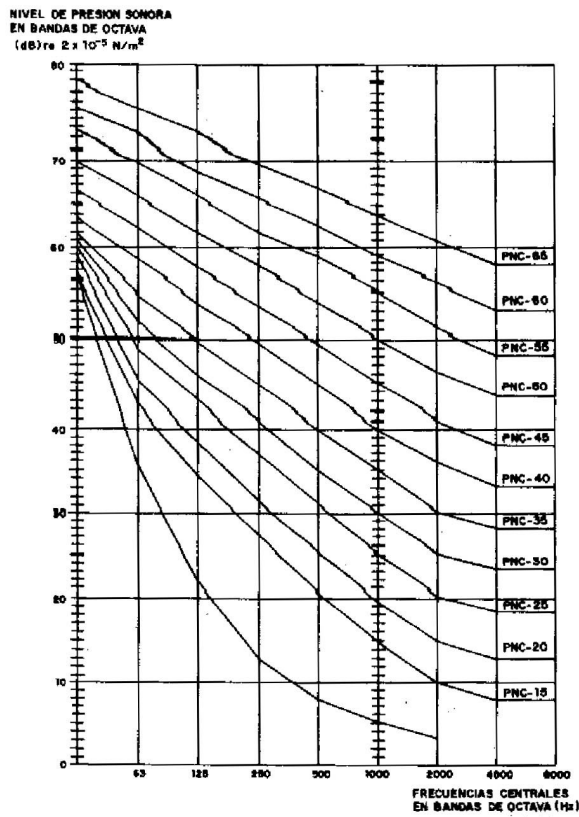


Fig 5.4: Curvas PNC

PNC	Niveles de presión sonora en bandas de octava (dB)							
	Frecuencias centrales (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
15	43	35	28	21	15	10	8	8
20	46	39	32	36	20	15	13	13
25	49	43	37	31	25	20	18	18
30	52	46	41	35	30	25	23	23
35	55	50	45	40	35	30	28	28
40	59	54	50	45	40	35	33	33
45	63	58	54	50	45	41	38	38
50	66	62	58	54	50	46	43	43
55	70	66	62	59	55	51	48	48
60	73	69	66	63	59	56	53	53
65	76	73	70	67	64	61	58	58

Tabla 5.6: Valores del nivel de presión sonora correspondientes al Índice PNC.

Tipos de recintos	Rango de niveles PNC que pueden aceptarse
Salas de concierto, óperas y locales de recitales	10 – 20
Estudios de radio y de televisión	10 – 20
Auditorios, grandes teatros, iglesias	20
Auditorios pequeños, pequeñas iglesias, pequeños teatros, grandes salas de conferencias y reuniones (no más de 50 personas)	35
Dormitorios, hospitales, residencias, apartamentos, hoteles	25 – 40
Oficinas privadas, pequeñas salas de conferencias, Aulas, bibliotecas	30 – 40 35 – 45
Grandes oficinas, tiendas, cafeterías, restaurantes	40 – 50
Oficinas de ingeniería	45 – 55
Cocinas, lavanderías, oficinas con ordenadores	50 – 60
Grandes tiendas, garajes	

Tabla 5.7: Valores recomendados del Índice PNC para diferentes locales.

Observando las tablas expuestas, se comprueba que en función del empleo que vaya a darse a los locales, la exigencia de los máximos valores de los niveles admitidos de ruido, se dará conforme los diferentes índices de valoración existentes. Se llama nivel aceptable de ruido al nivel más alto de ruido que no molesta a sus ocupantes ni deteriora la acústica. Se podrá dar bien en dB(A), o en función de los índices vistos NR, NC o PNC, teniendo los últimos la ventaja sobre el primero de que proporcionan información analizando el espectro de ruido en octavas, lo que no nos proporciona el nivel en toda la banda expresado en dBA. A continuación se proporciona una tabla resumen de los índices expuestos. Debemos tener en cuenta que en más del 80% de los recintos que se indican, el nivel de ruido promedio excede del nivel recomendado. Por último, comentar que son valores estadísticos y que, un nivel adecuado para una persona, puede no serlo para otra.

Tipo de recinto	Índice de ruido			Nivel de ruido	
	NR	NC	PNC	dB	dB (A)

Estudios de radio y televisión	30	20	30	30	25
Salas de música, auditorios	25	25	20	35	25
Teatros	25	30	20	35	40
Hospitales	20	35	40	40	45
Iglesias	35	30	35	40	45
Viviendas, hoteles	45	35	40	45	45
Salas de lectura, aulas	30	35	40	40	45

Tabla 5.8: Valores máximos de los índices de ruido permitidos