

ANÁLISIS DE RESPUESTAS IMPULSIVAS DE RECINTOS

FEDERICO ANDRIOLLO¹, FRANCO SPITALE¹ y LUIS GARCIA CASTELLANOS¹

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC). Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, CP X5016ZAA, Córdoba, Argentina
luism.garcia@gmail.com, francospitale10@hotmail.com,
federicoandriollo@gmail.com

Resumen – Diversos investigadores han intentado obtener evaluaciones objetivas que permitan determinar la calidad acústica de una sala, permitiendo de esta forma llevar calificaciones subjetivas al terreno de las mediciones, esto permite caracterizar un determinado recinto y saber a ciencia cierta para que tipo de uso será apto y poder evaluar de que manera mejorar la acústica del recinto en cuestión. En el estudio de la acústica, muchos han logrado llevar varias de estas cualidades subjetivas a parámetros objetivos.

En este trabajo se presenta un análisis de los distintos parámetros que se pueden obtener de la respuesta al impulso que caracteriza a un recinto, algunos de los cuales están definidos en la norma ISO 3382. Se determina el análisis matemático de cada parámetro, su caracterización subjetiva y valores recomendados.

1. INTRODUCCIÓN

El resultado de las mediciones acústicas de recintos se ve directamente influenciado por el método de medición empleado, el equipamiento y la posición de medida entre otros factores [11,1,13,]. Es por ello que la norma ISO 3382 establece las condiciones en las cuales deben ser efectuadas las mediciones y define los parámetros que van a caracterizar de manera objetiva al recinto.

Es posible representar a un recinto acústico como un sistema SLIT en el que la fuente de sonido es la entrada y la señal que llega al receptor es la salida, de esta forma se puede obtener la respuesta al impulso (RI) del recinto, a partir de la cual la norma ISO 3382-1:2009 define los parámetros acústicos y a estos parámetros los divide en 5 grupos de aspectos subjetivos (nivel subjetivo del sonido, reverberación percibida, ancho aparente de la fuente, envolvimiento del oyente) [11]

La señales que se utilizaban antiguamente para excitar el sistema solían ser disparos de pistola o ráfagas de ruido filtrados por bandas (método directo), actualmente se utilizan señales continuas que mediante procesamiento permiten obtener la RI (método indirecto), este método presenta una mejor relación señal – ruido, repetitividad de las mediciones y precisión [1,13,14]

Dentro del método indirecto podemos encontrar barrido de frecuencias y serie de máxima longitud (mls). Los barridos de frecuencia, a su vez, pueden ser: lineales (lsw) y exponenciales (esw) [13].

Básicamente, los barridos de frecuencias son señales senoidales cuya frecuencia varía de manera continua en todo el rango de interés. Si esta variación se realiza a un ritmo constante el barrido se denomina lineal (lsw); si el barrido varía según una ley logarítmica, se denomina exponencial [13]

La reconstrucción de la respuesta impulsiva de un sistema LTI excitado con una señal de este tipo, se obtiene por la convolución de la señal de salida con el filtro inverso de la señal de barrido [13].

Una vez obtenida la respuesta al impulso, se puede proceder a calcular los parámetros acústicos del recinto de manera de poder caracterizar el comportamiento de la sala.

Se debe tener en cuenta que actualmente existen diversas investigaciones [1] que aseguran que se presentan sendas discrepancias en los resultados obtenidos al utilizar uno u otro método, lo cual ha generado muchas críticas a lo dicho por la norma ISO 3382.

Este trabajo está estructurado en 3 partes fundamentales, en la primera sección se analizarán todos los parámetros que se pueden obtener de la respuesta al impulso, en la segunda parte se definirán los protocolos de medida y el equipamiento necesario para llevar a cabo las mediciones y para que estas cumplan con lo que dispone la norma ISO 3382 y en la tercera parte se presentarán los parámetros medidos en un recinto.

2. ANALISIS DE LOS PARAMETROS OBTENIDOS A PARTIR DE LA RESPUESTA AL IMPULSO

Al analizar la respuesta temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera de un recinto, se pueden observar dos zonas de características diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (early reflections) y una segunda formada por reflexiones tardías, o la denominada cola

reverberante (late-field reverberation) [2]. Desde un punto de vista práctico, es común establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto [2].

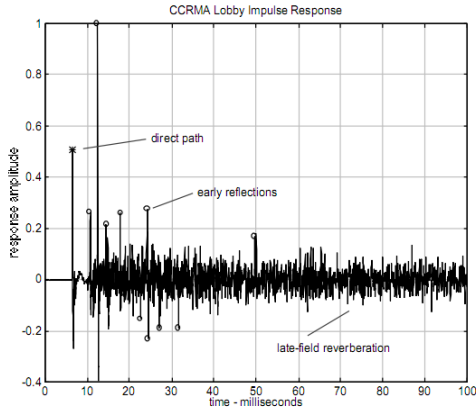


Figura 1: Reflexiones en una respuesta impulsiva

2.1 Tiempo de Reverberación (RT)

El tiempo de reverberación es el tiempo necesario para que las reflexiones de un sonido directo decaigan 60 dB por debajo del nivel de dicho sonido [2]. Puede ser medido como un valor único, o por bandas (1/3 de octava, 1/6 de octava etc.).

Si bien existe un gran número de fórmulas para el cálculo teórico del RT, una de las más utilizadas es la fórmula de Sabine. La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{A_{tot}} \quad (1)$$

Donde: V es el volumen del recinto (en m³) y A_{tot} es la absorción total del recinto.

Para medir el tiempo de reverberación en un recinto, se debe primero obtener una curva de decaimiento (amplitud versus tiempo). Para esto se debe realizar una integración inversa de la respuesta al impulso elevada al cuadrado como se muestra a continuación.

$$E(t) = \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau = \int_0^t p^2(\tau) d\tau - \tau \quad (2)$$

Este método transforma una respuesta impulsiva normal en una curva de decaimiento en la cual se puede evaluar el tiempo de decaimiento y

consecuentemente el tiempo de reverberación (por ejemplo a 60 dB).

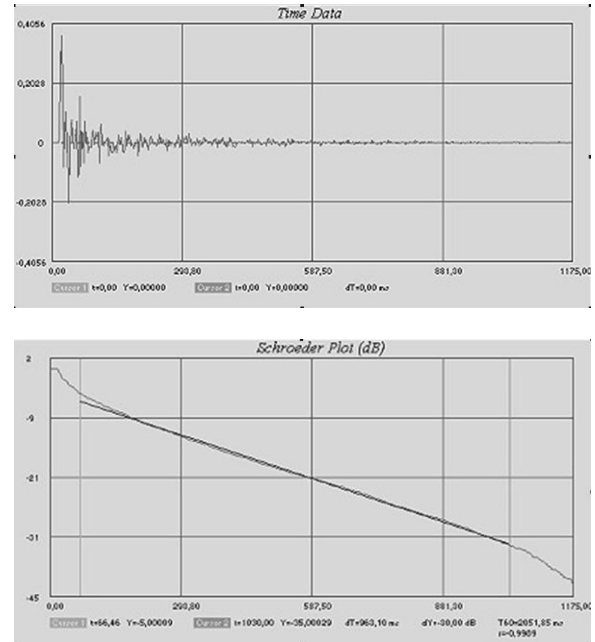


Figura 2: Respuesta impulsiva de un recinto y su correspondiente curva de decaimiento.

En la figura 2 se muestra la medición del tiempo de reverberación RT30 (tiempo requerido para un decaimiento de 60dB de -5 a -35 dB).

Los RT (Reverberation Time) son los RT60 resultantes de interpolar una recta entre los puntos a -5 dB y -15 dB del decaimiento de la respuesta del recinto en el caso del RT10, entre -5 dB y -25 dB para el RT 20 y entre -5 dB y -35 dB para el RT30.

La valoración subjetiva del RT se denomina “reverberancia” e indica el grado de reverberación percibido en la sala [3].

Considerando volúmenes entre aproximadamente 10.000 y 30.000 m³ [4,5], el valor medio de los RT correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz de una sala de conciertos totalmente ocupada y destinada a un amplio repertorio de música sinfónica debe estar comprendido entre:

$$1,8 \leq RT_{mid} \leq 2s \quad (3)$$

Donde:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1KHz)}{2} \quad (4)$$

En cambio, en el caso de considerar una sala destinada exclusivamente a la interpretación de música correspondiente a los periodos Barroco (1600-1750) y Clásico (1750-1820), el valor de RT_{mid} es algo inferior, situándose entre 1,6 y 1,8 s.

Para música de cámara, el valor óptimo se halla entre 1,3 y 1,7 s, mientras que para ópera se encuentra entre 1,2 y 1,5 s (La Scala de Milán: 1,2 s; Staatsoper de Viena: 1,3 s).

En la tabla 1 se resumen los márgenes mencionados.

Tipo de Música	TR _{mid} [s]
Sinfónica	1,8 - 2,0
Barroca y clásica	1,6 - 1,8
De cámara	1,3 - 1,7
Ópera	1,2 - 1,5

Tabla 1: Márgenes de TR_{mid} (s) para salas destinadas a diferentes tipos de música.

2.2 Relaciones energéticas ELR (“Early to Late Ratios”)

Con el fin de estudiar las características del sonido reflejado en una sala, así como su relación con el sonido directo, se utilizan una serie de parámetros que expresan relaciones energéticas ELR (“Early to Late Ratios”) y que dependen del tiempo.

2.2.1 Claridad (con sonido directo) (C_t)

Se define como 10 veces el logaritmo decimal de la relación entre la energía que llega a un oyente dentro de los primeros “t” segundos desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo) y la energía que le llega con posterioridad:

$$c_t = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \quad (\text{en dB}) \quad (5)$$

Donde: p(t) = presión sonora instantánea

2.2.2 Claridad (sin sonido directo) (C_{t0})

Se define como el valor de C_t, una vez excluida la energía correspondiente al sonido directo:

$$c_{t0} = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \quad (\text{en dB}) \quad (6)$$

La evolución de C_{t0} en función del tiempo permite estudiar de forma exclusiva el comportamiento del sonido reflejado, sin la influencia del sonido directo. La diferencia entre las evoluciones temporales de C_t y C_{t0} da una indicación de la importancia relativa del sonido directo en un punto cualquiera de una sala.

2.2.3 Claridad (decaimiento exponencial) (C_x)

Curva ELR teórica correspondiente a un decaimiento puramente exponencial (condiciones de campo difuso):

$$c_x = 10 \log \left(e^{\frac{13,82t}{RT}} - 1 \right) \quad (\text{en dB}) \quad (7)$$

C_x es el equivalente teórico del valor C_{t0}, y corresponde al caso de un campo sonoro totalmente difuso.

Cabe señalar que, a diferencia de lo que sucede con otros parámetros, no existen valores recomendados de C_t y C_{t0}. Más bien, todas las curvas anteriores son útiles para comprobar cómo se comporta el sonido, desde el punto de vista energético, en los distintos puntos de una sala.

2.2.4 Claridad de la voz (C₅₀)

Es el valor de C_t, particularizado para t = 50 ms:

$$c_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_{0,05}^\infty p^2(t) dt} \quad (\text{en dB}) \quad (8)$$

2.2.5 Claridad musical (C₈₀)

Es el valor de C_t, particularizado para t = 80 ms:

$$c_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^\infty p^2(t) dt} \quad (\text{en dB}) \quad (9)$$

Habitualmente se utiliza el valor medio denominado “music average”:

$$c_{80} = (\text{music_average}) = \frac{c_{80}(500\text{Hz}) + c_{80}(1\text{KHz}) + c_{80}(2\text{KHz})}{3} \quad (10)$$

La claridad musical C₈₀ indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

La elección del intervalo temporal de 80 ms se debe a que, cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído junto con el sonido directo y, por tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical. Constituyen, pues, las denominadas primeras reflexiones.

Para la sala vacía que el valor medio de los C₈₀ correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz (denominado “music average”) [4] se sitúe preferentemente entre:

$$-4 \leq c_{80}(3) \leq 0 \text{ dB} \quad (11)$$

En todos los casos deben evitarse valores de C₈₀(3) superiores a +1 dB.

Se propone el siguiente margen de variación para salas ocupadas [6]:

$$-2 \leq c_{80}(3) \leq +2 \text{ dB} \quad (12)$$

Finalmente, cabe destacar el hecho de que el C_{80} (3) no es un parámetro estadísticamente independiente, sino que está altamente relacionado con el tiempo de reverberación RT .

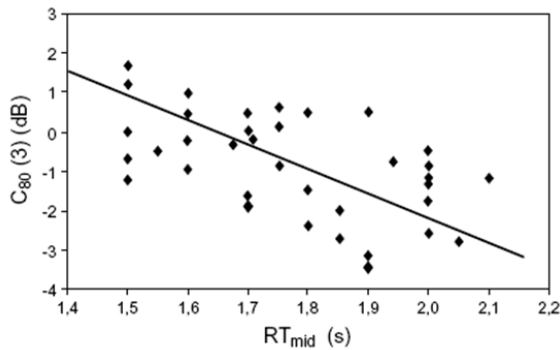


Figura 3: C_{80} (3) (sala vacía) y RT_{mid} (sala ocupada) medido en 36 salas de conciertos [3].

Según se observa, el valor de C_{80} (3) disminuye a medida que el valor de RT_{mid} aumenta (sala más viva).

2.3 Definición (D)

La definición D (del alemán “Deutlichkeit”) es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo [12]. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz:

$$D = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (13)$$

El valor de dicho parámetro para cada punto de una sala ocupada, y en cada banda de frecuencias, debe cumplir que $D > 0,50$.

Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado de la sala.

2.4 Índice STI (Speech Transmission Index)

El índice STI, definido por Houtgast y Steeneken, permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra entre los valores 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad óptima). El STI se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación “m” de la voz debida a la existencia de reverberación y de ruido de fondo en una sala [2]. Las 14 frecuencias de modulación F_m consideradas son las siguientes:

F_m (Hz)
0,63
0,8
1,0
1,25
1,6
2
2,5
3,15
4
5
6,3
8
10
12,5

Tabla 2: Valores de F_m considerados.

Cada una de estas frecuencias produce un efecto de modulación sobre las 7 bandas de octava más representativas de la voz, cuyas frecuencias centrales son las detalladas a continuación:

F_o (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
------------	-----	-----	-----	------	------	------	------

2.5 RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”)

El índice RASTI es una versión simplificada del STI. Por lo tanto, existe una analogía en cuanto al cálculo de ambos parámetros [2].

La simplificación consiste en reducir el número de frecuencias de modulación, así como las bandas de octava a tener en cuenta. En concreto, las bandas de octava consideradas y las frecuencias de modulación asociadas a cada una de ellas son las siguientes [2]:

F_o (Hz)	F_m (Hz)				
500	1	2	4	8	
2000	0,7	1,4	2,8	5,6	11,2

Tabla 3: Frecuencias de modulación consideradas por banda de octava.

2.6 Sonoridad (S)

La sonoridad S (“Speech sound level”) en un punto de una sala se define como la diferencia entre el nivel medio de presión sonora existente en el mismo producido por un actor situado sobre el escenario y el nivel de referencia de 39 dB [3]. Este valor corresponde al nivel medio (promediado en el espacio) que produciría dicha persona al aire libre, a una distancia de 10 m.

Ambos niveles medios se obtienen promediando los valores correspondientes a las bandas de frecuencias centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. Por ello, resulta práctico denominarla S_{mid} :

$$S_{mid} = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \text{ (en dB)} \quad (14)$$

2.7 Calidez Acústica (BR)

La calidez acústica BR (“Bass Ratio”) se obtiene como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de frecuencias de 125 Hz y 250 Hz y la suma de los RT correspondientes a las bandas de frecuencias de 500 Hz y 1 kHz:

$$BR = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1KHz)} \quad (15)$$

Se dice que una sala tiene calidez acústica (o timbre) si presenta una buena respuesta a frecuencias bajas [2]. La palabra “calidez” representa, pues, la riqueza de graves, la suavidad y la melosidad de la música en la sala.

2.8 Brillo (Br)

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

$$Br = \frac{RT(2KHz) + RT(4KHz)}{RT(500Hz) + RT(1KHz)} \quad (16)$$

El término brillante se eligió como indicativo de que el sonido en la sala es claro y rico en armónicos. Es recomendable que el valor de Br para salas totalmente ocupadas [4,5] verifique:

$$Br \geq 0,87 \quad (17)$$

No obstante, conviene tener presente que el brillo no será, por lo general, mayor que 1.

Ello se debe a la pérdida de energía de las ondas sonoras al propagarse a través del aire, causada por la fricción existente entre sus partículas. Dicha inevitable absorción tiene lugar a partir de la frecuencia de 2 kHz, aumenta con la frecuencia y también aumenta a medida que la humedad relativa disminuye. Excepcionalmente, el sonido de una sala puede llegar a ser excesivamente brillante en el caso de que se utilice de forma incorrecta un sistema electrónico de amplificación del sonido.

2.7 Curva de energía reflejada acumulada (RECC)

La curva RECC (“Reflective Energy Cumulative Curve”) se define como 10 veces el logaritmo de la energía que llega a un oyente dentro de los primeros

“t” segundos desde la llegada del sonido directo, excluyendo la energía asociada al mismo [7].

$$RECC(t) = 10 \log \int_{0,005}^t p^2(t) dt \text{ (en dB)} \quad (18)$$

El RECC da una indicación de cómo se acumula la energía reflejada a lo largo del tiempo en un determinado punto de una sala, y permite detectar cualquier anomalía que en él se pueda producir.

La banda de frecuencias considerada va desde 250 Hz hasta 2.000 Hz. Para valores de t inferiores a aproximadamente 100 ms, el valor de RECC se corresponde con la energía asociada a las primeras reflexiones.

Al igual que sucede con los parámetros energéticos ELR, no existen valores recomendados de RECC.

2.8 Espacialidad del sonido: amplitud aparente de la fuente sonora (ASW)

En la audición musical, la amplitud aparente de la fuente sonora ASW (“Apparent Source Width”) se asocia con la sensación de que el sonido que llega del escenario proviene de una fuente de mayor amplitud que la correspondiente a la orquesta real.

La ASW constituye uno de los dos componentes básicos de la denominada espacialidad o impresión espacial del sonido.

Cuanto mayor sea la ASW, mayor será la impresión espacial del sonido y mejor resultará la valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala.

La ASW aumenta con el número de primeras reflexiones que inciden lateralmente sobre el oyente [8] Ello es debido a que el oído las suma con el sonido directo, con lo cual la localización de la fuente tiende a ser ambigua.

Por otra parte, la existencia de primeras reflexiones laterales importantes hace que aumente el grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a los dos oídos, tanto por la diferencia entre los caminos recorridos como por el obstáculo que representa la presencia de la cabeza (figura 4). Quanto mayor sea la diferencia entre ambos sonidos, mayor será la ASW.

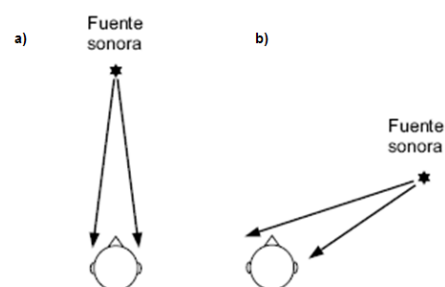


Figura 4: Grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a ambos oídos en función del ángulo de llegada: a) incidencia frontal (sonidos muy parecidos); b) incidencia lateral (sonidos diferentes)

Existen dos parámetros que permiten cuantificar el grado de ASW. Se trata de la denominada eficiencia lateral (LF), relacionada con la energía de primeras reflexiones laterales, y de la llamada correlación cruzada interaural (IACC_E), asociada al grado de disimilitud entre las primeras reflexiones que llegan a ambos oídos. A continuación se definen dichos parámetros.

2.9 Eficiencia lateral (LF)

La eficiencia lateral LF (“Lateral energy Fraction”) se define como la relación entre la energía que llega lateralmente a un oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas direcciones en dicho intervalo de tiempo [8].

$$LF = \frac{\int_{0,005}^{0,08} p^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{0,08} p^2(t) dt} \quad (19)$$

Habitualmente se utiliza el valor obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas desde 125 Hz a 1 kHz:

$$LF_{E4} = \frac{LF(125Hz) + LF(250Hz) + LF(500Hz) + LF(1KHz)}{4} \quad (20)$$

El valor de LF_{E4} para la sala vacía debe cumplir:

$$LF_{E4} \geq 0,19 \quad (21)$$

Cuanto más elevado sea el valor de LF_{E4}, mayor será la ASW y, por consiguiente, el grado de espacialidad del sonido.

2.10 Correlación cruzada interaural (IACC)

La correlación cruzada interaural IACC (“InterAural Cross-Correlation”) se define como la correlación cruzada entre las respuestas impulsionales calculadas en ambos oídos, y es indicativa del grado de similitud existente entre ambas señales. Si las dos señales son iguales, el IACC valdrá 1, mientras que si son señales aleatorias independientes, el IACC será 0.

$$0 \leq IACC \leq 1 \quad (22)$$

Cuando 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”), según se observa en la figura 5.



Figura 5: Cabeza artificial (Dummy head)

Se pueden definir dos IACC [9]: el IACC_E (donde el subíndice E es la inicial de la palabra “Early”), correspondiente a los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, y el IACC_L (donde L es la inicial de la palabra “Late”), calculado a partir de los 80 ms hasta 1 s. El IACC_E se define de la siguiente forma:

$$IACC_E = \max \frac{\int_{0,005}^{0,08} h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{0,005}^{0,08} h_L^2(t) dt \int_{0,005}^{0,08} h_R^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}}; (para |\tau| \leq 1ms) \quad (23)$$

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

Análogamente, el IACC_L se define de la manera siguiente:

$$IACC_L = \max \frac{\int_{0,08}^1 h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{0,08}^1 h_L^2(t) dt \int_{0,08}^1 h_R^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}}; (para |\tau| \leq 1ms) \quad (24)$$

Las bandas de frecuencias más representativas son las centradas en 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz [9]. De aquí surge la definición siguiente:

$$IACC_{E3} = \frac{IACC_E(500Hz) + IACC_E(1KHz) + IACC_E(2KHz)}{3} \quad (25)$$

Habitualmente se utiliza el valor medio de los LF correspondientes a las bandas de frecuencias de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz. Se representa por LFE4:

$$IACC_{L3} = \frac{IACC_L(500Hz) + IACC_L(1KHz) + IACC_L(2KHz)}{3} \quad (26)$$

Desde el punto de vista de la amplitud aparente de la fuente ASW, el $IACC_{E3}$ es el que resulta de interés.

El $IACC_{E3}$ permite cuantificar el grado de disimilitud entre las informaciones sonoras que llegan a ambos oídos, dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo.

Cuanto más diferentes sean, menor será el valor de $IACC_{E3}$. Habitualmente se suele utilizar el valor (1- $IACC_{E3}$), puesto que un aumento del mismo significa una mayor disimilitud entre ambas señales y una mayor amplitud aparente de la fuente sonora.

Debido a que la importancia de este parámetro ha sido reconocida hace poco tiempo, existen relativamente pocas salas en las que se haya procedido a su medida. De todas formas, se ha podido comprobar que su fiabilidad es estadísticamente elevada, es decir, el valor de (1- $IACC_{E3}$) medido en cada una de ellas permite separarlas en tres categorías. Dichas categorías coinciden con las establecidas a partir de valoraciones subjetivas sobre su calidad acústica [2].

En la tabla 4 se indican los valores medios de (1- $IACC_{E3}$) y su correspondencia con dichas categorías,

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

Tabla 4: Correspondencia entre los valores del parámetro (1- $IACC_{E3}$) y la categoría de las salas desde un punto de vista acústico [4,5]

En consecuencia, si bien no existe un valor óptimo para (1- $IACC_{E3}$), se propone para la sala vacía el siguiente valor aproximado [4,5]:

$$(1-IACC_{E3}) \approx 0,70 \quad (27)$$

2.11 Soporte objetivo (ST1)

El ST1 se define como 10 veces el logaritmo de la relación entre la energía asociada a las primeras reflexiones (entre 20 y 100 ms) proporcionadas por las paredes y el techo del escenario, y la energía recibida en los primeros 20 ms, ambos valores obtenidos a 1 m de distancia de una fuente omnidireccional situada en el escenario:

$$ST1 = 10 \log \frac{\int_{0,02}^{0,1} p^2(t) dt}{\int_0^{0,02} p^2(t) dt} \quad (\text{en dB}) \quad (28)$$

Es un parámetro representativo de las condiciones de escucha que experimentan los músicos en el escenario, con o sin concha acústica [10]. Este parámetro representa la capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de la orquesta.

Habitualmente se utiliza el soporte objetivo medio ST1mid. Se define como sigue:

$$ST1_{mid} = \frac{ST1(250Hz) + ST1(500Hz) + ST1(1KHz) + ST1(2KHz)}{4} \quad (29)$$

Los valores más favorables de este parámetro [4,5] son aquellos que se hallan entre:

$$-14 \leq ST1_{mid} \leq -12,5dB \quad (30)$$

La medida de ST1 debe hacerse en condiciones de sala vacía, sin músicos sobre el escenario, pero con todos los elementos que le son propios en su lugar (sillas, atriles, instrumentos de percusión, etc.).

2.12 Ruido de Fondo

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 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (“Noise Criteria”).

Las curvas NC son, además, utilizadas de forma generalizada para establecer los niveles de ruido máximos recomendables para diferentes tipos de recintos en función de su aplicación.

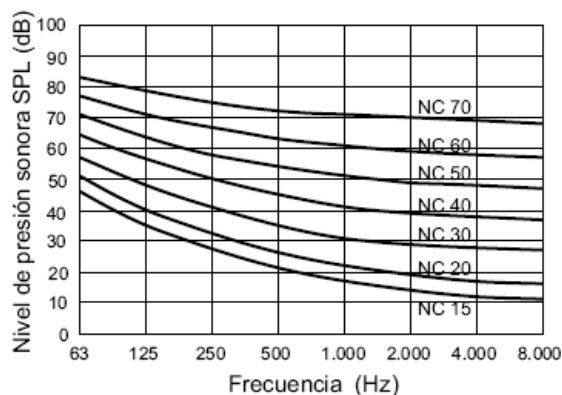


Figura 6: Curvas NC (Noise Criteria)

El cumplimiento de la especificación NC-15 garantiza unos niveles de ruido de fondo suficientemente bajos como para no perjudicar la audición de un “pianissimo” (ppp en nomenclatura musical), pasaje de la composición musical con el nivel más débil. Por lo tanto, dicho cumplimiento permite aumentar el margen dinámico de la orquesta en la sala, entendiéndose por tal la diferencia entre el nivel de presión sonora correspondiente al pasaje más fuerte y el asociado al pasaje más débil interpretado por la misma.

3. PROTOCOLOS DE MEDIDA Y EQUIPAMIENTO

A continuación se describe brevemente diferentes protocolos de medida, con el equipamiento necesario para realizar una medición correcta para cada configuración. Además, se mencionan los diferentes parámetros que se pueden obtener para cada caso.

3.1 Protocolos de medida correspondiente a recintos destinados a la palabra

Los elementos que es preciso utilizar son los siguientes: Ordenador portátil, Analizador acústico, Caja acústica autoamplificada, Micrófono omnidireccional (colocado a una altura de 1,2 m respecto al suelo).

Los parámetros relacionados con la configuración de medida anterior son los siguientes: Ruido de fondo (NC), Tiempo de reverberación (RT), Claridad de la voz (C50), Definición (D), Intelligibilidad de la palabra (RASTI), Sonoridad (S).

3.2 Protocolo de medida correspondiente a recintos destinados a la música

Configuración de medida nº1: medidas con micrófono omnidireccional:

Los elementos que es preciso utilizar son los siguientes: Ordenador portátil, Analizador acústico, Etapa de potencia, Caja acústica omnidireccional (dodecaedro), Micrófono omnidireccional (colocado a una altura de 1,2 m respecto al suelo).

Los parámetros relacionados con la configuración de medida anterior son los siguientes: Ruido de fondo (NC), Tiempo de reverberación (RT), Calidez acústica (BR) y brillo (Br), "Early Decay Time" (EDT), Sonoridad (G), "Initial-Time-Delay Gap" (tI), Relaciones energéticas (ELR): Ct, Ct0, Cx, (Ct0 - Cx), Claridad musical (C80), Curva de energía reflejada acumulada (RECC), Eficiencia Lateral (LF), Soporte Objetivo (ST1)

Configuración de medida nº2: medidas con micrófono bidireccional:

Los elementos que es preciso utilizar coinciden con los de la configuración nº1, exceptuando el micrófono omnidireccional que se sustituye por otro bidireccional.

El parámetro relacionado con la configuración de medida anterior es el siguiente: Eficiencia Lateral (LF).

Configuración de medida nº3: medidas con cabeza artificial ("dummy head"):

Los elementos que es preciso utilizar son los siguientes: Ordenador portátil, Analizador acústico, Etapa de potencia, Caja acústica omnidireccional (dodecaedro), Cabeza artificial (con un micrófono omnidireccional colocado en la entrada de cada oído). El parámetro relacionado con la configuración de medida anterior es el siguiente: Correlación cruzada interaural (IACC).

4. CASO PRACTICO DE ANÁLISIS DE PARÁMETROS

A continuación se presentaran algunas mediciones realizadas en una sala, a partir de las cuales se pueden realizar conclusiones sobre la calidad acústica de la sala, basándose en los parámetros estudiados previamente.

Existen muchas publicaciones que analizan las mediciones hechas en recintos dentro de las cuales se destaca las hechas por Leo Beranek [4,5] en teatros y salas de concierto.

Debido a que no se contó con el equipo necesario para realizar las mediciones que cumplan con la norma, se optó por integrar al informe mediciones fidedignas realizadas por otros investigadores [2], en este caso particular, un estudio realizado sobre el Teatro Municipal de Girona (España).

4.1 Datos geométricos de la sala

- Volumen (sin caja de escenario): 4.000 m³
- Número de asientos: 778
- Superficie útil escenario: 105 m²
- Superficie acústica efectiva audiencia: 460 m²

4.2 Condiciones de medida

- Sala vacía
- Escenario vacío
- Temperatura: 19°C
- Humedad relativa: 45%

4.3 Equipamiento de medida

Los elementos que es preciso utilizar son los siguientes: Ordenador portátil, analizador acústico, caja acústica autoamplificada, Micrófono omnidireccional (colocado a una altura de 1,2 m respecto al suelo).

En la figura 7 se muestran los diagramas polares de directividad (en el plano horizontal) de la caja acústica utilizada correspondientes a las bandas de frecuencias de octava centradas en 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz.

El motivo de elegir una caja acústica con los diagramas polares anteriores es la similitud de los mismos con los correspondientes a los de la voz humana.

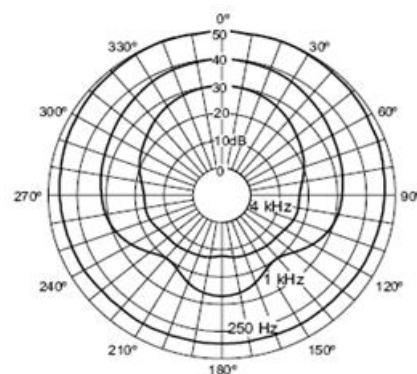


Figura 7: Diagramas polares de directividad de la caja acústica utilizada correspondientes a las bandas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz.

4.4 Puntos de medida

Las medidas se llevaron a cabo en 10 puntos:

- P1 a P4: platea
- P5 y P6: primera planta
- P7 y P8: segunda planta
- P9 y P10: tercera planta

Las medidas se realizaron para las siguientes posiciones de la fuente sonora en el escenario:

A: sobre el eje longitudinal de la sala, a una distancia de 2 m de la boca del escenario y a una altura de 1,5 m respecto al suelo del mismo

B: sobre el eje longitudinal de la sala, a una distancia de 6 m de la boca del escenario y a una altura de 1,5 m respecto al suelo del mismo.

Puntos de medida en el escenario: las medidas en el escenario se realizaron en 3 puntos.

Para cada punto de medida la fuente sonora se situó a 1 m del mismo y a una altura de 1,5 m respecto al suelo.

4.5 Ficha técnica de la sala (valores obtenidos)

Parámetro acústico	Valor medido	Valor recomendado
Ruido de fondo	NC-20(*)	\leq NC-25
Tiempo de reverberación medido RT°_{mid} (500Hz - kHz), sala ocupada	$RT^{\circ}_{mid} = 1,23$ s	$1 \leq RT^{\circ}_{mid} \leq 1,2$ s
Claridad de voz C°_{50} ("speech average"), sala ocupada	$C^{\circ}_{50} = 5,98$ dB	$C^{\circ}_{50} > 2$ dB
Definición D_0 (125 Hz a 4 kHz) sala ocupada	$0,54 \leq D_0 \leq 0,82$	$D_0 > 0,5$
$RASTI_0$, sala ocupada	$RASTI_0 = 0,68$	$RASTI_0 \geq 0,65$
Sonoridad media S°_{mid} (500 Hz - 2kHz) sala ocupada	$S^{\circ}_{mid}(0^{\circ}) = 4$ dB $S^{\circ}_{mid}(90^{\circ}) = 0,82$ dB	$4 \leq S^{\circ}_{mid}(0^{\circ}) \leq 8$ dB $2 \leq S^{\circ}_{mid}(90^{\circ}) \leq 6$ dB
Orientación frontal del actor $S^{\circ}_{mid}(0^{\circ})$		
Orientación lateral del actor $S^{\circ}_{mid}(90^{\circ})$		

Tabla 5: Ficha técnica de la sala.

4.6 Valoración global de la sala

- La valoración global del recinto como teatro es satisfactoria.
- Los tiempos de reverberación medidos son adecuados para representaciones donde la comprensión de la palabra es fundamental.
- La inteligibilidad de la palabra en todos los puntos de la sala medidos es "buena".
- Cuando el actor está situado de cara al público, la sonoridad global de la sala es correcta. En cambio, cuando el actor se sitúa lateralmente, la sonoridad global es ligeramente baja.

5. CONCLUSIONES

Del presente estudio se concluye que los parámetros obtenidos de la respuesta impulsiva de un recinto (que determinan la calidad acústica del mismo) están íntimamente ligados con las estimaciones subjetivas de estudios estadísticos realizados por diversos investigadores [5] acerca de como "suena" un recinto.

Es importante tener en cuenta que una sala puede ser caracterizada con gran precisión en base a sus parámetros acústicos, no todos los parámetros son necesarios para determinados recintos. Además, si bien se puede utilizar el método de respuesta impulsiva para caracterizar una sala destinada a cualquier aplicación, muchos de estos parámetros son principalmente útiles (o mejor aprovechados) en recintos destinados a eventos musicales, los cuales se pueden analizar hoy en día contando con el equipamiento adecuado, y valiéndose del conocimiento teórico de estos parámetros, mas el uso de software de cálculo que facilite la obtención inmediata de cada uno.

6. REFERENCIAS

- [1] Ferreyra S. P., Esquinas P.B., Orecchia I., Martin E. "Diseño y construcción de una cadena de instrumentación electroacústica para la medición de la respuesta al impulso de recintos según norma ISO 3382". Mecánica Computacional. Vol. XXVIII, Pp.: 63-72. Editorial AMCA, 2009.
- [2] Carrión Isbert, Antoni 1998. "Diseño Acústico de espacios arquitectónicos". Edicions UPC. España. 1998.
- [3] Barron, M. 1993 "Auditorium Acoustics and Architectural Design", E&FN Spon, Londres.
- [4] Beranek, L.L. 1962 "Music, Acoustics and Architecture", Wiley, Nueva York
- [5] Beranek, L.L. 1996 "Concert and Opera Halls: How They Sound", Acoustical Society of America, Nueva York.
- [6] Marshall, L.G. 1994 "An acoustic measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio", J. Acoust. Soc. Am. 96, 2251-2261
- [7] Toyota, Y., Oguchi, K. y Nagata, N. 1988 "A study on the characteristics of early reflections in concert halls", J. Acoust. Soc. Am. Supl. 1 84, S130

- [8] Marshall, A.H. y Barron, M. 1981 *“Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls”*, J. Sound Vib. 77, 211-232
- [9] Hidaka, T. Okano, T. y Beranek, L.L. 1991 *“Studies of Inter-Aural Cross Correlation (IACC) and its relation to subjective evaluation of the acoustics of concert halls”*, 122nd Meeting of the Acoustical Society of America, Houston, Texas
- [10] Gade, A. C. 1989 *“Investigations of musician’s room acoustic conditions in concert halls”*, Acustica 69, 193-203 y 249-262
- [11] ISO 3382-1: 2009 *Acoustics -Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces*
- [12] Thiele, R. (1.953) *“Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen”* Acustica 3, 291-302
- [13] Ferreyra S. P., Oscar A. Ramos *“Análisis físico-acústico-espacial de respuestas impulsivas de un recinto con alta dispersión sonora obtenidas por métodos indirectos”*. Mecánica Computacional, Vol. XXVI, Pp.: 3-14, Editorial AMCA, 2007
- [14] Patrizio Fausti and Angelo Farina *“Measurements in opera houses: comparison between different techniques”*

7. DATOS BIOGRAFICOS

Luis García Castellanos, nacido en Córdoba el 04/03/1985. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Actualmente trabaja como desarrollador de software. Sus intereses son: acústica de recintos, procesamiento digital de señales, electrónica digital y desarrollo de software. E-mail: luism.garcia@gmail.com

Franco Adrián Spitale, nacido en Córdoba el 23/02/1985. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: acústica, electroacústica, instrumentación, robótica. E-mail: francospitale10@hotmail.com

Federico Andriollo, nacido en Viedma provincia de Río Negro el 14/07/1983. Estudiante de ingeniería en electrónica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: acústica de recintos, acústica virtual, electrónica digital y desarrollo de software. E-mail: federicoandriollo@gmail.com