



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A180

## **Revisión, evaluación e implementación de normas oficiales de medición del aislamiento acústico aéreo entre recintos**

Alfredo Eugenio González García<sup>(a)</sup>,  
Claudio Andrés Salas Castro<sup>(b)</sup>.

(a) Sonoflex Chile Ltda.. Til-Til 1980, Ñuñoa, Santiago, Chile. E-mail: alfredgg@gmail.com

(b) Control Acústico Ltda.. Villaseca 21 Of. 505, Ñuñoa, Santiago, Chile. E-mail: csalascastro@gmail.com

### **Abstract**

This paper presents a detailed analysis of the traditional official standard ISO 140 that indicates the procedures for measuring airborne sound insulation between rooms. This analysis is based on the appearance of a new standard procedure, ISO18233, in 2006, which uses digital signal processing to obtain the difference in level between rooms with Impulse responses and the use of deterministic signals, in particular, a frequency sweeps upward. As a means of assessing an application was implemented in Windows environment to measure and evaluate airborne sound insulation between rooms, using the new method of measurement. It shows the results of a series of in situ measurements in order to assess and validate the new method, to finally present a comparison between both theoretical and practical method classic and new, indicating the many advantages of applying the latter. The implemented tool and the analysis of the new standard of measurement open a pool of projections regarding studies airborne sound insulation in situ faster, simple, economical and efficient both in its development and in its final assessment and presentation of results.

### **Resumen**

El presente trabajo presenta un análisis detallado de la norma oficial tradicional ISO 140 que indica los procedimientos de medición del aislamiento acústico aéreo entre recintos. Este análisis se fundamenta en la aparición, en el año 2006, de un nuevo procedimiento normalizado, ISO18233, que utiliza procesamiento digital de señales para obtener la diferencia de nivel entre recintos, por medio de respuestas impulsivas y con el uso de señales determinísticas, en particular, barridos frecuenciales ascendentes. Como medio de evaluación se implementó una aplicación computacional en ambiente Windows que permite tanto medir como evaluar el aislamiento acústico aéreo entre recintos, utilizando el nuevo método de medición. Se exponen los resultados de una serie de mediciones in situ con el fin de evaluar y validar el nuevo método, para finalmente presentar una comparación tanto teórica como práctica entre el método clásico y el nuevo, indicando las numerosas ventajas de aplicar este último. La herramienta implementada y el análisis efectuado de la nueva norma de medición abren una serie de proyecciones respecto a la realización de estudios de aislamiento acústico aéreo en terreno más rápidos, simples, económicos y eficaces tanto en su desarrollo como en su evaluación y final presentación de resultados.

## 1 Introducción

Hoy en día los procedimientos de medición y evaluación del aislamiento acústico aéreo entre recintos, en gran parte del mundo, hacen referencia al estándar ISO 140 en sus diferentes partes. La metodología descrita en dicho estándar lleva muchos años acompañando los diferentes estudios de aislación acústica y sin duda nos lleva a preguntarnos si con el paso de los años no existirá una nueva metodología que permita lograr alcanzar los resultados esperados con mayor asertividad, menor margen de error y quizás menor empleo de tiempo en el procedimiento.

Esta búsqueda definitivamente no llegó con el paso del tiempo, sino fue formulada muchos años atrás por Schroeder cuando desarrolla su método de integración de la respuesta impulsiva. Aunque este método inicialmente tuvo otras aplicaciones, no pasó mucho tiempo para que se desarrollaran sus aplicaciones teóricas en el campo del aislamiento acústico. El principal problema tenía en un comienzo relación con la generación del impulso, el cual no era fácil de lograr que tuviese una composición espectral adecuada. Además estaban los problemas de concentración de energía en un tiempo muy pequeño que no permitían alcanzar la relación señal a ruido requerida, especialmente en la sala receptora.

Todos estos impedimentos finalmente fueron siendo superados gracias a los avances en el procesamiento digital de señales y a las nuevas tecnologías aparecidas en los últimos años. De este modo, podemos decir que la integración de Schroeder, tuvo su renacimiento y por fin sus grandes aplicaciones concretas fuera del laboratorio o la teoría. Así nació la nueva norma ISO 3382 en el año 1997 que tomó este procedimiento y casi una década después aparece la nueva norma ISO 18233/2006 que reformula de forma muy importante el procedimiento de medición del aislamiento acústico.

Junto a esta nueva norma, varios estudios han dado sus respectivas evaluaciones al procedimiento ya existente y que sin lugar a dudas fueron fundamentales en el proceso de evaluación del nuevo estándar. Las observaciones efectuadas principalmente hacen referencia a la baja certeza y escasa repetibilidad de las mediciones al aplicar el procedimiento estándar, lo cual conlleva a la necesidad de repetir el procedimiento varias veces para obtener promedios que permitan registrar resultados más confiables y fieles a la realidad. Este problema no solo lleva al empleo de tiempo excesivo, tanto en la etapa misma de medición como en la posterior evaluación de los resultados, sino también al requerimiento de una compleja cadena electroacústica y a la utilización de equipos específicos que claramente, además de requerir de una excesiva cantidad de tiempo en su operación individual, conllevan un aumento significativo de los costos del estudio.

La alta desviación estándar en los resultados obtenidos con el método clásico, dado por el estándar ISO 140-4, se puede atribuir a dos grandes razones; primero, a la excesiva distorsión armónica producida en la generación del ruido aleatorio, especialmente en bajas frecuencias y que no puede ser descartada debido a la naturaleza aleatoria de la señal excitadora; y segundo, a las muy pobres relaciones señal a ruido obtenidas que finalmente se traducen en grandes dificultades para diferenciar las señales a medir con el ruido de fondo, en este caso principalmente en alta frecuencia donde el aislamiento acústico aéreo de las particiones es mayor.

La norma ISO 18233 presenta un nuevo método para realizar mediciones acústicas usando como medio excitador señales determinísticas en vez de señales aleatorias o impulsivas difícilmente reproducibles en forma exacta, como en el método clásico. Entre estas señales excitadoras la norma menciona las señales MLS y los Sweeps como recomendadas para ser utilizadas.

## 2 Teoría

El aislamiento acústico aéreo posee como principal descriptor a la diferencia de nivel, la cual es obtenida mediante la resta de los niveles de presión sonora medidos en la sala emisora y receptora.

$$D = L_S - L_R \quad (1)$$

El método clásico se basa en la medición directa con sonómetro de los niveles de presión sonora en ambos recintos, excitados por ruido aleatorio. Sólo la promediación de un elevado número de repeticiones permite obtener resultados confiables.

Por otro lado, el nuevo método de medición se apoya en la base de considerar a la transmisión sonora como una aproximación a un sistema lineal e invariante en el tiempo. Tomando esta consideración elemental, se pueden emplear las relaciones entre señales excitadoras y sus respuestas, que nos presenta la teoría de procesamiento de señales. Esta teoría toma a la respuesta impulsiva como base de todas las mediciones. De este modo, y considerando la expresión de Nivel de Presión Sonora definida por Schroeder, se puede obtener la diferencia de nivel a partir de la resta de las respuestas impulsivas de cada recinto, según la Ecuación 2.

$$D = L_S - L_R = 10 \times \log \left[ \frac{W_0}{C_{ref}} \int_0^{\infty} h_S^2(\tau) d\tau \right] - 10 \times \log \left[ \frac{W_0}{C_{ref}} \int_0^{\infty} h_R^2(\tau) d\tau \right], \quad (2)$$

$$D = 10 \times \log \left[ \frac{\int_0^{\infty} h_S^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h_R^2(\tau) d\tau} \right], \quad (3)$$

donde  $W_0$  y  $C_{ref}$  son constantes que especifican la potencia de la señal y un valor de referencia arbitrario respectivamente, mientras que  $h_S$  y  $h_R$  son las respuestas impulsivas de las salas emisora y receptora respectivamente.

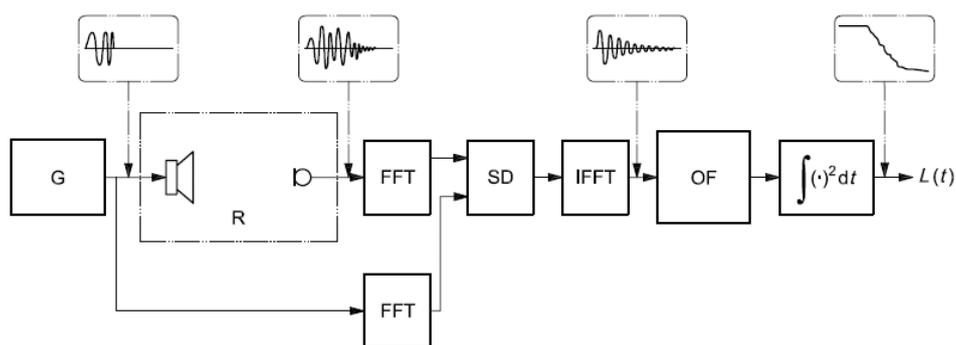
La ecuación (3) se puede expresar en el dominio de la frecuencia mediante la relación de Parseval (ecuación (4)) con lo que la diferencia de nivel se obtiene a través de la resta de las funciones de transferencia de cada recinto.

$$W_0 \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau = \frac{W_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega, \quad (4)$$

$$D = L_S - L_R = 10 \times \log \left[ \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |H_S(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |H_R(\omega)|^2 d\omega} \right], \quad (5)$$

donde  $H(\omega)$  corresponde a la función de transferencia de cada recinto.

Para obtener la respuesta impulsiva de cada recinto, se utilizan barridos frecuenciales con el método de división espectral, de acuerdo a la figura 1.



**Figura 1.** Diagrama en bloque de proceso de deconvolución mediante división espectral.

La elección de puntos de medición, la evaluación de resultados, junto a las requerimientos de relación señal a ruido, así como las condiciones de directividad y la cantidad de ubicaciones de la fuente deben seguir las indicaciones del método especificado en el estándar internacional ISO 140.

Como resultado, el nuevo método obtendrá, en una sola medición, el valor esperado del método clásico ISO 140. No existirán entonces variaciones significativas entre distintas mediciones en el mismo punto, las cuales con el método del ruido aleatorio necesitaban de una promediación elevada para asegurar un resultado confiable. Con respecto a los cambios en las posiciones de los micrófonos, existirá dispersión de los valores medidos al igual que el método clásico, por lo tanto, se mantendrán los valores de incertidumbre.

### 3 Implementación de Software

El software denominado *AC - Aisla* fue implementado en la plataforma Borland C++ Builder 2006 y permite medir en terreno el aislamiento acústico aéreo de particiones en bandas de octava y tercio de octava, con rangos de frecuencia que contemplan mediciones desde la banda de 50 Hz a 5000 Hz, entregando los índices de acuerdo a los estándares y normas ISO 140-4:1998, NCh 2785-2002, ISO 18233:2006, ISO 717/1:1997, ASTM E336:2005 y ASTM E413:1994.

La frecuencia de muestreo utilizada para la generación de los barridos y filtros es de 16 kHz con una cuantización de 16 bits. Se prefirió esta frecuencia de muestreo en vez de la clásica de 44.1 kHz debido a que no se generarían en ningún momento frecuencias superiores a 7 kHz, entonces se cumpliría en todo momento el teorema de Nyquist y de este modo se permitiría reducir el coste computacional de un mayor número de muestras. En el proceso de filtrado de frecuencia se utilizan filtros IIR de sexto orden del tipo Butterworth que cumplen con el estándar IEC 61260.

Los barridos frecuenciales lineal y logarítmico que se utilizan en el software fueron implementados en el dominio de la frecuencia y contemplan distintas duraciones para abarcar distintos tipos de recintos de medición de acuerdo a su tiempo de reverberación. El registro de audio es monocanal y contempla el almacenamiento de cada archivo en formato WAV PCM sin compresión, para futuros estudios o pos-procesos. También se considera el cálculo del tiempo de reverberación mediante el algoritmo de la integral de Schröder. Finalmente, los resultados de las mediciones son exportables en formato de planilla Microsoft Excel como Reporte de Medición. Para las normativas que no contemplan el uso de barridos frecuenciales como señal excitadora, el software permite ingresar los datos de Nivel de Presión Sonora

manualmente a las tablas correspondientes, de forma de obtener los valores globales de aislamiento acústico aéreo bajo estas condiciones.

La interfaz gráfica del software es simple e intuitiva, consistiendo básicamente en ventanas y cuadros de selección de opciones, donde el usuario puede agregar sus preferencias de medición y entrega de resultados, procurando evitar cualquier posible error en el procedimiento. Permite y guía en el desarrollo de las mediciones, indicando el orden de los puntos a medir (previa configuración del usuario), para finalmente promediar energéticamente todas las mediciones efectuadas y calcular los descriptores por banda de frecuencia y valores únicos ponderados, de acuerdo a los estándares requeridos.

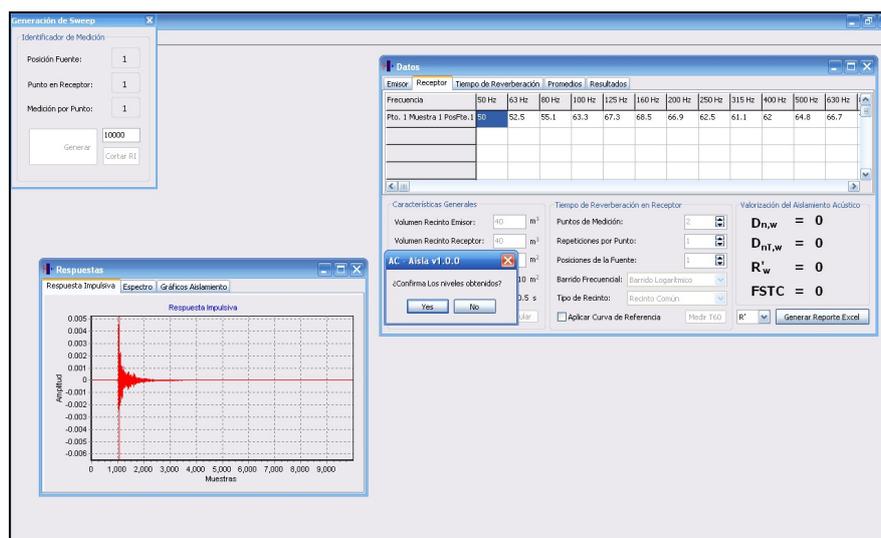


Figura 2. Ventana principal de software AC- Aisla.

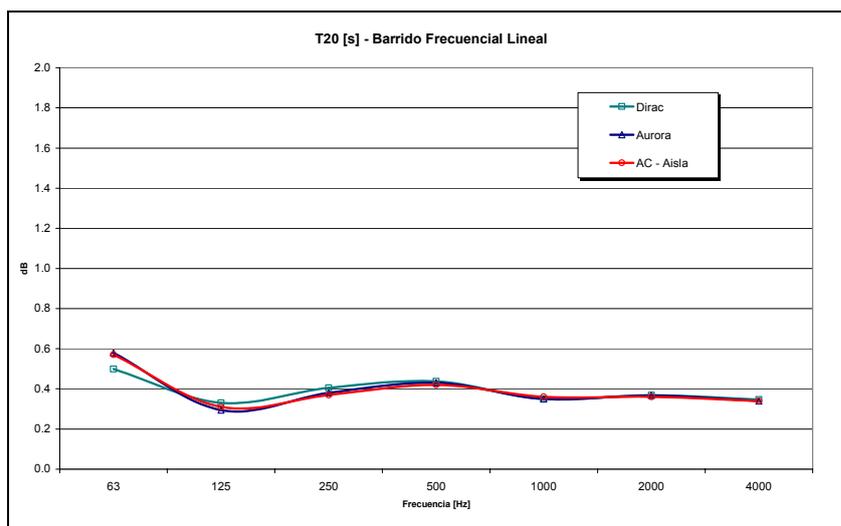
#### 4 Validación del Software Implementado

Para verificar la efectividad del software, se realizaron 2 estudios comparativos, siendo el primero el análisis del algoritmo de procesamiento de señales para la obtención de la respuesta impulsiva de los sistemas. Se compararon varias aplicaciones computacionales que ya traían incorporado este cálculo como base para otros usos en audio y acústica, entre éstos se estudiaron los software Dirac y el plugin Aurora para Cool Edit Pro en comparación con el software desarrollado AC-Aisla. Se realizaron 3 mediciones individuales de la respuesta impulsiva de un recinto con cada software en un mismo punto, con un mismo micrófono y con la misma ubicación de la fuente acústica, obteniéndose el descriptor T20 como unidad de comparación, cuyos resultados se pueden apreciar en el Figura 3.

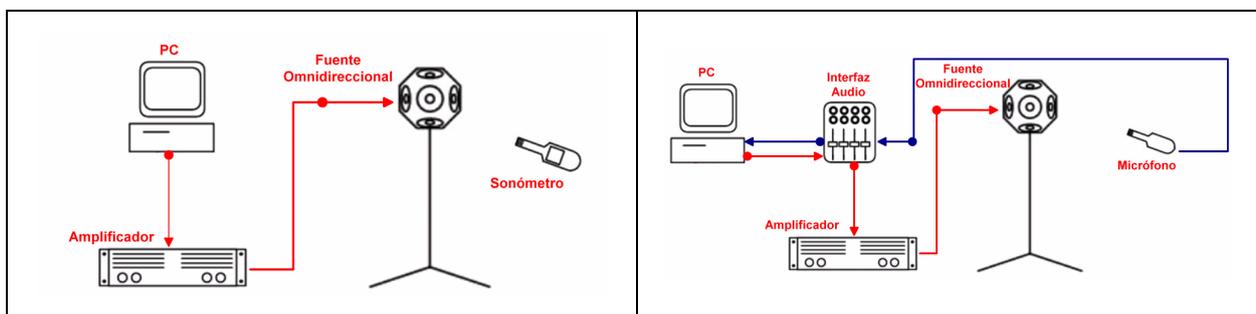
De acuerdo a lo expuesto en la Figura 3, se aprecia una notoria similitud entre los valores de T20 por banda para todo el espectro de frecuencia obtenidas con AC – Aisla, Aurora y Dirac, obteniéndose sólo una pequeña diferencia menor a 0.1 segundos en la banda de 63 Hz atribuible a que la cadena electroacústica no contempló una unidad de bajas frecuencias.

Una vez validado el algoritmo de obtención de la respuesta impulsiva, se realizó una comparación directa del procedimiento de medición del aislamiento acústico in situ, entre la metodología clásica basada en ruido aleatorio indicada por la norma ISO 140-4 y la nueva propuesta basada en el cálculo y procesamiento de las funciones de transferencia de los recintos, las cuales derivan de la respuestas impulsivas de los mismos. Este último procedimiento es el detallado en la nueva norma internacional ISO 18233. Para ello se

realizaron mediciones de 3 particiones distintas, dos de éstas fueron medidas en habitaciones comunes de edificios habitacionales, mientras que la última se realizó en un ambiente más controlado, el cual fue el laboratorio de mediciones acústicas del IDIEM. Se realizaron mediciones de diferencia de nivel v/s frecuencia tanto por bandas de octava como de tercio de octava con ambos métodos, aplicando barridos lineales y logarítmicos para la ISO 18233, y ruido blanco y rosa para el método clásico definido en la ISO 140-4. La cadena electroacústica empleada para cada caso se presenta en la Figura 4.



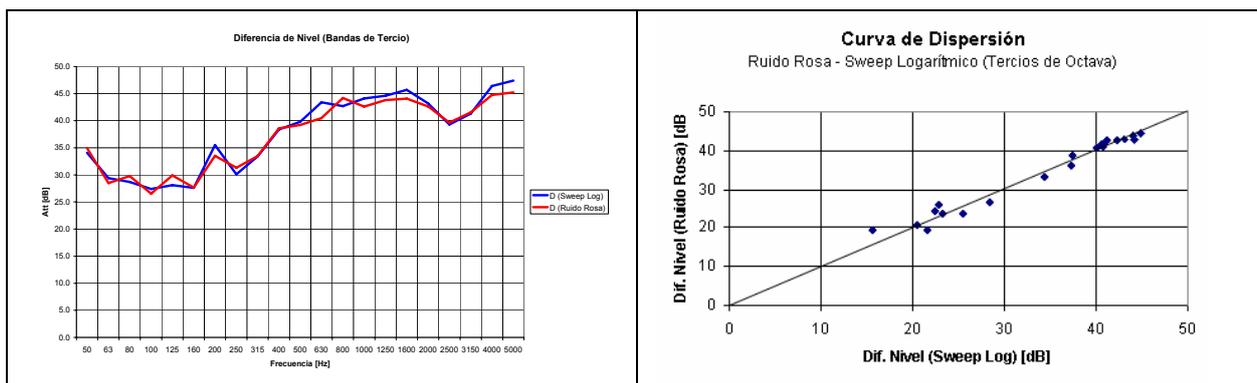
**Figura 3.** Gráfico de valores de T20 obtenidos a partir de la respuesta impulsiva calculada mediante cuatro softwares comparados.



**Figura 4.** Cadenas electroacústicas implementadas para método clásico (izquierda) y nuevo método (derecha).

La figura 5a muestra gráficamente los resultados de una de las evaluaciones realizadas, específicamente comparando mediciones con ruido rosa, para el método clásico, y barrido frecuencial logarítmico para el nuevo método. De forma de evaluar cada una de las comparaciones de espectros obtenidas, se efectuó un análisis de dispersión de éstas, detallado en la figura 5b, obteniendo el coeficiente de correlación<sup>1</sup> de Pearson para cada caso, según la Tabla (1).

<sup>1</sup> Índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas.



**Figura 5.** Gráficos de comparación de mediciones realizadas con método clásico y nuevo. a) espectros de Diferencia de Nivel en bandas de tercio de octava. b) Curva de dispersión del mismo ensayo.

**Tabla 1.** Coeficientes de correlación de Pearson para ensayos realizados.

Partición Ensayada	Coeficiente de Correlación			
	Bandas de Tercio de Octava		Bandas de Octava	
	Rosa - Logaritmico	Blanco - Lineal	Rosa - Logaritmico	Blanco - Lineal
Partición A	0.987	0.985	0.992	0.996
Partición B	0.985	-----	0.979	-----
Partición C	0.922	-----	-----	-----

De acuerdo a lo observado en la Tabla (1), se aprecia que los coeficientes de correlación de Pearson para las particiones A y B siempre superan el valor de 0.97, lo cual demuestra una mínima diferencia entre ambos métodos. Para la partición C se aprecia una correlación menor, lo cual se atribuye a problemas de estabilización de la señal de excitación. Esta condición fue advertida y derivó en la modificación de los barridos frecuenciales implementados, dando la opción al usuario de elegir el largo de acuerdo al tiempo de reverberación estimado de la sala receptora.

### 5 Conclusiones

Los objetivos propuestos para el presente trabajo, desde el diseño e implementación del software hasta el análisis detallado de la nueva normativa de medición de aislamiento acústico aéreo, fueron cumplidos total y satisfactoriamente.

Respecto al software implementado, se obtuvo una aplicación totalmente autónoma para la medición del aislamiento acústico aéreo de cualquier tipo de partición ya sea in-situ o en laboratorio, aplicando la nueva normativa ISO 18233. Éste permite ordenar en forma adecuada y lógica las mediciones y entregar los resultados en forma inmediata y precisa, con un ahorro de tiempo considerable en el proceso completo de evaluación del grado de aislamiento acústico aéreo de un divisorio. Se integró desde la generación de las señales de prueba hasta la obtención de un reporte final en formato Microsoft Excel para la directa inclusión en un informe particular de medición.

Comparando el método clásico con el nuevo, se concluye que el empleo de barridos frecuenciales como señal de excitación posee amplias ventajas respecto a la utilización de ruido aleatorio. El uso de señales determinísticas asegura una mayor repetibilidad en las mediciones, ya que la señal excitadora se puede reproducir en forma exactamente igual para cada medición, lo cual implica menor cantidad de promediaciones y una disminución considerable del tiempo de medición. Por el contrario, el método clásico utiliza señales que por su naturaleza son aleatorias y por lo tanto, será muy difícil lograr repetir en forma exacta dos mediciones incluso en un mismo punto. Por otro lado, la nueva metodología permite aislar y eliminar de la respuesta impulsiva la distorsión introducida por cada uno de los elementos que componen la cadena electroacústica utilizada para las mediciones. En cambio, las funciones aleatorias del método clásico conllevan ruido y distorsión también aleatoria, siendo imposible su aislamiento y por ende imposible también su sustracción. Esta ventaja de los barridos frecuenciales, en conjunto con un menor factor cresta (o pérdida de energía) permite aumentar considerablemente la relación señal a ruido, lo cual es de vital importancia para obtener buenos resultados en mediciones donde el ruido de fondo es considerable. Gracias, por una parte, a que los barridos frecuenciales logran una mayor relación señal a ruido en la medición, y también a su propiedad y ventaja de no emitir todas las componentes espectrales en un mismo instante, como ocurre con el ruido rosa y blanco, podemos observar finalmente que no existe la necesidad de requerir tan grandes potencias de emisión sonora como sí eran necesarias con el procedimiento clásico. Esta disminución de la potencia, implica una menor distorsión en la señal y la posibilidad de utilizar altavoces de menor potencia acústica y menor grado de protección contra distorsiones elevadas que, por supuesto, tendrán un costo menor y serán de más fácil acceso. Además, otra de las ventajas observadas en el nuevo método es la no dependencia del sonómetro tipo 1 con filtros de bandas de tercio de octava, exigido y requerido de acuerdo al método clásico. En el presente estudio se comprobó que con el uso de un simple micrófono omnidireccional y un software que aplique el nuevo método de medición, se puede llegar a un mismo resultado de evaluación de aislamiento acústico aéreo, por lo tanto, la reducción del costo gracias al ahorro de estos instrumentos es un elemento importante a considerar.

Dentro de los inconvenientes que presenta la nueva metodología se incluye la limitación que nos trae el hardware aplicado para la generación y captación del sonido. Se requiere una interfaz de audio que posea un alto rango dinámico, de modo de no saturar el canal de entrada en el recinto emisor, y a la vez diferenciar la señal de interés del ruido de fondo en el recinto receptor. Para particiones con un alto grado de aislamiento esta característica muchas veces no es posible de lograr. Dicho problema se solucionó implementando una metodología especial de corrección automática utilizando el dispositivo PAD que traen muchas tarjetas de audio.

Además, como el nuevo método requiere de estar frente a un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI) en todo momento para que sean válidas todas las ecuaciones implicadas en el método, se debe tener especial cuidado con las variaciones atmosféricas o cualquier otro cambio en la cadena electroacústica implementada mientras se efectúan las mediciones.

La nueva normativa ISO 18233 plantea un gran avance en cuanto a la normalización de metodologías situadas en un contexto más cercano a las tecnologías actuales. Las grandes ventajas del nuevo método en comparación con la metodología ya existente, nos llevan a afirmar que la normalización del método era una tarea necesaria, justificada y requerida. Por lo tanto, ahora su utilización podrá ser masificada y menos confinada a pocos expertos y conocedores de la técnica. Considerando que la metodología necesita de un procesamiento matemático complejo, se requiere de una plataforma computacional o electrónica que

permitan efectuar estas operaciones. Esta necesidad se transforma en un elemento que podría afectar negativamente a la utilización masiva de la normativa, sin embargo, considerando que hoy en día las instituciones, empresas y los usuarios poseen comúnmente computadores portátiles, la inclusión de un software adicional como el implementado en el presente trabajo, debería solucionar este problema y ayudar a masificar su uso.

Respecto al procedimiento de medición indicado en la nueva normativa, se plantea mantener la cantidad y distribución de puntos de medición y posiciones de la fuente sonora, así como su promediación espacial, respecto de la normativa clásica. Esto se contradice con la gran ventaja del nuevo método respecto al mejoramiento de la repetibilidad en las mediciones y por ende la disminución de su desviación estándar. Con los resultados obtenidos en el presente trabajo y otros, se está demostrando que la normativa podría haber sido más agresiva en proponer la eliminación de las repeticiones por punto y una reducción en la cantidad de posiciones de los micrófonos y de la fuente sonora, en los casos en que se presenten recintos con una difusión bien controlada.

En definitiva, la norma ISO 18233, a pesar de poseer algunas falencias a corregir en el futuro, nos presenta un gran avance en lo que se refiere a la modernización de la metodología de medición del aislamiento acústico aéreo. Su entrada en vigencia nos trae incontables posibilidades de proyectos de aplicación futuros y de uso masivo, que podrían afectar muy positivamente a la fiscalización de las disposiciones legales y al mejoramiento del proceso constructivo de modo que no afecte significativamente al proyecto, ni desde el punto de vista económico ni operativo.

## Referencias

- Farina, Angelo (2000). "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique".
- ISO 140, Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements.
- ISO 18233:2006, Acoustics — Application of a new measurement method in building acoustics.
- ISO 3382:1997, Acoustics: Measurement of the reverberation time of rooms with references to other acoustical parameters.
- Massarani, P.; Nabuco, M.; Venegas, R (2005). "Level adjustment for multi-channel impulse response measurements in building acoustics", Proc.34rd Internoise, Rio de Janeiro, Brazil.
- Müller, S.; Massarani, P (2001). "Transfer Function Measurement with Sweeps", J. Audio Eng. Soc., Vol. 49, No. 6.
- Schroeder, Manfred (1979) "Integrated impulse method for measuring sound decay without using impulses", Journal of the Acoustical Society of America.
- Undurraga, Jaime; Uribarri, Mauricio (2004). "Medición de respuesta impulsiva multicanal de sistemas acústicos usando sweeps".
- Venegas, Rodolfo; Nabuco, Marco; Massarani, Paulo (2004). "Transfer Function Measurements Applied to Sound Insulation Evaluation: The Viability to use less positions of sound source".