

## **IDONEIDAD DE UN GRABADOR DIGITAL COMERCIAL PARA SU EMPLEO EN MEDICIONES ACÚSTICAS**

**FEDERICO MIYARA<sup>1,2</sup>, ERNESTO ACCOLTI<sup>1,2</sup>, VIVIAN PASCH<sup>2</sup>, SUSANA CABANELLAS<sup>2</sup>, MARTA YANITELLI<sup>2</sup>, PABLO MIECHI<sup>2</sup>, FERNANDO A. MARENGO RODRIGUEZ<sup>1,2</sup>, EZEQUIEL MIGNINI<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Escuela de Ingeniería Electrónica, Laboratorio de Acústica y Electroacústica, Rosario, Argentina.  
fmiyara@fceia.unr.edu.ar; eaccolti@fceia.unr.edu.ar;  
fmarengorodriguez@yahoo.com.ar; ezequielmignini@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño, Departamento de Física, Grupo Ruido, Rosario, Argentina.  
pasch@fceia.unr.edu.ar; scabanel@fceia.unr.edu.ar;  
myanitel@fceia.unr.edu.ar; pmiechi@gmail.com;

*Resumen – La adquisición de señales en la metrología acústica es una creciente necesidad tanto en la investigación como en el trabajo de campo. Muchos especialistas piensan que se deberían introducir nuevos indicadores para describir el efecto del ruido como el espectro, el contenido semántico y las propiedades psicoacústicas del ruido, los cuales requieren un conocimiento previo de la historia de la señal. Actualmente existen muchos grabadores de instrumentación (algunos de los cuales son actualizaciones opcionales para modelos de sonómetros recientes), pero usualmente son caros. Se explora la posibilidad de usar un grabador digital relativamente económico (Zoom H4) en combinación con la salida calibrada de un sonómetro de precisión. La mayor preocupación se centra en los efectos de alta frecuencia provenientes del filtro antialias del conversor analógico-digital. Se probaron extensamente tres unidades del mismo modelo del grabador digital, en términos de la respuesta en frecuencia, del ruido, de la distorsión y de la respuesta transitoria a dos tasas de muestreo: 44100 Hz y 96000 Hz. Se monitorearon las señales eléctricas de excitación al grabador mediante un voltímetro y un osciloscopio, y las secuencias registradas se transfirieron a una PC de escritorio para su análisis por software. Las pruebas revelaron que el grabador es adecuado para su inclusión en un sistema de medición.*

*Abstract – Signal acquisition in acoustical metrology is an increasing need in research and fieldwork. Many specialists think that new indicators should be introduced to describe effects of noise arising from features such as spectrum, semantic content and psychoacoustic properties of noise, all of which require knowledge of the time history of signal. While there are several instrumentation grade recorders (some of which are optional upgrades for recent models of sound meters), they are usually expensive. The possibility of using a relatively inexpensive digital recorder (Zoom H4) in combination with the calibrated output signal of a precision sound level meter is explored. The major concern arises from the high frequency effects of the antialiasing filter of the analog to digital converter. Three units of the same model of digital recorder were extensively tested as regards frequency response, noise, distortion and transient response at two sampling rates, 44100 Hz and 96000 Hz. Electrical signals applied at the recorder input were monitored with a volt meter and an oscilloscope, while the recorded digital signal was transferred to a computer for software analysis. Tests reveal that the recorder is suitable for use as part of a measurement setup.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la metrología acústica, la adquisición de señales es una necesidad creciente tanto en la investigación como en el trabajo de campo. Muchos especialistas sugieren que deberían introducirse nuevos indicadores para describir los efectos del ruido derivados de características tales como el espectro, el contenido semántico y las propiedades psicoacústicas, para lo cual se requiere conocer la historia temporal de la señal. Otras aplicaciones incluyen la experimentación sobre los efectos del ruido empleando sonidos naturales, la simulación aural de ambientes y paisajes sonoros, y la mejora de la reproducción de sonidos.

Tradicionalmente, la adquisición de señales de audio ha sido posible a través del uso de grabadores de instrumentación, por ejemplo, el grabador digital de audio de cinta (DAT). Varios equipos existentes en el mercado, tales como el DAT portátil, el de minidisco (MD) y el de disco duro (HD), ya han sido estudiados con respecto a su idoneidad para el mismo uso [1], [2]. El DAT y el HD se han encontrado adecuados para prácticamente todas las aplicaciones, mientras que el MD ha mostrado una respuesta en frecuencia algo irregular a altas y bajas frecuencias, como así también un rango dinámico efectivo reducido para la recuperación de tonos puros en un pozo espectral angosto.

Recientemente, ha surgido una nueva tecnología que usa una memoria flash de estado sólido removible como medio de grabación. Son ejemplos las tarjetas de memoria SD, HCSD o CF. La baja potencia y capacidades de almacenamiento que exceden los 8 Gb permiten efectuar grabaciones continuas durante más de 12 horas, constituyéndose en una tecnología muy adecuada para sesiones de grabaciones de campo de larga duración. Como estos grabadores no emplean partes mecánicas, su operación es completamente silenciosa, siendo ideales para grabar en ambientes de muy bajo ruido.

A pesar de que existen sonómetros que permiten la grabación digital, esta característica incrementa considerablemente el costo del instrumento, aun cuando la opción es sólo una actualización de software. Por ejemplo, la licencia para la grabación de sonido del equipo Brüel & Kjaer Tipo 2250 tiene un costo de más de U\$S 2000, mientras que el grabador digital Zoom H4 de dos canales está valuado en alrededor de U\$S 600 (precios en el mercado argentino en 2009).

En un trabajo anterior se presentó un estudio sobre el diseño de algoritmos para el análisis espectral a los efectos de reemplazar a los costosos equipos analizadores de espectro [3]. Sin embargo, debe señalarse la legítima preocupación en cuanto a si la calidad de la señal digital es suficiente para cumplimentar con las normas. Normas internacionales tales como las ISO 1996-2:2007 especifican que para que una pieza del equipo sea

idónea para propósitos de medición, el sistema completo de instrumentación que la incluye debería cumplir plenamente con la norma IEC 61672 [4], [5] sobre sonómetros. Esto significa, en particular, que los límites de tolerancia para la respuesta en frecuencia son muy estrictos. Además, se incluyen otras condiciones sobre ruido auto-generado, linealidad y respuesta transitoria.

El propósito de este trabajo es informar sobre las pruebas llevadas a cabo con el grabador digital Zoom H4 para validar su uso como parte del sistema de instrumentación.

## 2. ESPECIFICACIONES DEL GRABADOR DIGITAL

El grabador digital Zoom H4 permite el uso de tres tasas de muestreo: 44,1 kHz, 48 kHz, y 96 kHz, y dos resoluciones: 16 bit y 24 bit. Aunque el muestreo a 96 kHz puede mejorar la respuesta en frecuencia, en la mayoría de los casos el uso de una resolución de 24 bit es innecesaria y sólo incrementará el tamaño del archivo. El formato de grabación puede ser .WAV o .MP3. Este último formato no se recomienda porque usa una compresión de audio con pérdidas que podría suprimir componentes espectrales significativas. El nivel de la señal de entrada de línea se especifica como  $-10$  dBm. Sorprendentemente, no se provee información con respecto a la relación señal-ruido y a la distorsión [6].

El grabador tiene dos entradas combinadas (coaxiales) XLR balanceadas y de 1/4" no balanceada. Tiene también dos micrófonos montados en una configuración X-Y, sin embargo, no hay posibilidad de calibrarlos y no se garantiza la respuesta en frecuencia y la estabilidad a largo plazo de manera que su uso no está recomendado para propósitos de medición.

## 3. PRUEBAS

Se han realizado varias pruebas sobre el grabador en lo que concierne a su respuesta en frecuencia, respuesta transitoria, performance del ruido y linealidad.

### 3.1 Respuesta en frecuencia

Para analizar la respuesta en frecuencia se emplearon dos tipos de señales: tonos puros y barridos de frecuencia. Los tonos son las señales ideales de prueba, pero se necesitarían muchos de ellos para detectar posibles rizados en las cercanías de la frecuencia de Nyquist (la mitad de la tasa de muestreo). En cambio, los barridos permiten cubrir todas las frecuencias, siempre que la frecuencia instantánea de la señal de prueba se incremente a una tasa suficientemente baja como para evitar un excesivo ensanchamiento espectral.

Cuando la frecuencia de entrada se acerca al límite de Nyquist, la secuencia discreta tiene más de

dos muestras por ciclo. La forma de onda deja de ser evidente a partir de la observación de las muestras, que parecen agruparse visualmente en patrones de tipo Moiré (lo cual puede considerarse una especie de aliasing visual), tal como se muestra en la Figura 1. Sin embargo, dado que la señal de entrada ha pasado por un filtro antialiasing antes de muestrearse, es teóricamente posible recuperar la señal original (vía interpolación sinc).

Nos interesa solamente el valor RMS de la señal grabada. Se podría, por ejemplo, sobre-muestrear y aplicar un filtro de suavizado. Sin embargo, esto es innecesario ya que el valor RMS se puede calcular a partir de las muestras originales, siempre que se consideren varios períodos de la señal. Esto es cierto aun para las secuencias con frecuencia cercana al límite de Nyquist. Otro enfoque consiste en detectar el máximo de las muestras en un intervalo alrededor del instante deseado, lo cual se aproxima al pico de la onda senoidal ideal. De este máximo se detecta el valor RMS buscado.

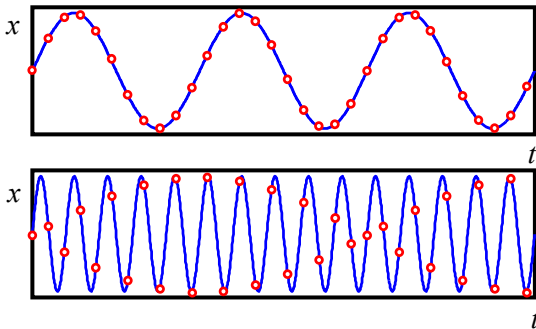


Figura 1: Patrón de muestreo para tonos muy por debajo (figura superior) y cercanos (figura inferior) al límite de Nyquist.

Se puede mostrar por simulaciones que ambos métodos son adecuados [7]. Sin embargo, el enfoque del máximo requiere la extracción de menos muestras para alcanzar el valor correcto con una tolerancia especificada. Esto se vuelve más importante en el caso de barridos de frecuencia, dado que se debe asegurar la detección del valor RMS antes de que haya un cambio significativo en la frecuencia. Se usaron barridos logarítmicos de 100 s. Con el fin de mantener la resolución temporal (y por ende frecuencial), se adoptaron intervalos de alrededor de 200 muestras, excepto en el extremo de bajas frecuencias donde se trabajó con dos períodos. En algunos casos, especialmente en altas frecuencias, se encontraron máximos de pequeña amplitud en secuencias largas. Éstos no representan disminución alguna en la respuesta en frecuencia y se corrigen fácilmente mediante la quita de muestras que representen una disminución brusca de la respuesta con respecto a las frecuencias vecinas en un umbral previamente asignado en 0,02 dB.

La mejor y la peor respuesta se ilustran en la Figura 2. Ambas presentan un aspecto algo ruidoso.

Esto se debe a una pequeña distorsión del sintetizador de señales, al ruido eléctrico y a la influencia del ruido en el método de detección de amplitud. Dado que el mencionado ruido posee niveles muy inferiores a los valores principales, prácticamente no influye.

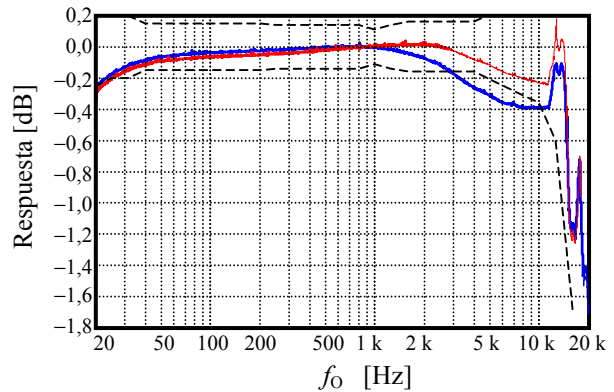


Figura 2: Respuesta en frecuencia del mejor y del peor grabador digital Zoom H4 obtenido con un barrido en frecuencia sintetizado con el SRS DS 345 a  $T = 24\text{ }^\circ\text{C}$ . La tasa de muestreo es 44,1 kHz. Las líneas de trazos muestran 1/10 de los límites de tolerancia superior e inferior mencionados en el Estándar Internacional IEC 61672-1 para la respuesta en frecuencia de un sonómetro clase 1.

Para una dada unidad de H4 la respuesta es esencialmente invariable en sucesivas las pruebas. Con fines comparativos, también se muestra un décimo de las tolerancias de la respuesta en frecuencia especificado en la Norma Internacional IEC 61672-1 para un instrumento clase 1.

Cuando la temperatura aumenta de  $24\text{ }^\circ\text{C}$  a  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , se observa una pequeña diferencia en la respuesta en frecuencia, como se muestra en la Figura 3.

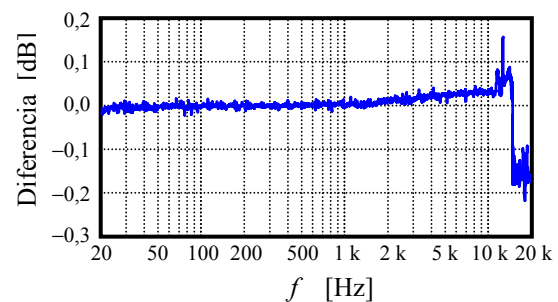


Figura 3: Diferencia entre las respuestas en frecuencias del Zoom H4 obtenidas con  $T = 40\text{ }^\circ\text{C}$  y  $T = 24\text{ }^\circ\text{C}$ .

Como se puede apreciar, la respuesta en frecuencia es aceptable dado que aún el peor caso está por debajo de los límites de tolerancia. La caída brusca en las proximidades de 16 kHz se debe a la alta sensibilidad causada por la pendiente muy negativa de la respuesta en esa frecuencia.

### 3.2 Ruido

El ruido interno está compuesto por ruido analógico (debido a fuentes misceláneas como ruido térmico y ruido de emisión) y ruido digital incluyendo el de discretización y dithering. Con el fin de medir el ruido térmico, se grabó con la entrada cortocircuitada. Al archivo .WAV se lo procesó vía software de PC para obtener su valor RMS y analizarlo vía FFT (transformada rápida de Fourier). También por medio de PC se le aplicó ponderación A al ruido estudiado. La Figura 4 muestra la densidad espectral del ruido detectado en la unidad H4 más ruidosa, con tasa de muestreo de 44,1 kHz y resolución de 16 bit. A pesar de que hay diferencias entre las unidades analizadas, tasas de muestreo o resoluciones, éstas parecen ser aleatorias y no se detecta ningún efecto significativo producido por alguno de estos factores.

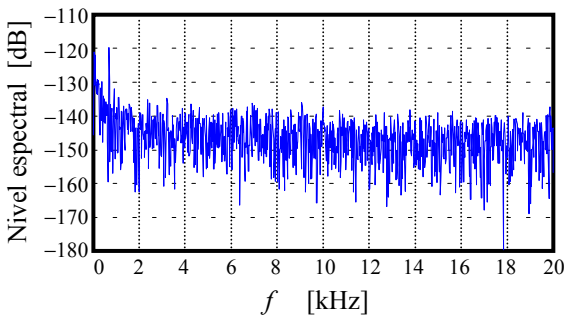


Figura 4: Ejemplo del peor caso de nivel espectral de ruido del Zoom H4 referenciado a la máxima salida digital. La señal se grabó con la entrada cortocircuitada y la resolución adoptada fue de 16 bit.

El peor caso de relación señal-ruido no ponderado fue de 91,7 dB mientras que la relación señal / ruido ponderada A fue de 95,9 dBA, en ambos casos referidos a una onda senoidal sin distorsión de máxima amplitud. Esto significa que si se graba un tono de calibración de 94,0 dB a máxima amplitud, se pueden grabar satisfactoriamente señales 20 dB menores con un error menor a 0,1 dB. La mayoría de los sonómetros poseen un ruido inherente mínimo del orden de 20 dB.

### 3.3 Linealidad

Se evalúa la linealidad de dos formas diferentes. Primero, comparando su efecto en la señal grabada para varios niveles de entrada. Esta es la prueba estándar especificada en la norma IEC 61672. En la segunda forma, se computa la distorsión total armónica (THD) para varios niveles de entrada. Se realizaron ambas pruebas usando un tono modulado por un leve decaimiento exponencial (de duración  $T = 20$  s; constante de tiempo  $\tau = 8,69$  s; rango dinámico: 80 dB). En el primer caso (Figura 5), se calculó la envolvente de la energía con un filtro digital de primer orden con  $\tau = 0,05$  s y se la comparó en escala logarítmica con la respuesta de amplitud

teórica sin distorsión. Se la expresó como la diferencia entre la respuesta real y una respuesta ideal.

En el segundo caso (Figura 6), se aisló la componente fundamental de las restantes armónicas por medio de un filtro FFT multibanda de alta selectividad con el fin de reducir el efecto del ruido residual de banda ancha. Luego se computaron y compararon los valores RMS de estas componentes. Como se puede ver, las armónicas 2, 3, ... disminuyen más rápidamente que la fundamental, razón por la cual la THD decrece suavemente a alrededor del 0,02 %. A medida que disminuye el nivel de la señal, la THD comienza a incrementarse nuevamente debido a la distorsión digital en niveles muy bajos. En  $-73$  dB (referido al máximo nivel digital), la THD es alrededor del 5 %, lo que equivale a un error de 0,42 dB.

Se puede observar un error inesperado cercano a los  $-32$  dB. Hay un cambio abrupto en el error de alrededor de 0,2 dB. Esto no afecta el cumplimiento de la normativa IEC, ya que la máxima diferencia después de un cambio de nivel entre 1 dB y 10 dB debe ser menor que  $\pm 0,6$  dB. Una vez más, para niveles inferiores a  $-70$  dB la THD se incrementa rápidamente como consecuencia de la distorsión digital. Además, hay un efecto espurio del ruido intrínseco.

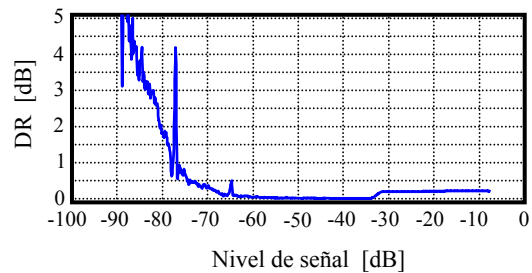


Figura 5: Respuesta real menos respuesta ideal representado como  $DR = 20 \log(V_{RMS-real} / V_{RMS-ideal})$ .

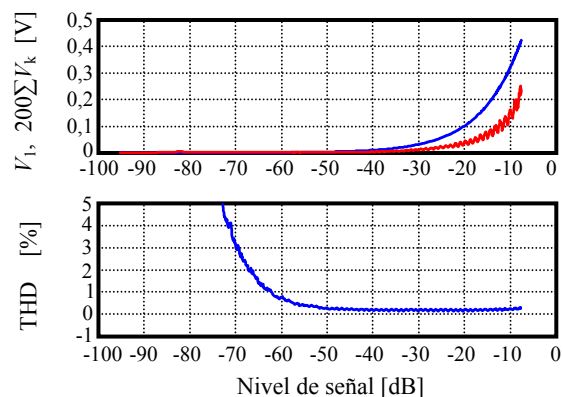


Figura 6: Análisis de linealidad. Arriba: Primera armónica (azul) y armónicas restantes (rojo) multiplicada por un factor de 200 a fines comparativos. Abajo: Distorsión total armónica. En ambos casos la frecuencia es de 1 kHz. La referencia de audio digital es la señal digital máxima.

### 3.4 Respuesta transitoria

Se evaluó la respuesta transitoria usando onda cuadrada. Se encontró que la respuesta en frecuencias altas no es exactamente la misma en distintas unidades del modelo H4, pero se halló una cota superior del tiempo de establecimiento del 5 %. Las respuestas son oscilantes sólo para la tasa de muestreo de 44,1 kHz como se muestra en la Figura 7. Se determinó que el tiempo de establecimiento es a lo sumo 104  $\mu$ s para 96 kHz y 136  $\mu$ s para 44,1 kHz.

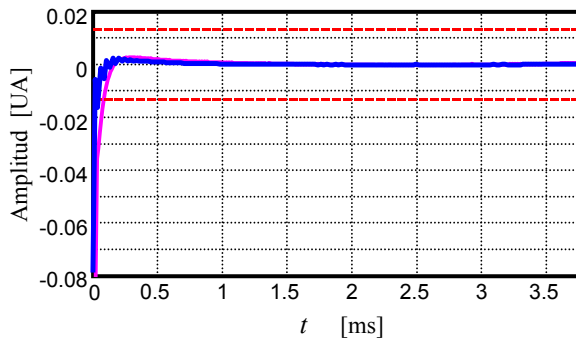


Figura 7: Respuesta al escalón para 44,1 kHz (azul) y 96 kHz (magenta). En rojo, los límites del 5%.

### 4. INCERTIDUMBRE

Con el fin de cumplir con la norma IEC 61672, el grabador debería exhibir una incerteza de a lo sumo 0,1 dB. Se generaron las señales de prueba usando un generador de funciones sintéticas Stanford Research Systems DS 345. De acuerdo a sus especificaciones [8], la precisión de la onda senoidal es de solamente  $\pm 0,4$  dB. A pesar de que el uso del grabador requiere de la grabación de una señal calibrada, esto carecería de importancia siempre que la respuesta en frecuencia sea suficientemente plana. Sin embargo, no se encontró información concerniente a cuán plana es la respuesta en frecuencia, razón por la cual se la corroboró usando un mutímetro digital Hewlett-Packard HP 974A [9], cuya precisión del valor RMS verdadero se brinda en la Tabla 1 (incluyendo porcentaje de lectura + cuentas). Como se ilustra en la Figura 8, el desvío con respecto a la respuesta plana del generador DS 345 llega a ser a lo sumo  $\pm 0,045$  dB (con 96 % de confianza) que, al ser combinado con la precisión del HP 974A da una incerteza resultante de 0,103 dB. Se puede reducir esta incerteza a 0,095 dB tomando en cuenta el desvío sistemático del DS 345 en cada frecuencia.

Rango de frecuencia (Hz)	Precisión (dB)
20 - 50	$\pm 0,092$
50 - 10 000	$\pm 0,049$
10 000 - 20 000	$\pm 0,093$

Tabla 1: Precisión del valor RMS verdadero del mutímetro HP 974A.

Se especifica la distorsión del DS345 como  $-55$  dBc. Esto representa un error máximo de  $20 \log(1+10^{-55/20}) = 0,015$  dB cuando los picos de las armónicas están en fase con la señal principal.

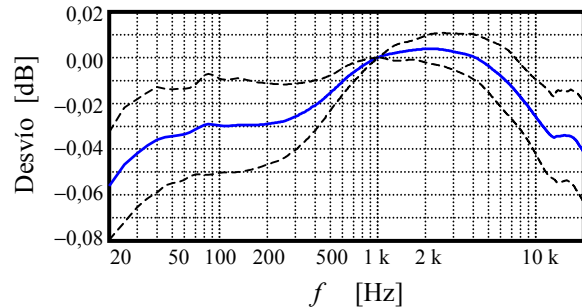


Figura 8: Desvío de la respuesta en frecuencia plana del generador SRS DS345. En líneas de trazos se indican los intervalos de confianza del 96 % ( $\pm 2\sigma$ ). Se supone calibración exacta a 1 kHz.

### 5. CONCLUSIONES

Varios parámetros muestran que las unidades evaluadas del modelo H4 son adecuadas para grabar señales de audio con propósitos de medición. No hay diferencias significativas entre los distintos formatos de grabación. Por ejemplo, el ruido parece tener una cota mínima condicionada por el ruido analógico. El modelo exhibe una cierta distorsión que causa, en el extremo de las frecuencias altas (por sobre 10 kHz), algún "aliasing" perceptible. Se recomienda ajustar el nivel de grabación máximo en alrededor de  $-20$  dB con el fin de minimizar la distorsión.

### Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en un proyecto financiado por la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica de la Argentina (ANPCyT) bajo el código PICT 38109.

### 6. REFERENCIAS

- [1] Miyara, F. *¿Ruido o señal? La otra información. En defensa del registro digital del ruido urbano.* Cuarta Jornada Regional sobre Ruido Urbano, Montevideo, Uruguay, 2001. En CD-ROM. <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/reg-dig.pdf>
- [2] Miyara, F. *Grabación digital: ¿DAT o MiniDisc?* Tecnopolitan. Año 2 N° 15., 2001. <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/md-vs-dat.pdf>
- [3] Miyara, F.; Pasch, V.; Yanitelli, M.; Accolti, E.; Cabanellas, S.; Miechi, P. *Contrastación de algoritmos de análisis de espectro con un instrumento normalizado.* Actas de las Primeras Jornadas Regionales de Acústica AdAA 2009, Rosario, Argentina, 2009.

[http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/A032%20\(Miyara\)%20Contraste%20algoritmos%20analizador%20normalizado.pdf](http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/A032%20(Miyara)%20Contraste%20algoritmos%20analizador%20normalizado.pdf)

- [4] ISO 1996-2: Acoustics - *Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of environmental noise levels*. Geneve, Switzerland, 2007.
- [5] IEC 61672-1 Electroacoustics - *Sound level meters - Part 1: Specifications*. Geneve, Switzerland, 2002.
- [6] Zoom Corporation. Handy Recorder H4 Operation Manual. (fecha no especificada)
- [7] Miyara, F.; Accolti, E.; Marengo Rodriguez, F. A. *Issues in tone and tone sweep testing of digital audio equipment*. Obra inédita.
- [8] Stanford Research Systems. Synthesized Function Generators - DS345 Specifications.
- [9] Hewlett-Packard Company. HP 974A Multimeter User's Guide. 1995.