

SOBRE LA INFLUENCIA DE LOS FILTROS EN LA MEDIDA DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN BAJAS FRECUENCIAS.

Manuel A. Sobreira-Seoane, David Pérez Cabo

E.T.S. de Telecomunicación, Campus de la Universidad de Vigo. Universidad de Vigo. España.

(msobre@gts.uvigo.es; dperezc@gts.uvigo.es)

Resumen

Las normas UNE-EN ISO 3382, parte 1 y parte 2, comentan de una forma muy laxa que la medida de tiempo de reverberación con valores del producto BT pequeños puede ser muy poco precisa, sin abordar de forma clara un procedimiento que permita minimizar estos errores. En este artículo se analiza la influencia de los filtros digitales en la medida del tiempo de reverberación con productos BT pequeños (es decir, anchos de banda estrechos o tiempos de reverberación cortos), mediante el desarrollo de un supuesto de incertidumbre basado en el método Monte Carlo. En el artículo se demuestra que la influencia de la fase de los filtros digitales puede ser relevante y se concluye de forma clara que únicamente mediante la utilización de la técnica de filtrado inverso es posible la medida de tiempos de reverberación bajos a baja frecuencia. Se aportan además las funciones de densidad de probabilidad obtenidas a la salida de los filtros, mostrando que en general son asimétricas y en algunos casos presentan múltiples modas. En ningún caso, para $BT < 16$ se han obtenido funciones de distribución de probabilidad normales a la salida de los filtros.

Palabras-clave: Filtros digitales , tiempo de reverberación, filtros FIR, filtros IIR, retardo de grupo.

Abstract

The ISO standard 3381, parts 1 and 2 vaguely comments that the measurement of acoustic decays with low BT values can be problematic, but it does not clearly supply a method that should be applied when either low reverberation times or acoustic decays at low frequencies are measured. In this paper the contribution of the digital filters to the measurement uncertainty of acoustic decays is analyzed. A Monte Carlo frame work is proposed and developed. In the paper it is shown how the contribution of the phase of the digital filters to the measurement uncertainty may become relevant and how the measurements of low reverberation times at low frequencies can be only carried out with the use of the time-reversed technique. The PFD at the output of the filters are calculated. In general the PDFs are non-symmetric and in some situations multimodal PDF may be expected. None of the simulations performed showed normal distributions at the output of the filters.

Keywords: Digital filters, reverberation time, group delay, IIR filters, FIR filters, group delay

PACS no. 43.58+z, 43.60+d

1 Introducción

En los últimos años se ha incrementado la demanda de realización de medidas acústicas en baja frecuencia. En algunas aplicaciones, como la medida del aislamiento acústico entre recintos, se requiere medir el tiempo de reverberación para la obtención de un mesurando que es función de este valor (por ejemplo el DnT en medidas de aislamiento). Sirva como ejemplo la extensión de la medición del aislamiento acústico a frecuencias inferiores a 100 Hz que se está considerando en el borrador de la norma ISO/CD 16283-1 [1], que sustituirá a la actual ISO 140-4. Otras aplicaciones necesitan a su vez la medida del tiempo de reverberación en baja frecuencia, como descriptor de la calidad acústica de un espacio. Como ejemplo, puede consultarse el trabajo publicado por Torres-Guijarro [2] in 2008: puede observarse como se presentan resultados de medidas del tiempo de reverberación en salas de control y salas de escucha acondicionadas para frecuencias inferiores a 100 Hz. Estas salas, para cumplir los requisitos especificados en normas y documentos asociados a su uso [3, 4], deben tener un tiempo de reverberación incluso inferiores a 200 ms. Tal como Jacobsen describió en el año 1987 [5], no pueden realizarse medidas de tiempo de reverberación para valores bajos del producto BT, sin asumir errores elevados en la medida.

Las versiones actuales de las normas de medida, ISO 3382, partes 1 y 2 [6,7], incluyen dos ecuaciones que permiten estimar la desviación típica de las medidas en función del margen dinámico (T_{20} o T_{30}) que se ha utilizado en la determinación del tiempo de reverberación. Estas ecuaciones proceden de los artículos publicados por Davy in 1979 y 1980 [8, 9]. Posteriormente, el propio Davy se dió cuenta de que estas ecuaciones subestiman considerablemente la incertidumbre de las medidas del tiempo de reverberación en bajas frecuencias, proponiendo en 1988 una corrección basada en observaciones empíricas para baja frecuencia, aportación que no ha sido tomada en cuenta en la reciente revisión de las normas implicadas [8]. Davy aborda estas correcciones debido a las discrepancias observadas entre medidas reales y la aplicación de las ecuaciones analíticas obtenidas en sus trabajos previos. En estos trabajos asume una variación suave de la respuesta en magnitud de los filtros que se utilizan en las medidas (los filtros de octava y tercio de octava), utilizando únicamente como variable el ancho de banda de los filtros, sin considerar los problemas que pueden generar aspectos concretos, como la distinta tipología de filtros posibles (clase 0, 1 o 2) y la posible influencia de la fase en la forma de a envolvente temporal de la caída de la energía acústica.

En el año 2000, Kob and Vörländer detectan que en función de las posiciones de las resonancias de la sala y de su densidad modal, el error en la estimación del tiempo de reverberación cambia [11], estableciendo una metodología de análisis que es desarrollada por Sobreira, Cabo y Jacobsen [12-13].

2 Definición de un modelo para la aplicación del método Monte Carlo (MCM) a la medida del tiempo de reverberación.

El cálculo de la incertidumbre de la medida mediante el método de propagación de las distribuciones utilizando el método Monte Carlo, está detallado en el suplemento 1 de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida”, conocida comúnmente como “GUM” [14]. Rodríguez Molares [15] en su tesis doctoral desarrolla la aplicación del método Monte Carlo a distintos problemas en acústica [15]. A continuación se describe brevemente el método y su aplicación a la evaluación de la incertidumbre de la medida del tiempo de reverberación en bajas frecuencias.

2.1 El método Monte Carlo.

Tal como se establece en la GUM y se aplica en el trabajo de Rodríguez Molares, la evaluación de la incertidumbre de medida utilizando el método Monte Carlo es la mejor opción siempre que:

- 1) Las contribuciones a todas las fuentes de incertidumbre no sean del mismo orden de magnitud
- 2) No sea posible calcular los coeficientes de sensibilidad. Esto ocurre cuando bien no se dispone de una expresión analítica que relacione el mensurando con las variables de entrada, o bien no se dispone de la derivada de la función o esta no es sencilla de obtener.
- 3) No se puede asumir distribución normal en las variables de entrada, o no presentan el mismo tipo de distribución, con lo que el teorema del límite central no es aplicable y por tanto la incertidumbre no se puede calcular mediante el método clásico de la GUM de propagación de las varianzas.
- 4) La desviación estándar de la magnitud de salida es del mismo orden que su valor medio.
- 5) La función de densidad de probabilidad – PDF – de cualquiera de las variables de entrada es asimétrica.

Durante la evaluación de la incertidumbre de medida mediante el método Monte Carlo, se puede identificar tres etapas, de acuerdo con el suplemento 1 de la GUM:

- 1) Una etapa de formulación donde se identifican las variables de entrada que influyen en la medida y se les asigna una función de probabilidad.
- 2) Una etapa de propagación donde se define la función modelo y las PDF se propagan de acuerdo con la función definida (esta función puede no ser analítica y consistir en un método o algoritmo de cálculo a partir de las variables de entrada).
- 3) Una etapa final de análisis donde se obtienen los estadísticos y la función de densidad de probabilidad de la variable de salida.

El núcleo del método consiste por tanto en generar M muestras de cada una de las variables de entrada, X_i , para obtener el mismo número M de muestras a la salida mediante la propagación de las funciones de densidad de probabilidad asignada a cada una de las variables de entrada mediante la función modelo: $Y=f(\mathbf{X})$ donde $\mathbf{X}=\{X_1...X_N\}$ es el conjunto de variables de entrada. El número de muestras en el conjunto de variables de entrada se denomina también número de realizaciones del método y debe ser lo suficientemente elevado como para garantizar un determinado nivel de confianza en los resultados. El número habitual de realizaciones MCM suele ser $M=10^6$ aunque puede implementarse un MCM adaptativo que garantice la convergencia con un número mínimo de interacciones [15]. Cuando se requieren cálculos complejos y computacionalmente costosos (por ejemplo cálculos con elementos finitos), a menudo el número de pruebas o repeticiones del método Monte Carlo es sensiblemente menor.

2.2 El método Monte Carlo: aplicación a la medida del tiempo de reverberación.

La medida del tiempo de reverberación consiste en la excitación de un sistema en uno o varios puntos fuente y la observación del proceso de atenuación de la energía en varios puntos receptores del sistema. Esta señal se integra siguiendo el método de integración inversa descrito por Schröder [16]. Este proceso de integración permite obtener la envolvente de la señal, y a partir de ella, mediante un ajuste de mínimos cuadrados, estimar su pendiente para así evaluar el tiempo de reverberación. Este método no debe confundirse con la técnica de filtrado inverso descrita por Jacobsen y Rindel [17], que consiste en invertir la señal en tiempo antes de proceder a la estimación de la reverberación a la salida de los filtros. Si la estimación del tiempo de reverberación se realiza a partir de los 10 primeros dB de la caída de la energía acústica en la sala, el parámetro estimado se denomina EDT (*Early Decay Time*). Si la evaluación se realiza a partir de un margen dinámico R , medido a partir del instante en el

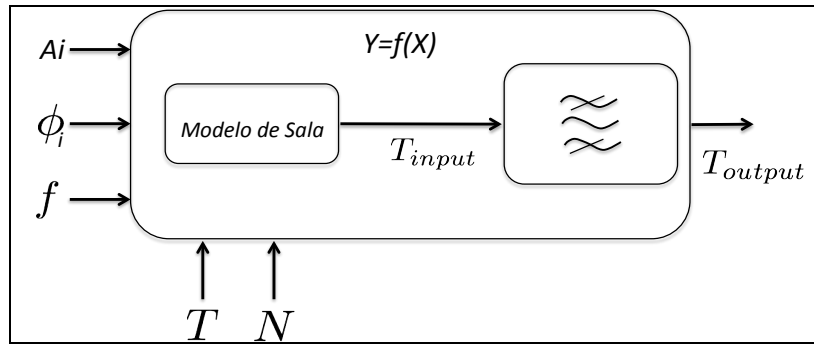


Figura 1. Diagrama del modelo establecido para la evaluación mediante el método Monte Carlo de la incertidumbre en medidas de tiempo de reverberación.

que la señal se ha atenuado -5 dB, el parámetro estimado se denomina T_R . En general, en medidas del tiempo de reverberación, $R=20$ o 30 dB. El tiempo de reverberación resultante puede obtenerse bien mediante el promedio de los valores del tiempo de reverberación obtenidos para cada combinación fuente-receptor o bien mediante el promediado de las distintas caídas obtenidas. La dependencia del tiempo de reverberación en función de la frecuencia se obtiene mediante el filtrado paso banda utilizando un banco de filtros de $1/3$ o de $1/1$ octava que deben verificar los requisitos detallados en la norma IEC 61260 [17].

Claramente, se puede observar que la medida del tiempo de reverberación a partir de la curva de la caída de energía en una sala es un proceso complejo, con distintas etapas, de las que no disponemos función analítica o, al menos no podemos obtenerla de forma sencilla. Por tanto, la aplicación del método Monte Carlo en este entorno está plenamente justificado dentro del marco establecido por la GUM. La caída de la energía acústica en cualquier sistema resonante puede modelarse mediante la superposición de un conjunto de modos propios cuya energía decae en el tiempo [19]. Este efecto físico puede escribirse como la suma de un conjunto de cosenos que decaen en el tiempo:

$$h_{model} = \sum_{i=1}^N A_i \cos(2f_i t + \phi_i) \exp\left(-\frac{3 \ln 10}{T_i} t\right) \quad (1)$$

Este modelo, definido por Kob y Vörlander [11], se ha tomado como referencia para definir un modelo (figura 1) para la evaluación de la incertidumbre en los ensayos de tiempo de reverberación, en el que el conjunto de variables de entrada, \mathbf{X} , viene definido por las variables $\mathbf{X}=\{A_i, f_i, \phi_i\}$ donde:

- La variable A_i modela la variación de amplitud de los modos resonantes para cada combinación emisor-receptor en el momento del cese de emisión de la fuente sonora ($t=0$). En este trabajo se ha asignado una PDF uniforme a esta variable, aunque no resulta relevante para los cálculos ya que se ha detectado que la PDF asignada a esta variable no parece influir de forma notable en los resultados.
- ϕ_i modela la fase de los modos. El promediado sobre esta variable tiene el mismo efecto que el promedio de las medidas realizadas para distintas combinaciones de fuente-receptor. Durante la medida de tiempo de reverberación se observa la atenuación de la presión cuadrática, por lo que para un determinado modo, la fase de la presión sonora al cuadrado podría tomar cualquier valor en el intervalo $[0, \pi]$ con distribución uniforme.

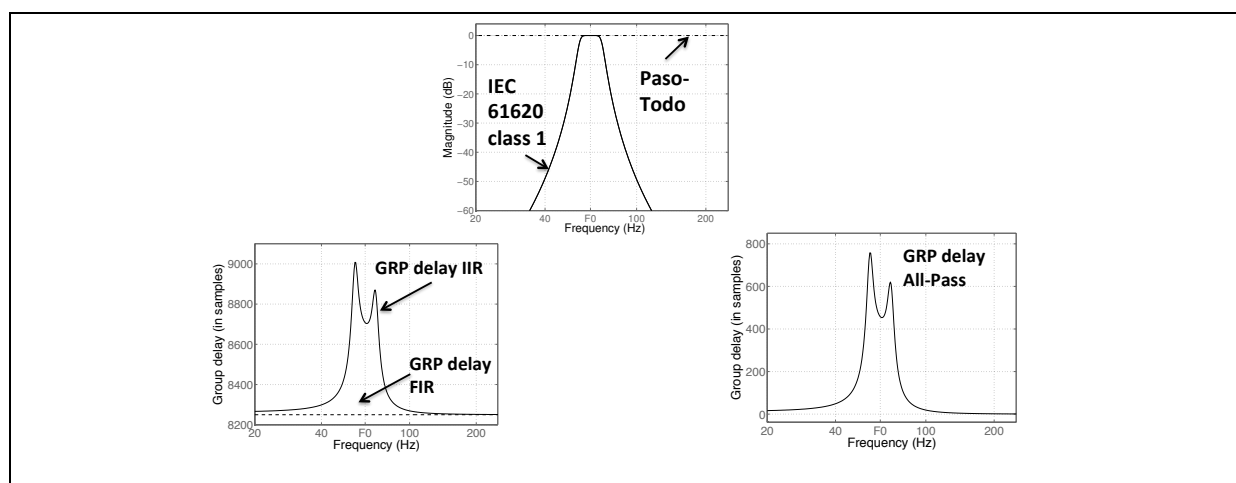


Figura 2. Respuestas en magnitud y retardo de grupo de los filtros diseñados.

- La variable f_i modela la frecuencia de resonancia de los modos propios. Se ha tomado como variable aleatoria, ya que en las medidas del tiempo de reverberación este es un factor que nunca se evalúa, siendo por tanto una de las fuentes de incertidumbre. En los cálculos, el valor de las frecuencias de resonancia se hace variar de forma uniforme dentro de la banda.
- El término $\exp\left(-\frac{3\ln 10}{T_i}t\right)$ modela una exponencial decreciente con 60 dB de atenuación cuando $T_i t = T_i$. De esta forma, T_i es el tiempo de reverberación asignado a un determinado modo propio de frecuencia de resonancia f_i . T_i se ha utilizado para establecer el valor verdadero del mensurando, i. e. el valor al que en media deberían tender las medidas.
- N es una constante mediante la que se selecciona el número de modos resonantes dentro de la banda de frecuencia de interés.

Tal como muestra el diagrama de la figura 1, una vez se ha obtenido la función h_{model} , se procede al filtrado paso banda de la señal. Ambas operaciones, generación de la función que modela la respuesta de la sala y el proceso de filtrado, constituyen nuestra función modelo, $Y=f(X)$.

2.3 Los filtros.

El principal objetivo de este trabajo es identificar y separar las componentes de incertidumbre debida a los filtros digitales en las medidas de caídas acústicas, tal y como se detalla en los trabajos publicados previamente por los autores [12,13]. Jacobsen [5] identificó las contribuciones del detector y de la respuesta en magnitud de los filtros de forma analítica. Para identificar la contribución de la distorsión debida a la respuesta en fase de los filtros, se han diseñado 3 tipos de filtro digital:

- 1) Filtros de tercio de octava, IIR de clase 1 según las especificaciones de la norma IEC 61260 [18], Butterworth de orden 8.
- 2) Filtros FIR de tercio de octava y fase lineal, que replican exactamente la respuesta en magnitud de los filtros IIR y por tanto también verifican los requerimientos de la norma IEC61260 para clase 1.

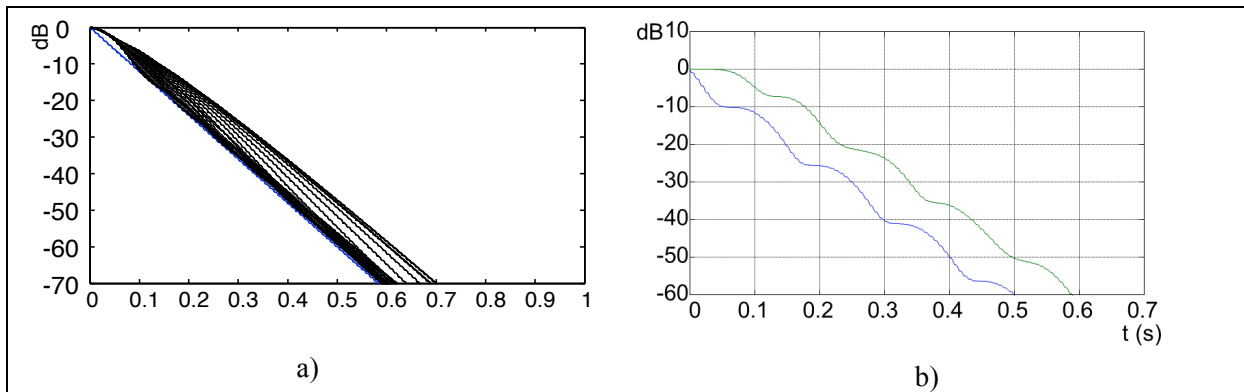


Figura 3. Variación de la pendiente de salida debido a la influencia de los filtros. Las líneas azules representan la caída de la energía antes de entrar en el filtro. a) Caídas con una densidad modal de $N=1$ modo dentro de la banda de medida y b) para $N=2$ modos. El tiempo de reverberación esperado, $T=0.5$, en la banda de 63 Hz.

- 3) Un filtro paso todo, cuyo retardo de grupo tiene exactamente la misma forma que el filtro IIR, pero que al no limitar en banda la señal, no produce distorsiones sobre la señal debido a su respuesta en magnitud. Al tener el retardo de grupo la misma forma, el retardo relativo entre frecuencias próximas es similar, por lo que es de esperar que la distorsión de fase producida por este filtro sea del mismo orden que la distorsión de fase producida por el filtro IIR.

En los trabajos presentados recientemente por los autores [12-13], se detalla el sentido de trabajar con el retardo de grupo para la caracterización de la contribución a la incertidumbre de medida debida a la fase de los filtros. En la literatura, los errores debido al filtrado se achacaban a la distorsión de la forma de la caída acústica debida al “ringing” de los filtros. Jacobsen y Rindel detectaron de forma empírica que almacenando la señal de caída y reproduciéndola “hacia atrás” se reducía notablemente el efecto debido a los filtros en la forma de la señal de caída de la energía acústica.

3 El error e incertidumbre en la medida del tiempo de reverberación.

Mediante la comparación de los resultados obtenidos en la aplicación del modelo descrito anteriormente utilizando los distintos tipos de filtros diseñados, se puede identificar las fuentes del error y determinar la mejor forma de medir, de forma que se minimice tanto el error como la incertidumbre de medida. Quizás en este punto convendría aclarar los conceptos de error y de incertidumbre de medida: cuando desarrollamos una medida, realizamos una estimación del valor de la variable observada bien directamente (presión sonora por ejemplo) o indirectamente (si la variable observada depende de otras variables como en el caso de las medidas de aislamiento acústico). El valor observado de esta variable, la estimación del valor del mensurando puede diferir de su valor verdadero.

El error de medida es la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero del mensurando. La incertidumbre es la duda que existe sobre el resultado de cualquier resultado. Esta duda se cuantifica mediante la evaluación del intervalo en el que el valor de mensurando debe estar, y con qué probabilidad el mensurando estará dentro del intervalo definido (lo que se denomina nivel de confianza). [20]

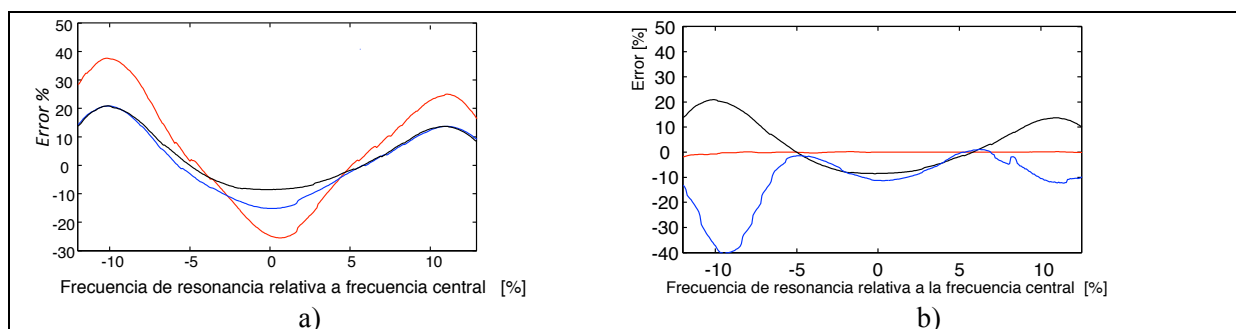


Figura 4. Error relativo en la estimación del tiempo de reverberación con 10 dB de margen dinámico - T_{10} . a) Filtrado directo, b) Técnica de filtrado inverso; - IIR, - FIR, - Paso Todo. $N=1$, banda de tercio de octava de 63 Hz y $T=0.5$.

3.1 El error de medida en la medida del tiempo de reverberación.

La figura 3 muestran las caídas obtenidas a la salida de los filtros cuando se selecciona como parámetro de simulación un tiempo de reverberación $T=0.5$. La figura 3 a) muestra el resultado cuando únicamente hay un modo resonante dentro de la banda de interés, mientras que la figura 3b) muestra el caso para $N=2$ modos dentro de la banda de 63 Hz. Resulta evidente la influencia del filtro de tercio de octava en la pendiente de caída de la energía acústica.

Si evaluamos la media de todas las estimaciones realizadas a la salida y las comparamos con las estimaciones de los tiempos de reverberación realizadas sobre las señales de caída a la entrada del filtro, obtendremos la magnitud del error que introducen los filtros.

La figura 4 muestra el error evaluado como la distancia relativa entre el tiempo de reverberación en la salida de los filtros y la reverberación evaluada a la entrada. Por tanto, hemos optado por definir el valor verdadero del tiempo de reverberación como la media de los tiempos de reverberación obtenidos a partir de T_{input} (ver figura 1). En esta figura los cálculos se refieren al caso en el que únicamente contamos con un modo propio en la banda de medida y el error se representa en función del desplazamiento relativo entre la frecuencia de resonancia del modo y la frecuencia central del filtro. Puede observarse como el error es fuertemente dependiente de dónde se sitúe la banda. La curva negra de las figuras representan el error cometido en el caso de utilizar un filtro de fase lineal (FIR), por lo que únicamente el filtro contribuye con el error debido a su respuesta en magnitud, es decir, al propio efecto de limitación en banda de la señal de entrada. La curva roja, azul muestra el error a la salida de un filtro paso todo. Este filtro se utiliza como referencia, ya que no aporta la reverberación en la banda de 63 Hz, pero sí presenta error de fase y puede observarse cómo el error de fase es del mismo orden que el error de magnitud. El filtrado con un filtro IIR (habitual en los equipos de medida), presenta ambas contribuciones al error de medida, tanto en magnitud como en fase, y puede comprobarse en la figura 4a) como efectivamente muestra un error que es aproximadamente igual a la suma del error debido a la respuesta en magnitud (filtro FIR) más el error debido a la respuesta en fase. La figura 4b) muestra el resultado de aplicar el filtrado inverso: puede observarse cómo el error de fase (filtro paso) todo, cambia de signo y compensa el error de magnitud (curva negra), de tal forma que el filtrado inverso IIR presenta un error prácticamente nulo. En [12] se hace un estudio detallado del comportamiento de este filtrado, estudiando cómo varía el error en función del número de modos en la banda y analizando el error de medida para todos los parámetros asociados a la medida del tiempo de reverberación, demostrando que en cualquier circunstancia el filtrado inverso presenta claras ventajas al reducir considerablemente el error de la medida: el valor medio converge al valor verdadero del mensurando, excepto en la evaluación del Early Decay Time, donde ninguna de las técnicas analizadas muestran un comportamiento adecuado.

3.2 La incertidumbre de medida.

Después de la aplicación del modelo a nuestras variables de entrada, obtenemos la M estimaciones del tiempo de reverberación. Si bien podemos calcular su media y su varianza, estas pueden no suministrar información relevante sobre la variable aleatoria de salida. La evaluación de la función de distribución del tiempo de reverberación, $G(T)$, proporciona la información necesaria para caracterizar completamente la variable de salida y calcular el factor de cobertura. El suplemento 1 de la GUM especifica un método para obtener una representación discreta de la función de distribución de probabilidad, $[G(T)]^M$ a partir de las M muestras del conjunto de salida $[Y]^M$. En la tesis de Rodríguez Molares [15] se detalla este método, proporcionando código en Matlab y proponiendo una forma de evaluar los factores de cobertura para las funciones de distribución de salida.

La figura 5 muestra la función de densidad de probabilidad del T_{20} cuando únicamente existe 1 modo dentro de la banda de medida, para $BT=3.65$ y $T=0.25$, utilizando un filtro IIR de clase 1. Puede observarse la gran dispersión de resultados presentando y la concentración de valores en torno a cuatro picos de mayor frecuencia (modas). En este contexto, la media y la varianza carecen de sentido para la evaluación del valor verdadero de la magnitud y su incertidumbre asociada. Este comportamiento multimodal de las funciones de distribución de probabilidad de la estimación del tiempo de reverberación a la salida de los filtros, se mantiene hasta $BT=11$ (tiempos de reverberación en torno a $T=0.75$). Para poder evaluar la incertidumbre asociada a este tipo de distribución, se debería encontrar alguna forma coherente de separar las cuatro modas: se ha detectado que las estimaciones tienden a cada una de las zonas de convergencia indicadas en la figura 5 dependiendo de la frecuencia de resonancia del modo propio:

- Zona A: Para frecuencias de resonancia próximas a la frecuencia central del filtro. Para un valor de entrada de $T=0.25$, la estimación del T_{20} en la salida de los filtros tiende a 0.15.
- Zona B: El T_{20} tiende 0.35 s en aquellos casos en los que la frecuencia de resonancia diste en torno al $\pm 5\%$ del valor de la frecuencia central del filtro.
- Los casos con frecuencias de resonancia próximas a la frecuencia de corte superior, es decir en torno al pico de retardo de grupo que se sitúa en torno a la frecuencia de corte superior, los resultados convergen en la zona C ($T_{20}=0.42$)

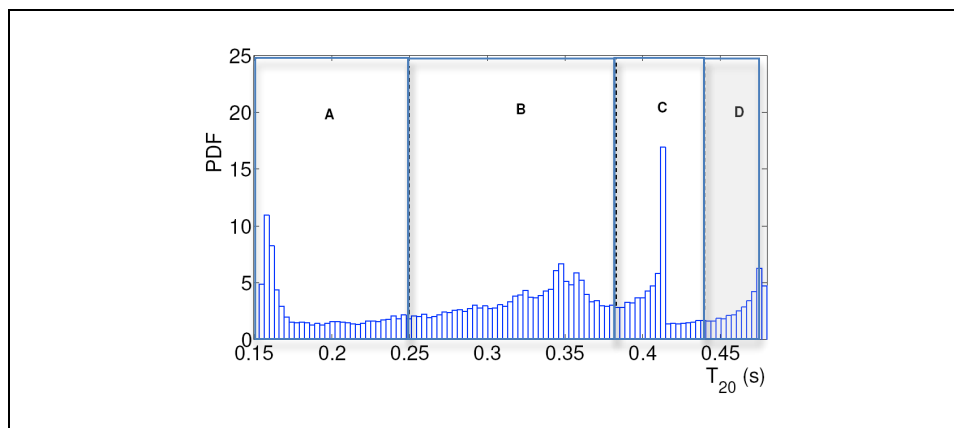


Figura 5. Función de densidad de probabilidad, PDF, del T_{20} a la salida de un filtro IIR de clase 1 para $BT=3.65$, $T=0.25$ y $N=1$ modo.

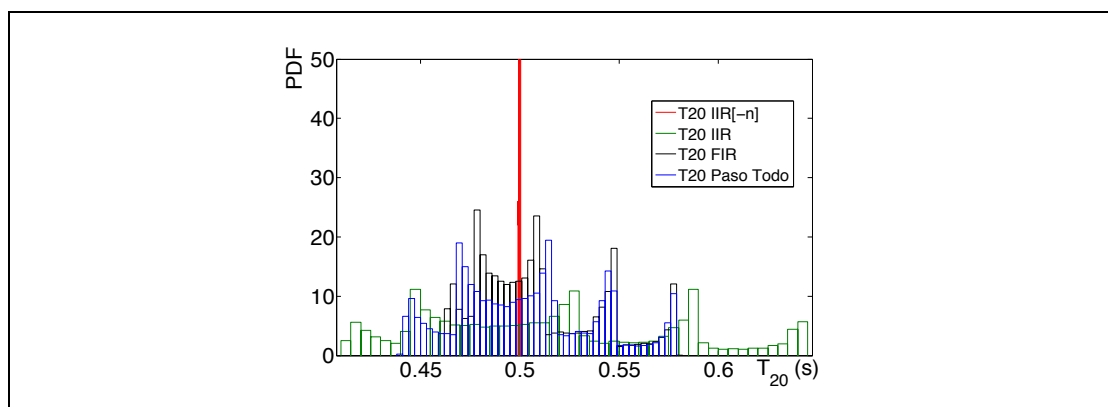


Figura 6. Función de densidad de probabilidad, PDF, del T_{20} a la salida de los filtros paso todo (azul), FIR (negro) e IIR (verde). En rojo la PDF obtenida a la salida del IIR cuando se evalúa el tiempo de reverberación a partir del filtrado de la señal invertida en tiempo. $BT=7.25$, $T=0.5$ y $N=1$ modo.

- Finalmente, en los casos en los que la frecuencia de resonancia se sitúe en torno al primer pico del retardo de grupo, en torno a la frecuencia inferior de corte del filtro, los resultados convergen en la zona D C ($T_{20}=0.46$).

La figura 6 muestra los resultados obtenidos para $BT=7.25$, evidenciando como para un tiempo de reverberación a la entrada del filtro de 0.5 segundos, se obtiene a la salida funciones de densidad de probabilidad multimodales. La figura muestra en rojo la función de densidad de probabilidad obtenida cuando se invierte en tiempo la señal de caída y se filtra con un IIR de clase 1, demostrando que mediante esta técnica los resultados convergen al valor esperado.

En situaciones habituales de medida, con recintos pequeños, no es de esperar densidades modales muy altas en frecuencias inferiores a 100 Hz, por lo que resulta razonable calcular las funciones de probabilidad de la estimación del tiempo de reverberación para densidades modales entre $N=1$ y 5 modos dentro de la banda de interés. La figura 7, muestra las funciones de densidad de probabilidad para $N=5$ y $BT=3.65$ para medidas en la banda de frecuencia de 63 Hz. Se observa claramente que las PDF son en todos los casos fuertemente asimétricas y cómo para todos los casos de filtrado directo (paso todo, FIR e IIR), están desplazadas con respecto a la función de densidad de probabilidad de la entrada. El error en la medida del tiempo de reverberación para BT tan bajos aumenta fuertemente con la densidad modal y puede llegar al 100% para $N=20$ modos [12]. En el caso de utilizar la técnica de filtrado inverso, la función de densidad de probabilidad de la salida del filtro, sigue exactamente a la forma PFD de la estimación del T_{20} a la entrada del filtro, con lo que la media converge al valor del tiempo de reverberación estimado a la entrada del filtro. Si se aumenta el BT hasta 11, se observa que las PDFs comienzan a ser casi simétricas, aparentando ser normales. El cálculo de la kurtosis, revela que sin embargo la distribución de salida es más sensible a valores atípicos (outliers) que la distribución normal. Recordemos que la kurtosis es el momento central de orden cuatro

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (2)$$

La kurtosis esperada para una distribución normal es $k=3$ y en el caso mostrado en la figura 8, $k=3.8$. En este caso se muestra el ajuste de una función t desplazada y escalada:

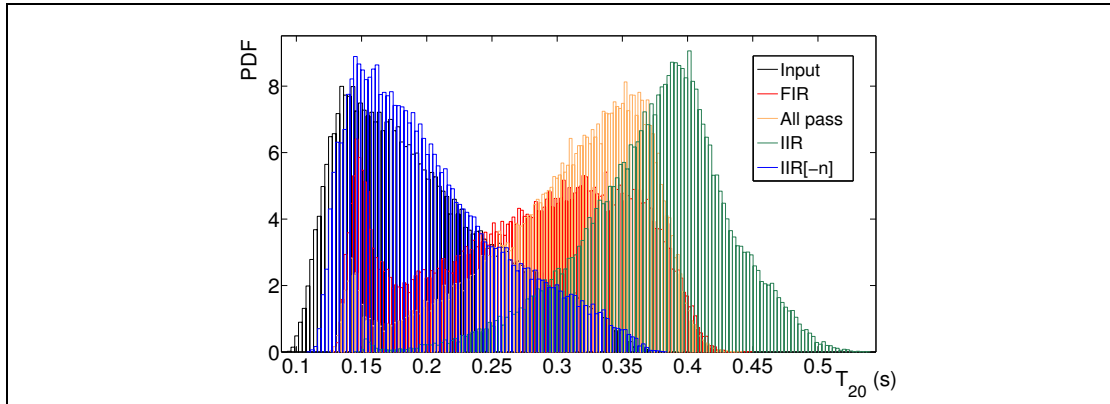


Figura 7. Función de densidad de probabilidad, PDF, del T_{20} a la entrada del filtro y a la salida de los filtros paso todo, FIR, IIR y filtrado inverso IIR[-n]. $BT=3.65$, $T=0.25$ y $N=5$ modos.

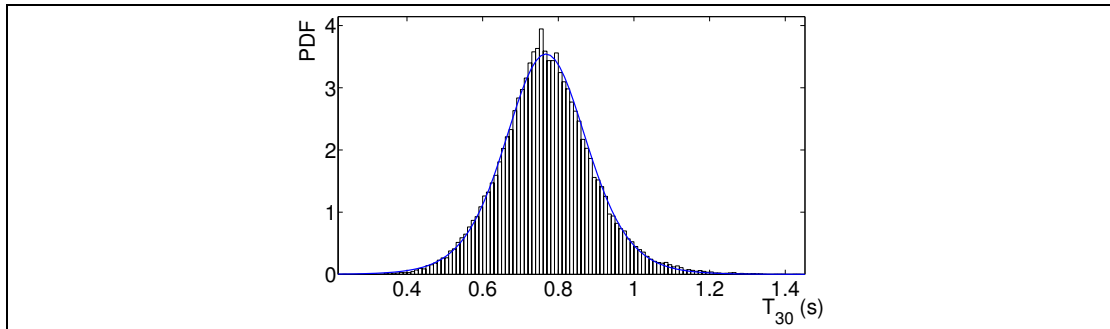


Figura 8: Ajuste de una distribución t a la función de distribución de probabilidad obtenida para el T_{30} , con $N=5$ y $BT=11$; $T=0.75$. Filtrado IIR directo.

$$f(x) = \frac{\Gamma(\frac{\nu+1}{2})}{\sigma\sqrt{\nu\pi}\Gamma(\frac{\nu}{2})} \left[\frac{\nu + \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}}{\nu} \right]^{-\frac{\nu+1}{2}}, \quad (3)$$

donde Γ es la función Gamma, μ es el parámetro de localización de la distribución, σ el factor de escala y ν los grados de libertad. Si la variable aleatoria x tiene una distribución t desplazada μ y escalada σ , entonces $\frac{x-\mu}{\sigma}$, tiene una distribución t de Student con ν grados de libertad.

4 Conclusiones.

En este artículo se ha mostrado que tanto el error como la incertidumbre de medida en la medida del tiempo de reverberación a bajas frecuencias son muy elevados si se aplican técnicas de filtrado convencional. Tanto el error, como la incertidumbre dependen fuertemente de la densidad modal del sistema que se está midiendo. La técnica del filtrado inverso, i.e., la grabación de la señal y su inversión temporal antes de proceder a su filtrado, proporciona grandes ventajas ya que esencialmente

el error de fase compensa al error debido a la magnitud del filtro y el error de medida converge a cero. En las medidas de tiempo de reverberación con $N=1$ realizadas con filtros IIR en su forma normal, la media no es un descriptor adecuado del valor verdadero de las medidas del tiempo de reverberación en bajas frecuencias. Al desconocer la posición de las frecuencias de resonancia de la sala, no existe conocimiento sobre la región de convergencia de la estimación del tiempo de reverberación. En general, únicamente mediante la utilización de la técnica de filtrado inverso es posible obtener medidas de tiempo de reverberación con un error aceptable. Observemos lo que dicen las versiones vigentes de las normas de medida al respecto: en la norma UNE-EN ISO 3382, parte 2: *“En el caso de tiempos de reverberación muy cortos la curva de decrecimiento puede estar influenciada por los filtros...”*. *“Los tiempos de reverberación muy cortos se pueden analizar utilizando la técnica de la inversión temporal descrita en la norma ISO 3382-1...”*. La única descripción del método en la norma UNE-EN ISO 3382, parte 1 se reduce al comentario: *“Cuando el decrecimiento se ha registrado para una reproducción a través de los filtros y un dispositivo integrador puede ser beneficioso efectuar una inversión en el tiempo de las respuestas durante la lectura...”*

La descripción de la técnica de filtrado con inversión en tiempo de la señal de caída procede de trabajo de Jacobsen [5]. Kob y Vörländer concluían en su trabajo del año 2000 [11]: *“Guidelines or standards describing the method of measurement and evaluation of decay curves should be amended regarding information on the errors in cases of short reverberation times.”*

Claramente, las revisiones actuales de las normas no han tenido en cuenta las recomendaciones de los autores y tampoco han incorporado el estado del arte en la estimación de tiempos de reverberación cortos. Debemos por tanto coincidir con los comentarios de Kob y Vörländer: las normas sobre medida de tiempo de reverberación deben ser modificadas y actualizadas. Deben especificar y detallar los métodos adecuados para poder evaluar el tiempo de reverberación en bajas frecuencias de forma adecuada, en el caso de que realmente exista interés en conocer el valor verdadero del tiempo de reverberación y no un simple número. Este comentario se extiende a aquellas recomendaciones sobre las condiciones acústicas de salas de escucha y salas de control [2-4]: deberían acompañarse sobre recomendaciones claras sobre la metodología de medida a seguir para poder evaluar tiempos de reverberación recomendados que a menudo son inferiores a 0.5 segundos en frecuencias inferiores a 100 Hz. Los trabajos que estamos publicando en esta línea, revelan que tales medidas carecen de sentido salvo que se detalle cómo se han obtenido, qué filtros y cuáles son las frecuencias de resonancia de las salas evaluadas. La siguiente tabla incluye los mínimos tiempos de reverberación que se pueden medir en bajas frecuencias siguiendo las técnicas evaluadas en este trabajo:

Frecuencia (Hz)	IIR	IIR con inversión temporal
50	1.39	0.31
63	1.1	0.25
80	0.88	0.19
100	0.69	0.15

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por fondos de la autonomía de Galicia (CN2011/019) y fondos FEDER, y financiado parcialmente por el ministerio de ciencia y tecnología, MCYT, ref. TEC2009-14414-C03-03. Los autores quieren agradecer especialmente al profesor Finn Jacobsen su colaboración durante esta investigación y su inestimable contribución que se ha plasmado en la publicación de los trabajos en los que se basa el presente artículo (ver referencias [12,13]).

Referencias

- [1] ISO/CD 16283-1. acoustics – field measurements of sound insulation in buildings and of building elements – part 1: Airborne sound insulation.
- [2] S. Torres, A. Pena, and N. Degara. Objective evaluation of a non-environment control room for 5.1 surround listening. 124th Convention of the AES. Amsterdam, 2008.
- [3] EBU-Tech 3276-E: Listening conditions for the assessment of sound programme material, supplement 1 - multichannel sound, 2004.
- [4] International electrotechnical commission: IEC. 60268- 13, Sound system equipment - Part 13: listening tests on loudspeakers, 1998.
- [5] F. Jacobsen. A note on acoustic decay measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 115(1):163– 170, 1987.
- [6] ISO 3382-1:2009. Acoustics –Measurement of room acoustic parameters – part 1: Performance spaces.
- [7] ISO 3382-2:2008. Acoustics –Measurement of room acoustic parameters – part 2: Reverberation time in ordinary rooms.
- [8] Davy J. The variance of decay rates in reverberation rooms. *Acustica*, 43:12–25, 1979.
- [9] J. L. Davy. The variance of impulse decays. *Acustica*, 44:51–56, 1980.
- [10] J. L. Davy. The variance of decay rates at low frequencies. *Applied Acoustics*, 23:63–79, 1988.
- [11] M. Kob and M. Vörländer. Band filters and short reverberation times. *Acustica united with Acta Acustica*, 86:350–357, 2000.
- [12] Sobreira M., Cabo D. P., and Jacobsen F. The influence of the group delay of digital filters on acoustic decay measurements. *Applied Acoustics* 73 (2012) 877-883. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.03.003>
- [13] Cabo D.P, Sobreira M and Jacobsen F. “A Monte-Carlo investigation of the uncertainty of acoustic decay measurements”. In proceedings of Euronoise 2012. Junio de 2012, Praga.
- [14] ISO IEC guide 98-3. Guide to the expression of uncertainty in measurement, supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method. 2008.
- [15] Rodriguez Molaes A. A Monte Carlo approach to the analysis of uncertainty in acoustics. PhD thesis, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación. University of Vigo, 2011.
- [16] Schroeder MR. New method of measuring reverberation time. *J. Acoust. Soc. Am* 1965; 37:409-412.
- [17] F. Jacobsen and J.H. Rindel. Time reversed decay measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 117(1):187–190, 1987.
- [18] IEC 61260:1995, Electroacoustics –Octave-band and fractional-octave-band filter banks.
- [19] Alan B. Cripps Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey and James V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley and Sons, fourth edition, 2000.
- [20] Stephanie Bell. Measurement Good Practice No.11 8 (Issue 2). A Beginner’s Guide to Uncertainty of Measurement. National Physics Laboratory (NPL). Disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK_NPL/mgpg11.pdf