

CONVERGENCIA DE LA REPETIBILIDAD DE ENSAYOS DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO IN SITU

PACS: 43.50.Ba

Pablo Luque, Dásil Fernández, Carlos de la Colina, Francisco Simón
Instituto de Acústica – CSIC
C. Serrano, 144
28006 Madrid
Tlf. +34 91 561 88 06
Fax: +34 91 411 56 72

ABSTRACT

En un ensayo interlaboratorio, dado que el número total de ensayos se reparte entre todos los laboratorios participantes, el número de ensayos por laboratorio no es excesivo –normalmente cinco– y se puede obtener un resultado con un nivel de confianza adecuado sin que el esfuerzo y los recursos empleados sean demasiado onerosos para los laboratorios participantes. Sin embargo cuando no se tiene acceso a un ensayo interlaboratorio o simplemente un único laboratorio quiere chequear la calidad de sus ensayos el número de ensayos que se deben hacer, según las normas vigentes es elevado. En este trabajo se hace un estudio sobre la convergencia del valor de la repetibilidad intralaboratorio de ensayos realizados según la ISO 140-4 para la medida *in situ* del aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales. De forma se establece un modelo que mejora el cálculo de la repetibilidad del método teniendo en cuenta el número de ensayos realizado y manteniendo constante el nivel de confianza.

INTRODUCCIÓN

En un ensayo, tan importante como obtener el valor de la característica medida, es determinar el intervalo dentro del cual se puede asegurar que se encuentra el valor real de la característica. Esta operación es la que se realiza a través del cálculo de incertidumbres y la razón por la que a dicho cálculo se le da tanta importancia en los laboratorios que implantan sistemas de gestión de la Calidad basados en la norma ISO 17025 [1].

Existen dos modelos para la estimación de la incertidumbre de un resultado de ensayo. Uno está basado en la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM) [2] editado y adoptado por un buen número de entidades y organizaciones. El otro modelo está especificado como norma ISO [3] y se centra sobre todo en caracterizar la calidad de un método de ensayo a través de su precisión –aunque naturalmente también aborda el problema del sesgo–.

En la GUM se postula un modelo para el cálculo de incertidumbres basado en la modelización matemática del proceso de ensayo. En este modelo se deben definir las variables

de entrada (normalmente magnitudes que se pueden medir de forma directa) necesarias para obtener el resultado del ensayo y después relacionarlas con el resultado del ensayo mediante un modelo matemático adecuado. Este modelo se puede complicar tanto como se quiera y puede basarse sólo en las magnitudes más importantes o tener en cuenta otras variables de segundo orden pero que también pueden influir en los resultados, como las condiciones ambientales, por ejemplo. Una vez que se establece la relación analítica que liga las variables de entrada con la variable de salida, este modelo provee de herramientas y procedimientos que permiten estimar cómo se propaga la incertidumbre de las variables de entrada a través de dichas expresiones hasta llegar a la variable de salida, o característica. Por tanto este modelo permite estimar la incertidumbre de un único ensayo, asume que cada ensayo es diferente y afronta el cálculo de cada uno de ellos de forma individual.

A partir de este modelo se desarrolló el documento “Expresión de la incertidumbre de medida de los laboratorios de calibración” [4]. Este documento se ha tomado como base de las exigencias aplicables a los laboratorios de ensayo que quieren implantar sistemas de gestión basados en Sistemas de Gestión de Calidad según la norma ISO 17025 [1]. Sin embargo, el procedimiento descrito en dicho documento no siempre se adapta bien al proceso de ensayo en cuestión. Una calibración se puede considerar como una clase particular de ensayo, por tanto es razonable admitir que este documento pueda no adaptarse bien a todo tipo de ensayos. Por ello se desarrolló también la Guía para la expresión de la incertidumbre de ensayos cuantitativos [5]. Esta guía es demasiado difusa para que pueda ser considerada procedimiento y de ahí que su uso no se haya extendido.

La ISO 5725 [3] propone un modelo de cálculo de incertidumbres menos preciso pero que se adapta mejor a algunos tipos de laboratorio. Este modelo no se pregunta por el proceso que lleva a obtener un resultado a partir de las variables de entrada; sino que propone el estudio de los resultados de ensayo como un estadístico, y son sus características las que definirán tanto el valor esperado de la característica ensayada como la incertidumbre. Una consecuencia de esto es que lo que se caracteriza no es un ensayo particular sino el método de ensayo que se está utilizando. Este modelo tiene por objeto encuadrar la calidad de un método de ensayo. Para ello utiliza los conceptos de repetibilidad y reproducibilidad que nos dan la distancia máxima que habrá entre dos resultados de ensayo con un nivel de confianza y unas condiciones dadas. De esta forma la precisión del ensayo se especifica a través de un parámetro bastante intuitivo (el problema del sesgo se aborda mediante comparación con patrones como es habitual) e íntimamente relacionado con la incertidumbre.

La principal ventaja es que, dado que este modelo sólo se basa en el análisis de los resultados de ensayo, es bastante más general y su aplicación a cualquier tipo de ensayo es más fácil. Su principal desventaja es que para su correcta aplicación se necesita de la realización de ensayos interlaboratorio que garanticen que todas las variables que afectan al resultado del ensayo estén bien muestreadas.

En el caso de los laboratorios de acústica los ensayos dependen de una serie de variables de entrada que, a su vez dependen de factores aleatorios (no deterministas) de difícil cuantificación. Todo esto hace que desarrollar un modelo de incertidumbres que esté de acuerdo con la GUM sea complicado, y es por ello que la propia norma de medida del aislamiento proponga en su parte 2 la caracterización de la calidad de un ensayo a través del modelo basado en la norma ISO 5725, siendo éste el modelo que se sigue en este estudio.

En este trabajo se estudiará el modelo basado en la norma ISO 5725 para la obtención de directrices que permitan determinar el número de ensayos que se deben realizar para que la estimación de la repetibilidad del método para la medida del aislamiento acústico a ruido aéreo se mantenga dentro de unos niveles de confianza dados.

REPETIBILIDAD

Al estudiar la precisión de un método de ensayo se pueden distinguir dos situaciones extremas, una es aquella en la que todos los parámetros que pueden influir en el resultado de ensayo están controlados y se mantienen constantes. En este caso cualquier variación en el

resultado se deberá a simples variaciones aleatorias intrínsecas al método de ensayo o a limitaciones propias al mismo. Esta situación permite definir la precisión debida a las condiciones intrínsecas al propio método de ensayo y por tanto también será la más pequeña de todas las posibles. A las condiciones aquí descritas se les denomina condiciones de repetibilidad. Otra posible situación es aquella en la que, para la obtención de la muestra de resultados se varían todos aquellos parámetros que pueden ser variados; posibles ejemplos son el operador el intervalo temporal en el que se realizan los ensayos, los equipos, las condiciones ambientales, etc. En este caso la variabilidad entre resultados será mayor (realmente si se hubiesen incluido todos los parámetros posibles de una forma adecuada sería la mayor posible) y también la que mejor representaría la precisión del método de medida. A estas condiciones se les llama condiciones de reproducibilidad.

En este trabajo nos centraremos en el estudio de la repetibilidad. Ésta se suele especificar en términos del límite de repetibilidad, que se podría definir con la distancia máxima que se puede obtener entre dos resultados de ensayo para un nivel de confianza dado. La repetibilidad medida por un único laboratorio se denomina repetibilidad intralaboratorio. En teoría la repetibilidad es una característica del método de ensayo y por tanto no puede depender del laboratorio que la calcula, por ello se define la repetibilidad como la media de las repetibilidades intralaboratorio, de esta forma se tienen las pequeñas variaciones que pueden existir entre laboratorios. Si la muestra es suficientemente representativa y el procedimiento se ejecuta de forma adecuada ambos valores deberían coincidir.

Si σ es la desviación típica de la estadística formada por el conjunto de resultados de ensayo, bajo condiciones de repetibilidad, el conjunto de todas las diferencias posibles entre dos resultados distintos tendrá una desviación típica igual a $\sqrt{2}\sigma$ y si se quiere obtener un nivel de confianza caracterizado por un coeficiente de seguridad k , entonces podemos definir el límite de repetibilidad como:

$$r = k\sqrt{2}\sigma \quad (1)$$

Si se supone que los resultados siguen una distribución gaussiana y se establece un nivel de confianza del 95 %, al que corresponde un $k = 1.96$, entonces

$$r = 2.82 \sigma \quad (2)$$

De acuerdo a las directrices de la norma ISO 140-2 [6], para calcular el valor de σ se debe obtener un tamaño de muestra que viene dado por la expresión

$$p(n - 1) > 35 \quad (3)$$

donde p es el número de laboratorios que intervienen en el ensayo interlaboratorio y n el número de ensayos a realizar por cada laboratorio. Si el estudio se va a realizar en un único laboratorio entonces el número de ensayos no debería ser inferior a 36. Dado lo elevado de este número en el siguiente apartado se realiza un estudio en el que se estudia la variación de σ con el número de ensayos con el objeto de obtener criterios que permitan reducir el número de ensayos necesarios para el cálculo de la repetibilidad.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

Se realizaron un total de 50 ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo según la norma UNE EN ISO 140-4:1999 [7] sobre la misma muestra. Ésta consiste en un elemento de pequeño tamaño cuya descripción se presenta en la figura 1.

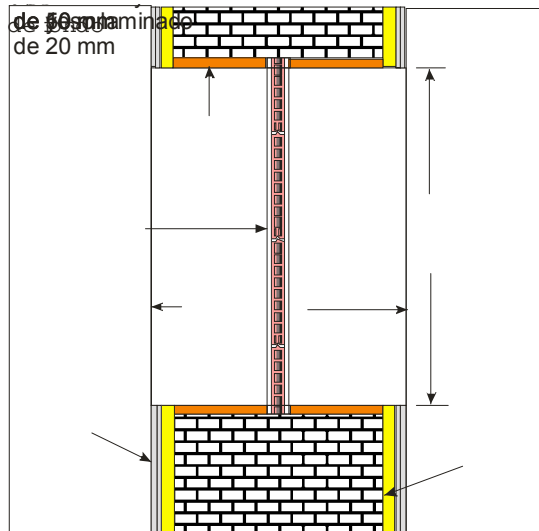


Figura 1. Esquema de la muestra utilizada en el estudio

A partir de estos 50 resultados se crean conjuntos, cada elemento de un conjunto está formado por un grupo de n ensayos, siendo n constante en cada conjunto y el valor que caracteriza a cada conjunto. n varió de 2 a 49, y el número de elementos de cada conjunto fue de 40 000 si era posible y el número máximo de combinaciones donde no era posible. Con cada elemento de cada conjunto se hizo un estudio de repetibilidad. Así para cada elemento de cada conjunto se calculó la desviación típica de repetibilidad, σ_r . A partir de ellas para cada conjunto se calculó el promedio de todas las desviaciones típicas de repetibilidad, $\overline{\sigma_r}$ y su desviación típica correspondiente, σ_{σ} .

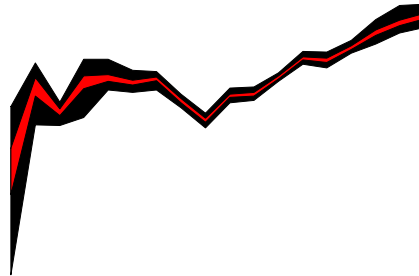


Figura 2. R_5 y R_{20} de todos los estudios de repetibilidad simulados

En la figura 2 se muestran todos los valores de R_5 y R_{20} obtenidos en el cálculo, se puede observar cómo la colección de R_{20} es más compacta que la colección de R_5 . En la figura 3 se muestra $\overline{\sigma_r}$ en función de n , se aprecia que, en conjunto la varianza media de un gran número de ensayos de repetibilidad se mantiene aproximadamente constante. Sin embargo es difícil que se tenga acceso a este valor en casos prácticos, ya que normalmente sólo se hará un único ensayo de repetibilidad. Por ello es importante la información que proporciona la figura 4, en la que se muestra σ_{σ} y se observa cómo a medida que aumenta n su valor disminuye. Dado que σ_{σ} ofrece información de la variabilidad de la repetibilidad, se puede utilizar para mejorar la estimación de ésta en función del número de ensayos del estudio de repetibilidad. Para ello no habrá más que, dado un n calcular su σ_{σ} y añadir su término correspondiente en la ley de propagación de las varianzas. Veamos cómo hacerlo.

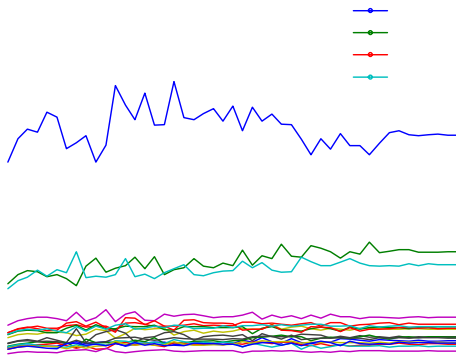


Figura 3. $\overline{\sigma}_r$ calculadas en función de n , utilizando la frecuencia como parámetro. Por claridad sólo se muestra la etiqueta de las cuatro frecuencias inferiores.

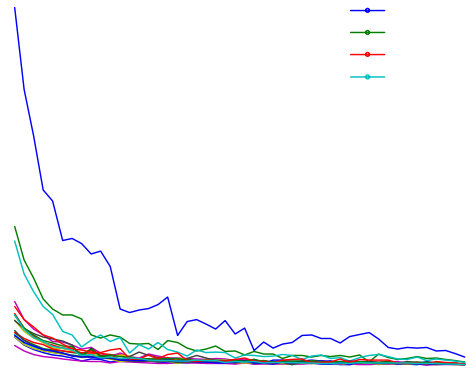


Figura 4. σ_σ calculadas en función de n , utilizando la frecuencia como parámetro. Por claridad sólo se muestra la etiqueta de las cuatro frecuencias inferiores.

Las curvas de la figura 4 se ajustan por mínimos cuadrados a una ecuación hiperbólica del tipo:

$$\sigma_\sigma^2 = \frac{\sigma_o^2}{n} + b \quad (4)$$

donde σ_o^2 y b son dos constantes que se deben ajustar. El resultado del ajuste se muestra en la tabla 1 para cada frecuencia. Con ello se tiene una expresión que nos proporciona la varianza con que está afectado un estudio de repetibilidad por el mero hecho de haber utilizado n ensayos. Teniendo en cuenta que b es del orden de 10^{-2} puede ser eliminado de la ecuación (4) sin una gran pérdida de precisión. Si en dicho estudio la varianza de repetibilidad es $\sigma_{r,n}^2$, entonces

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{n} (n\sigma_{r,n}^2 + \sigma_o^2) \quad (5)$$

e introduciendo la ecuación (5) en (3) se obtiene la repetibilidad del laboratorio.

f (Hz)	σ_o^2	b	R ²	f (Hz)	σ_o^2	b	R ²
100	22,00	-7,82E-01	0,97	800	0,20	-6,30E-03	0,98
125	3,23	-1,20E-01	0,95	1000	0,15	-5,80E-03	0,95
160	0,43	-1,70E-02	0,93	1250	0,06	-2,50E-03	0,92
200	2,50	-9,86E-02	0,93	1600	0,13	-5,00E-03	0,96
250	0,65	-2,55E-02	0,94	2000	0,19	-7,50E-03	0,93
315	0,34	-1,30E-02	0,95	2500	0,15	-5,40E-03	0,97
400	0,38	-1,23E-02	0,96	3150	0,42	-1,57E-02	0,95
500	0,12	-4,70E-03	0,91	4000	0,60	-2,20E-02	0,95
630	0,19	-6,30E-03	0,97	5000	0,40	-1,65E-02	0,92

Tabla 1. Coeficientes de ajuste del modelo de la ecuación (4)

CONCLUSIONES

El cálculo de la repetibilidad requiere de la realización de un gran número de ensayos para garantizar que el resultado sea suficientemente preciso. En este trabajo se ha mostrado un modelo que permite acotar el número de ensayos a realizar. Dicho modelo se basa en la adición de un término que tiene en cuenta el aumento de la varianza debido al tamaño de la muestra.

Dicha varianza se ha calculado en función del número de ensayos del estudio de repetibilidad y se ha mostrado cómo utilizarla.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado con el soporte económico del Proyecto del Plan Nacional con referencia BIA2004-07102-C0301.

REFERENCIAS

[1] ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

[2] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1995, International Standardization Organization.

[3] ISO 5725-2:1994, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method

[4] EA 4/02:2001, Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration

[5] EA 4/16 :2000, Guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing

[6] UNE-EN 20140-2:1994, Acústica. Medición del aislamiento acústico en edificios y en elementos de edificación. Parte 2: determinación, verificación y aplicación de datos de precisión (ISO 140-2:91).

[7] UNE EN ISO 140-4:1999, Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición "in situ" del aislamiento al ruido aéreo entre locales.