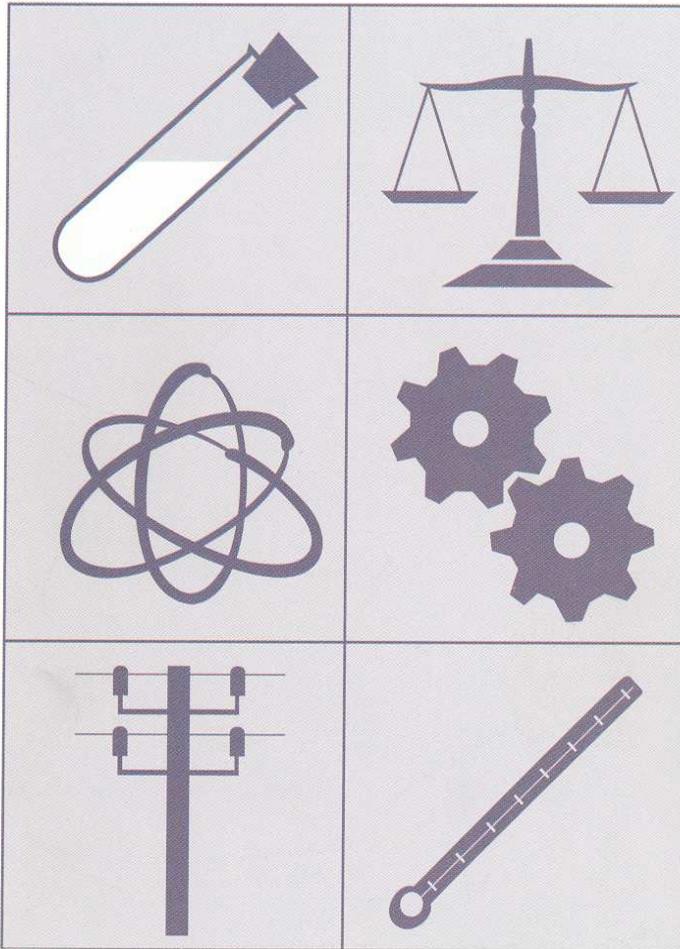


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO AC-002 PARA LA CALIBRACIÓN SECUNDARIA DE MICRÓFONOS

ñ 10



MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO



Este procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, si ha sido necesario.

La presente edición se emite en formato digital. Hay disponible una edición en papel que se puede adquirir en nuestro departamento de publicaciones.

Este procedimiento de calibración es susceptible de modificación permanente a instancia de cualquier persona o entidad. Las propuestas de modificación se dirigirán por escrito, justificando su necesidad, a cualquiera de las siguientes direcciones:

Correo postal
Centro Español de Metrología
C/ del Alfar, 2,
28760 Tres Cantos, Madrid

Correo electrónico
cem@cem.es



ÍNDICE

	Página
1. OBJETO.....	4
2. ALCANCE	4
3. DEFINICIONES	5
4. GENERALIDADES	9
4.1. Técnica de inserción de tensión	11
4.2. Abreviaturas, símbolos y unidades	12
5. DESCRIPCIÓN	12
5.1. EQUIPOS Y MATERIALES	12
5.2. OPERACIONES PREVIAS	14
5.3. PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	16
5.4. TOMA Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	17
6. RESULTADOS.....	21
6.1. Cálculo de incertidumbres	21
6.2. Interpretación de resultados	32
7. REFERENCIAS	33
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración	33
7.2. Otras referencias para consulta.....	33
8. ANEXO	34



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer un método y la sistemática necesaria para realizar una calibración secundaria de micrófonos en campo de presión y es aplicable a los instrumentos denominados Micrófonos de Laboratorio con código de identificación 01.02 según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Acústica y Vibraciones 1ª Edición SCI-MINER [1].

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limita a la determinación de la sensibilidad electroacústica en campo de presión de micrófonos de condensador de uso general mediante la utilización de calibradores acústicos y la aplicación de la técnica de inserción de tensión. No es aplicable a micrófonos patrones de laboratorio, ni de trabajo salvo como una forma rápida de verificación de buen funcionamiento.

El procedimiento es aplicable indistintamente a micrófonos de presión, de campo libre o de campo difuso pero teniendo presente que se trata de una calibración en campo de presión y que por lo tanto el resultado final será el valor de la sensibilidad en presión del micrófono que se pretende calibrar.

NOTA: Como se recuerda en la siguiente sección, la sensibilidad en presión de un micrófono de medida se define en términos de una presión acústica aplicada uniformemente sobre el diafragma. Consecuentemente, rigurosamente hablando, la sensibilidad en presión solo puede ser obtenida para micrófonos en los que la rejilla de protección pueda ser retirada y el diafragma ser expuesto. Sin embargo, este procedimiento pretende ser aplicable sin que sea necesario retirar la rejilla de protección, aunque esto suponga un aumento en la incertidumbre final. No obstante, para poder conseguirlo, es imprescindible que el calibrador utilizado disponga de información sobre las correcciones que se han de introducir en los niveles generados por la utilización de rejillas protectoras u otros efectos que produzcan desviaciones de la condición de distribución uniforme de presión sobre el diafragma.

En principio, el procedimiento es aplicable únicamente a micrófonos de una pulgada (1") y de media pulgada (1/2"). Sin embargo, en



función de las especificaciones del calibrador utilizado y siempre que se disponga de los adaptadores adecuados con indicaciones verificables de los niveles de presión acústica generados para cada configuración microfónica específica, el procedimiento puede ser aplicado a micrófonos de un cuarto de pulgada (1/4") y de un octavo de pulgada (1/8") e incluso a micrófonos con otras configuraciones especiales.

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [2] que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento de las referencias [4] y [5].

Calibración [1] (2.39):

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

NOTA 1 Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

NOTA 2 Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente "autocalibración", ni con una verificación de la calibración.

NOTA 3 Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Calibrador acústico [4] (3.1):

Dispositivo que genera una presión acústica sinusoidal de nivel y



frecuencia especificados cuando se acopla a modelos especificados de micrófono en configuraciones especificadas. También se le denomina “calibrador sonoro”.

Nivel de presión acústica especificado [4] (3.2):

Nivel(es) de presión acústica generado(s) en condiciones ambientales de referencia para ser utilizado con un modelo de micrófono y configuración determinados, válidos tanto para un calibrador acústico individual (en caso de un calibrador PL) como para todos los calibradores acústicos del mismo modelo (en el caso de un calibrador de clase 1 o clase 2).

Micrófono de condensador [5] (3.1):

Micrófono que funciona mediante variaciones de capacidad eléctrica.

Nota: Sólo se consideran los micrófonos de condensador que funcionan con una carga virtualmente constante obtenida mediante una tensión de polarización externa aplicada desde una fuente con una resistencia interna suficientemente elevada.

Micrófono patrón de laboratorio [5] (3.2):

Micrófono de condensador capaz de calibrarse con una gran precisión por un método primario, tal como el método de la reciprocidad en acoplador cerrado, y que cumple determinados requisitos estrictos sobre las dimensiones mecánicas y las características electroacústicas, especialmente con respecto a la estabilidad en el tiempo y a la influencia de las condiciones medioambientales.

Micrófono patrón de trabajo [8]

Micrófono de condensador capaz de ser calibrado por al menos uno de los siguientes métodos:

- a) un método especificado en las Normas UNE-EN 61094-2 [6] o UNE-EN 61094-3 [7];



- b) por comparación con un micrófono patrón calibrado según se especifica en la Norma CEI 61094-5 (en preparación) [9];
- c) con ayuda de un calibrador sonoro como se especifica en la Norma UNE 20-942 [3].

Tensión en circuito abierto [5] (3.3):

Tensión alterna que aparece en los terminales eléctricos de salida de un micrófono cuando se mide por la técnica de inserción de tensión cuando dicho micrófono está unido a la configuración de apantallamiento a tierra especificada en el apartado 7.2 de la referencia [5], pero que no está cargado de otra forma.

Unidad V: voltio

Nota: Debido a la naturaleza capacitiva del micrófono, la tensión en los terminales eléctricos depende de la carga eléctrica presentada por la unión mecánica y eléctrica del micrófono al preamplificador. Por esta razón, los preamplificadores utilizados para medir la tensión en circuito abierto de un micrófono deberían cumplir los requisitos especificados en el apartado 7.2 de la referencia [5].

Sensibilidad en presión de un micrófono [5] (3.4):

Para una señal sinusoidal de una frecuencia determinada y para unas condiciones ambientales determinadas, es el cociente entre la tensión en circuito abierto del micrófono y la presión acústica que actúa sobre la superficie expuesta del diafragma (es decir, en los terminales acústicos del micrófono) estando la presión acústica uniformemente aplicada sobre la superficie del diafragma. Este cociente es una cantidad compleja pero cuando la información de fase no es de interés la sensibilidad en presión puede indicarse únicamente por su módulo. Este será el caso para las aplicaciones de este procedimiento.

Unidad: voltio por pascal V/Pa.

Incertidumbre de medida [1] (2.26):

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores



atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza

NOTA 1 La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o una semiamplitud con una probabilidad de cobertura determinada.

NOTA 3 En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

NOTA 4 En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Incertidumbre típica combinada [10] (2.3.4)

Incertidumbre típica del resultado de una medición, cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo éstos las varianzas o covarianzas de esas otras magnitudes, ponderadas en función de la variación del resultado de medida con la variación de dichas magnitudes

Incertidumbre expandida [10] (2.3.5)

Magnitud que define un intervalo en torno al resultado de una medición, y en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser atribuidos razonablemente al mensurando



NOTA 1 La fracción puede entenderse como la probabilidad o el nivel de confianza del intervalo.

NOTA 2 Para asociar un nivel específico de confianza a un intervalo definido por la incertidumbre expandida, se requieren hipótesis explícitas o implícitas sobre la distribución de probabilidad representada por el resultado de medida y su incertidumbre típica combinada. El nivel de confianza que puede atribuirse a este intervalo posee la misma validez que las hipótesis realizadas.

NOTA 3 La incertidumbre expandida se denomina incertidumbre global en el apartado 5 de la Recomendación INC-1 (1980).

Factor de cobertura k [10] (2.3.6)

Factor numérico utilizado como multiplicador de la incertidumbre típica combinada para obtener la incertidumbre expandida.

Nota: Un factor de cobertura k típico, toma valores comprendidos entre 2 y 3.

4. GENERALIDADES

Un micrófono de condensador es un transductor electroacústico que permite obtener señales eléctricas a partir de oscilaciones acústicas mediante la conversión de la presión acústica en variaciones de capacidad eléctrica. Básicamente, un micrófono de condensador esta compuesto por una carcasa exterior cilíndrica metálica dentro de la cual se encuentra un diafragma metálico, formado por una película muy fina (entre 1,5 y 8 μm) y delicada sometida a una tensión de estiramiento muy elevada (hasta 600 N/mm^2), detrás del cual se haya montada una placa trasera metálica rígida unida a un aislante eléctrico. El diafragma y la parte frontal de la placa trasera, separados por una distancia típicamente de 20 μm , forman las láminas paralelas de un condensador activo que se polariza con una carga eléctrica aplicada a la placa posterior. Cuando el diafragma vibra en un campo acústico la capacidad del condensador varía y se genera una tensión de salida que será una replica fiel de las variaciones de la presión acústica del campo acústico en tanto en



cuanto la carga eléctrica de la placa posterior se mantenga constante. Esto se puede lograr mediante la aplicación de una fuente externa de tensión a través del preamplificador o mediante la utilización de unos polímeros cargados eléctricamente de forma permanente, denominados electretes por actuar como un dieléctrico con cargas eléctricas del signo contrario en sus dos superficies extremas.

Uno de los parámetros más importantes para caracterizar un micrófono es su sensibilidad. En la práctica diaria, este término generalmente significa la sensibilidad a una frecuencia de referencia que generalmente es 250 Hz, aunque en algunos casos puede ser 1000 Hz.

La sensibilidad de un micrófono depende del tipo de campo en el que se va a utilizar. Así, se habla de sensibilidad en campo libre, en campo difuso o en campo de presión. Sin embargo, a bajas frecuencias y específicamente a las frecuencias de referencia, la sensibilidad es esencialmente igual para los tres tipos de campo. Entonces, como quiera que los campos de presión bien definidos son relativamente fáciles de producir, las calibraciones en campos de presión son las más aplicadas.

Los campos de presión, que se caracterizan porque la presión acústica tiene la misma magnitud y fase en cualquier punto del campo, pueden ser encontrados en recintos o cavidades que son pequeños en comparación con la longitud de onda. Tales campos se producen en los acopladores utilizados para las calibraciones primarias por reciprocidad de micrófonos patrones y en los calibradores acústicos que cumplen con la normativa específica [4]. Es por ello, por lo que en este procedimiento se describe la utilización de calibradores acústicos para la determinación de la sensibilidad en presión de ciertos micrófonos de condensador.

Los micrófonos de condensador generan señales eléctricas. Estas señales tienen que ser transferidas a equipos auxiliares, como analizadores o registradores, que pueden encontrarse a una cierta distancia del micrófono. Debido a su carácter capacitivo, los micrófonos de condensador tienen que impedancias eléctricas de salida muy elevadas, por lo que no pueden soportar directamente la carga producida por dichos equipos auxiliares y los cables



necesarios. Para minimizar la carga y para asegurar que se puedan utilizar incluso con cables muy largos, los micrófonos de condensador se utilizan siempre con preamplificadores específicos que tienen impedancias de entrada muy elevadas pero no infinitas.

Como quiera que en la definición de la sensibilidad en presión interviene la tensión en circuito abierto, es decir en condiciones de carga eléctrica infinita, generada por el micrófono y este, según se ha explicado, siempre se haya sometido a una carga eléctrica finita, para poder calcular la sensibilidad en presión es necesario determinar el valor de la tensión en circuito abierto aun cuando el micrófono se halle cargado eléctricamente. Esto puede realizarse mediante la técnica de la inserción de tensión.

4.1. Técnica de inserción de tensión

Supóngase un micrófono con una determinada impedancia interna conectado a una impedancia de carga finita, por ejemplo un preamplificador. Para poder medir la tensión en circuito abierto generada por dicho micrófono se conecta en serie con el mismo una impedancia eléctrica, pequeña en comparación con la impedancia de la carga, y a través de ella se aplica, también en serie, una tensión de calibración mediante una fuente de tensión de nivel y frecuencia ajustables.

Se aplican alternativamente una presión acústica y una tensión de calibración de la misma frecuencia, teniendo cuidado en que el diafragma este sometido a la misma impedancia acústica en ambos casos. La tensión de calibración se ajusta en ausencia de la excitación acústica, hasta que se produce la misma indicación a la salida de la carga, preamplificador en el ejemplo considerado, que la que se obtenía con la excitación acústica y sin tensión de calibración. La tensión en circuito abierto generada por el micrófono en respuesta a la presión acústica es entonces igual en magnitud a la tensión de calibración.

Para poder aplicar esta técnica es necesario utilizar un preamplificador especial que permita aislar la carcasa del micrófono de la del preamplificador. De esta forma es posible aplicar la tensión de inserción directamente al diafragma del micrófono.



4.2. Abreviaturas, símbolos y unidades

Las unidades empleadas en este procedimiento son las del sistema internacional de unidades, SI. Sin embargo, debido al uso cotidiano, también se utilizan niveles expresados en decibelios.

Nivel de presión acústica: SPL , dB referidos a 2×10^{-5} Pa

Tensión eléctrica: V , volt

Tensión eléctrica en circuito abierto: V_0 , volt

Tensión de polarización: V_p , volt (DC)

Sensibilidad en presión: M_p , V/Pa

Nivel de sensibilidad en presión: L_{Mp} , dB referidos a 1V/Pa

Presión estática: p_s , kPa

Temperatura: T , °C

Humedad relativa: HR , %

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Para realizar la calibración descrita en este procedimiento es necesario disponer, al menos, de los siguientes equipos:

- a) Calibrador acústico de clase 1 según la UNE-EN 60942 [4];
- b) preamplificador de micrófono con capacidad para realizar la inserción de tensión;
- c) amplificador de medida con capacidad para realizar la inserción de tensión;



- d) generador de señal de baja frecuencia con una resolución en amplitud de al menos 0,01 mV; y de 0,1 Hz en frecuencia.
- e) medidor de tensión eléctrica capaz de medir valores eficaces y resolución igual o mejor de 0,001 mV;
- f) frecuencímetro con una resolución de al menos 0,1 Hz;
- g) sistema de medida de condiciones ambientales con resoluciones de al menos 0,05 kPa para la presión estática, 0,1 oC para la temperatura y 1 % para la humedad, de forma que las incertidumbres expandidas de mediada no superen 0,1 kPa para la presión estática, 0,5 oC para la temperatura y 5 % para la humedad relativa.

Además de esta instrumentación básica, es conveniente disponer de un sistema para medir, o al menos controlar, la distorsión de la señal generada por el calibrador. Para este fin sería ideal un analizador de señal digital, que además podría ser utilizado para controlar que la relación señal-ruido es la adecuada durante el proceso de calibración. Si no fuera posible disponer de tal instrumento, se debería contar con un medidor de distorsión. Si esto tampoco fuera posible, al menos, sería necesario disponer de un osciloscopio para poder apreciar si se produce distorsión.

Así mismo, para reducir en lo posible la incertidumbre del proceso de medición, se puede disponer de dos sistemas de medición de tensión independientes, uno para medir la tensión de inserción y el otro para medir la tensión de salida del amplificador.

Tanto el calibrador sonoro, como el o los medidores de tensión, el frecuencímetro y el sistema de medición de condiciones ambientales deben de contar con sus correspondientes certificados de calibración válidos con declaración de incertidumbres y trazabilidad.

En el caso del calibrador es necesario contar con un manual de instrucciones donde vengan detalladas las correcciones que hayan de introducirse para tener en cuenta posibles diferencias de volumen equivalente, los efectos del uso de rejillas de protección, las



variaciones en las condiciones ambientales respecto a las de referencia, etc.

Siempre que sea posible, es muy aconsejable utilizar alimentación externa para el calibrador para evitar manipulaciones que pudieran alterar las condiciones de impedancia acústica a las que está sometido el micrófono durante la calibración. Por ello, es conveniente contar con una fuente de alimentación de tensión continua regulable.

5.2. Operaciones previas

Antes de realizar la calibración se deberán realizar las siguientes operaciones previas:

- a) Se comprobará que el micrófono está identificado de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente.
- b) Se comprobará si el modelo de micrófono del que se trate está recogido en el manual de instrucciones del calibrador con el fin de disponer de las posibles correcciones aplicables. Si esta circunstancia no se produjera, se intentará encontrar los datos necesarios en la información proporcionada por el fabricante del micrófono. Si esto tampoco fuera posible, se renunciará a la realización de la calibración mediante la utilización de este procedimiento. Para los propósitos de este procedimiento, donde se busca más la simplicidad de medida y de cálculo que una incertidumbre muy baja, siempre que sea posible, se elegirá el calibrador que permita la mayor simplicidad de medida y de cálculo, es decir menor número de adaptadores y de correcciones a aplicar.
- c) Se comprobará si el micrófono es de polarización externa o permanente y se ajustará la instrumentación de medida consecuentemente. En el caso de micrófonos de polarización externa, se ajustará la tensión de polarización al valor indicado por el fabricante del micrófono, normalmente 200 V, asegurándose de que se mantiene constante en un margen de $\pm 0,1$ V.



- d) Se comprobará que la calibración del calibrador es válida y se procurará, en lo posible, ajustar las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa del recinto donde se vaya a efectuar la calibración a las reflejadas en su certificado de calibración, normalmente 23 °C y 50 %. En lo que respecta a la presión estática, al ser esta una magnitud mucho más difícil de controlar, salvo que se recurra a cámaras de presión, cosa que no está contemplada en este procedimiento, se controlará su evolución y se renunciará a realizar la calibración si se aprecian grandes fluctuaciones.

Nota: Aunque para los propósitos de este procedimiento no es necesario, una buena y recomendable práctica metrológica de aseguramiento de la calidad de la calibración, consistiría en verificar el nivel de presión acústica, la frecuencia y la distorsión de la señal producida por el calibrador, determinándolas mediante un micrófono patrón calibrado, antes de proceder a su utilización.

- e) Se dejará que el micrófono y el calibrador se estabilicen durante al menos dos horas en el lugar en el que se vaya a efectuar la calibración, procurando mantener constantes las condiciones ambientales de temperatura, en un margen de ± 3 °C, y de humedad, en un margen de $\pm 10\%$. Se observará la evolución de la presión estática. Si se producen fuertes variaciones, superiores a 2,0 kPa/h, se esperará hasta que se alcance una situación de estabilidad, variaciones inferiores a 0,5 kPa/h antes de comenzar la calibración.
- f) Se conectará toda la instrumentación necesaria para la calibración al menos dos horas antes de su comienzo, salvo indicación contraria en el manual de instrucciones de alguno de los instrumentos que puedan necesitar tiempos mayores, como es el caso de algunos multímetros de alta precisión.
- g) Se comprobará que todos los instrumentos que se han de utilizar funcionen correctamente y que poseen certificados de calibración válidos con declaración explícita de incertidumbres y trazabilidad.
- h) Se procurará que el recinto donde se realizará la calibración

este libre de corrientes de aire y ruidos aéreos y estructurales. En cualquier caso, el nivel del ruido ambiental que llegue al micrófono durante la calibración ha de estar al menos 30 dB por debajo del nivel de presión acústica generado por el calibrador.

5.3. Proceso de calibración

La disposición de los equipos a utilizar durante la calibración se realizara según el esquema de la figura 1.

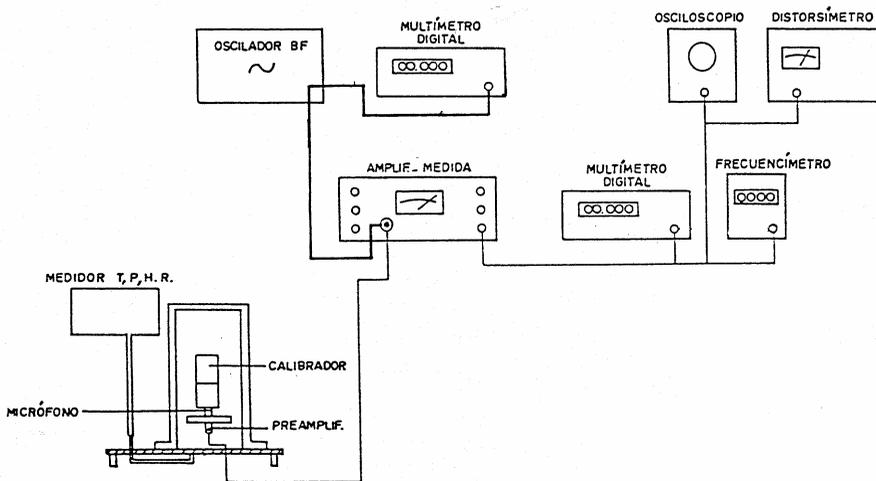


Figura 1. Esquema de conexión de los equipos para la realización de la calibración

- Desconéctese momentáneamente el preamplificador del amplificador de medida y conéctesele el micrófono, tomándose precauciones especiales para no dañar el diafragma en caso de que se haya retirado la rejilla de protección, bien por motivos de reducción de incertidumbres o por carecer de las correcciones necesarias.
- Introdúzcase el micrófono en la cavidad de acoplamiento del



calibrador, en la posición y orientación indicadas en el manual de instrucciones del calibrador y déjese estabilizar el conjunto durante, al menos, 15 minutos. En caso de que sean varias las orientaciones y posiciones posibles, sitúese el micrófono en posición vertical e insértese sobre él, con mucho cuidado para evitar sobrepresiones que puedan afectar al diafragma, el calibrador.

- c) Conéctese el calibrador y tras el tiempo de estabilización recomendado por el fabricante, pero que en ningún caso superará los 120 s, mézase el nivel de presión generada promediada durante 20 s de funcionamiento.
- d) Mézase la frecuencia de la señal del calibrador.
- e) Desconéctese el calibrador, teniendo cuidado de no alterar las condiciones de la impedancia acústica sobre el diafragma. Para ello, es recomendable utilizar un calibrador con alimentación externa que puede ser desconectada sin tocar el cuerpo del calibrador.
- f) Conéctese la tensión de inserción a la frecuencia del calibrador y variando su nivel, determínese el valor de la tensión en circuito abierto V_o .
- g) Realícense, al menos, cinco repeticiones completas de todo el proceso, procediendo en cada caso a la retirada y nueva colocación del micrófono. No obstante, para que se cumpla el criterio de fiabilidad que asegure la obtención de un nivel de confianza adecuado, (95 % para $k=2$) sin tener que recurrir a la determinación de los grados de libertad efectivos, es aconsejable que se realicen al menos diez mediciones de la tensión en circuito abierto.

5.4. Toma y tratamiento de datos

En cada repetición de la calibración, se anotaran los siguientes datos:

- a) Frecuencia de la señal generada por el calibrador. Si se dispone de un método para determinar la distorsión, es



conveniente anotar su valor a efectos de controlar el proceso de medida.

- b) El valor r.m.s. de la tensión a la salida del amplificador de medida cuando el calibrador esta conectado. Sea V_c este valor. En el caso de que se aprecien fluctuaciones de nivel, repítanse las medidas de V_c cada 30 s durante un periodo de 120 s como máximo y tómesese su valor medio.
- c) Anótense los valores de la presión estática, p_s , de la temperatura, T , y de la humedad relativa, RH , al principio y al final de la medida, y tómensese sus valores medios. En caso de que las diferencias entre los valores inicial y final fueran superiores a 0,3 kPa para la presión, 1,0 oC para la temperatura, o 10% para la humedad, la medida ha de ser rechazada, debiéndose repetir todo el proceso de 5.3 b) a 5.3 g).
- d) Anótese el valor, r.m.s., V_o de la tensión en circuito abierto cuando se aplica una tensión de inserción que haga que la tensión a la salida del amplificador de medida sea la misma que la que se obtuvo con la señal acústica, es decir V_c . Este es el valor de la tensión en circuito abierto buscada.
- e) Cuando, por limitaciones del generador de señal, no sea posible ajustar la tensión de inserción para conseguir un valor igual a V_c , tómensese como valor de V_o el valor medio de los que produzcan una tensión de salida, por exceso y defecto, mas próxima a V_c .

El tratamiento que ha de darse a los datos es el siguiente:

- a) Determínese el valor de la presión acústica, p_{cm} , generada por el calibrador en las condiciones de medida. Para realizarlo, hay que recurrir al certificado de calibración y al manual de instrucciones del calibrador. En el certificado se encontrara el valor del SPL generado por el calibrador en las condiciones de referencia, SPL_{cr} y tal vez el valor de los coeficientes de variación ambientales, si fueran necesarios. En cualquier caso, tanto la información sobre dichos



coeficientes, como sobre la posible existencia de otras correcciones, especialmente por volumen equivalente y por el efecto de la rejilla de protección, han de venir indicadas en el manual de instrucciones del calibrador.

Entonces, en el caso más general:

$$SPL_{cm} = SPL_{cr} + \Delta SPL_{P_s} + \Delta SPL_T + \Delta SPL_{HR} + \Delta SPL_m \quad (1)$$

donde:

- $\Delta SPL_{P_s} = (p_s - p_{ref})L_p$ es la corrección de nivel de presión acústica debida a la presión estática, siendo L_p es el coeficiente de presión estática del nivel del calibrador,
- $\Delta SPL_T = (T - T_{ref})L_T$ es la corrección de nivel de presión acústica debida a la temperatura, siendo L_T es el coeficiente de temperatura del nivel del calibrador,
- $\Delta SPL_{HR} = (HR - HR_{ref})L_{HR}$ es la corrección de nivel de presión acústica debida a la humedad relativa, siendo L_{HR} es el coeficiente de humedad relativa del nivel del calibrador,
- ΔSPL_m es la suma de correcciones de nivel de presión acústica debidas al propio micrófono, y al menos incluyen, las debidas a diferencias de volumen equivalente y al efecto de la rejilla de protección.

b) Una vez conocido el nivel de presión acústica en condiciones de medida se calcula la presión acústica en condiciones de medida mediante (2):

$$p_{cm} = p_{ref} 10^{\left[\frac{SPL_{cm}}{20} \right]} \quad (2)$$



donde

$$p_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

- c) Con los resultados de las medidas, el valor de la sensibilidad del micrófono en las condiciones de medida, expresado en V/Pa, viene dado por la expresión:

$$M_{p_{cm}} = \frac{V_o}{P_{cm}} \quad (3)$$

Este es el valor de la sensibilidad en las condiciones de medida. Si se dispone del valor de los coeficientes ambientales de la sensibilidad del micrófono, información facilitada por algunos fabricantes de forma nominal para cada uno de sus modelos, entonces, se puede dar el valor de la sensibilidad en las condiciones de referencia, es decir, en el caso más general:

$$M_{p_{ref}} = M_{p_{cm}} - (p_s - p_{s_{ref}}) S_{ps} - (T - T_{ref}) S_T - (HR - HR_{ref}) S_{HR} \quad (4)$$

donde S_{ps} , S_T y S_{HR} son los coeficientes de sensibilidad del micrófono con respecto a la presión estática, la temperatura y la humedad relativa, respectivamente.

NOTA 1 La utilización de valores nominales para los coeficientes de sensibilidad en este procedimiento no representa ningún inconveniente, puesto que no esta entre sus objetivos alcanzar unas incertidumbres muy bajas, no ya comparables a las de los procedimientos absolutos ($\pm 0,03$ dB), sino ni siquiera a las que se obtienen con procedimientos de comparación o de sustitución mas elaborados ($\pm 0,08$). El ánimo principal es proporcionar un método rápido, sencillo y fiable de determinar la sensibilidad de micrófonos de condensador de uso general con una incertidumbre razonable, entre 0,1 dB y 0,2 dB.

NOTA 2 Normalmente los coeficientes de sensibilidad se expresan en dB/kPa o dB/°C o dB/% H.R., por lo que para utilizar la ecuación (4) hay que: o transformarlos primero a V/(Pa kPa) o V/(Pa °C) o V/(Pa % H.R.), o aplicar la ecuación sobre niveles de sensibilidad referidos a 1 V/Pa (5).



$$L_{M_{pref}} = L_{M_{pcm}} - (p_s - p_{s_{ref}}) S_{ps} - (T - T_{ref}) S_T - (HR - HR_{ref}) S_{HR} \quad (5)$$

Si se desea expresar la sensibilidad en decibelios, entonces:

$$L_{M_p} = 20 \log \left[\frac{V_o / p_{cm}}{M_{ref}} \right] = 20 \log \left[\frac{M_{pcm}}{M_{ref}} \right] \quad (6)$$

y como la referencia usual para las sensibilidades de los micrófonos es un valor $M_{ref} = 1 \text{ V/Pa}$, entonces:

$$L_{M_p} = 20 \log M_{pcm} \text{ dB referidos a } 1 \text{ V/Pa} \quad (7)$$

6. Resultados

6.1. Cálculo de incertidumbres

La estimación de la incertidumbre en la determinación de la sensibilidad en presión se hará siguiendo los criterios de la Guía de la ISO para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM) [10] y de la Guía EA-4/02 para la expresión de la incertidumbre de medida en calibraciones [11].

6.1.1 Expresión de la incertidumbre

En la descripción del procedimiento de medida realizado en los capítulos previos, ha quedado claramente establecido que la sensibilidad en presión es un parámetro que se determina a partir de los valores de otras magnitudes, una tensión y una presión acústica. Los valores de estas magnitudes se ven a su vez influenciados por otras, entre ellas se hallan unas nuevas tensiones y las condiciones ambientales. Es pues claro que se trata de un caso de un mensurando Y que se obtiene a partir de otras N magnitudes X_1, X_2, \dots, X_n mediante una relación funcional:



$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (8)$$

en el que la incertidumbre ha de ser expresada como una incertidumbre típica combinada.

Una estimación del mensurando Y , notada como y , se obtiene utilizando las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_n para los valores de las N magnitudes X_1, X_2, \dots, X_n . Entonces, la estimación de salida y , que es el resultado de la medición, viene dada por:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

Con el fin de ilustrar y clarificar en la mayor medida posible el proceso de la estimación de la incertidumbre, se procederá a una introducción escalonada de las distintas magnitudes de entrada, empezando con la tensión de inserción medida y la presión acústica generada por el calibrador.

De acuerdo con la GUM, la incertidumbre típica combinada de y , en nuestro caso el valor medio de la sensibilidad medida, $M_{p_{cm}}$, $u_c(y)$, es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada, $u_c^2(y)$, y como la tensión de inserción, V_o , y la presión acústica generada por el calibrador, p_{cm} , pueden considerarse magnitudes independientes no correlacionadas, la varianza combinada correspondiente a la sensibilidad en presión, $u_c^2(M_{p_{cm}})$, en las condiciones de medida, y sin considerar, de momento, una posible componente debida al redondeo, viene dada por la expresión:

$$u_c^2(M_{p_{cm}}) = \left[\frac{1}{p_{cm}} \right]^2 u^2(V_o) + \left[\frac{-V_o}{p_{cm}^2} \right]^2 u^2(p_{cm}) \quad (10)$$

donde:

$u^2(V_o)$: es la varianza asociada a la medida de la tensión en circuito abierto,



$u^2(p_{cm})$: es la varianza asociada a la determinación de la presión acústica producida por el calibrador.

Es práctica común expresar las sensibilidades como niveles en decibelios referidos a 1 V/Pa, entonces la expresión para la varianza combinada será:

$$u_c^2(L_{M_{p(cm)}}) = \left[\frac{20}{\ln(10)V_o} \right]^2 u^2(V_o) + \left[\frac{20}{\ln(10)p_{cm}} \right]^2 u^2(p_{cm}) \quad (11)$$

Si se dispone de los valores de los coeficientes ambientales de sensibilidad del micrófono y de sus incertidumbres, o de un medio para estimarlas, es posible estimar la varianza asociada a la determinación de la sensibilidad en las condiciones de referencia mediante las siguientes expresiones generales:

$$\begin{aligned} u_c^2(M_{p_{ref}}) &= \left[\frac{1}{p_{cm}} \right]^2 u^2(V_o) + \left[\frac{-V_o}{p_{cm}^2} \right]^2 u^2(p_{cm}) + \\ &+ [p_s - p_{sref}]^2 u^2(S_{ps}) + S_{ps}^2 u^2(p_s) \\ &+ [T - T_{ref}]^2 u^2(S_T) + S_T^2 u^2(T) + \\ &+ [HR - HR_{ref}]^2 u^2(S_{HR}) + S_{HR}^2 u^2(HR) \end{aligned} \quad (12)$$

para la sensibilidad, y

$$\begin{aligned} u_c^2(L_{M_{pref}}) &= \left[\frac{20}{\ln(10)V_o} \right]^2 u^2(V_o) + \left[\frac{20}{\ln(10)p_{cm}} \right]^2 u^2(p_{cm}) \\ &+ [p_s - p_{sref}]^2 u^2(L_{Smps}) + L_{Smps}^2 u^2(p_s) + [T - T_{ref}]^2 u^2(L_{S_{mT}}) + L_{S_{mT}}^2 u^2(\\ &+ [HR - HR_{ref}]^2 u^2(L_{S_{mHR}}) + L_{S_{mHR}}^2 u^2(HR) \end{aligned} \quad (13)$$



para el nivel de sensibilidad,

donde:

S_{ps} y L_{Smps} : son los coeficientes de presión de la sensibilidad y del nivel de sensibilidad, respectivamente,

$u^2(S_{ps})$ y $u^2(L_{Smps})$: son las varianzas en el coeficiente de presión, expresado, respectivamente, linealmente, y como nivel,

S_T y L_{SmT} : son los coeficientes de temperatura de la sensibilidad y del nivel de sensibilidad, respectivamente,

$u^2(S_T)$ y $u^2(L_{SmT})$: son las varianzas en el coeficiente de temperatura, expresado, respectivamente, linealmente y como nivel,

S_{HR} y L_{SmHS} : son los coeficientes de humedad relativa de la sensibilidad y del nivel de sensibilidad, respectivamente,

$u^2(S_{HR})$ y $u^2(L_{SmHR})$: son las varianzas en el coeficiente de humedad relativa, expresado, respectivamente, linealmente y como nivel,

$u^2(p_s)$: es la varianza en la medida de la presión estática,

$u^2(T)$: es la varianza en la medida de la temperatura,

$u^2(HR)$: es la varianza en la medida de la humedad relativa.

NOTA: Las expresiones anteriores son muy generales y están dadas con la intención de presentar un estudio lo mas completo posible. Sin embargo, para los propósitos de este procedimiento, no es necesario utilizarlas en su totalidad. Así, por ejemplo, los coeficientes ambientales de sensibilidad de los micrófonos para los que este procedimiento esta pensado, pueden ser considerados como constantes sin incertidumbre asociada, al ser estas despreciables por ser sus valores varios ordenes de magnitud inferiores (0,0005 dB/kPa para el de presión) a las correspondientes a otros componentes, como por ejemplo, la experimental en la medida de V_0 , o la certificada del nivel de presión del calibrador, típicamente entre 0,05 dB y 0,1 dB. Además, siempre es posible pasar de valores de incertidumbre expresados en unidades del SI a valores en decibelios o viceversa.



6.1.2. Asignación de las componentes de incertidumbre

- **Medición de la tensión en circuito abierto V_o**

La contribución a la incertidumbre por la medida de la tensión V_o esta caracterizada por la varianza $u^2(V_o)$. Ahora bien, revisando el proceso de la técnica de inserción de tensión, es claro que hay varios parámetros de influencia en esta medida que constituyen, a su vez, componentes de incertidumbre.

En primer lugar, esta la componente de la variabilidad de las propias medidas cuya contribución esta caracterizada por la desviación típica experimental de la media de las medidas, $u(V_o)$.

Una segunda componente será la debida a la incertidumbre de medida del propio medidor de tensión, $u(V_{ins})$, y su contribución se obtendrá de combinar las contribuciones a la incertidumbre del certificado de calibración de dicho instrumento; de la resolución; de la repetibilidad; de la posible deriva entre calibraciones de este instrumento, y de su posible dependencia de las condiciones atmosféricas ambientales.

Una nueva componente procede del hecho de que la técnica de inserción se basa en intentar alcanzar dos veces el mismo valor de tensión. Suponiendo una distribución rectangular, su contribución, $u(V_c)$, vendrá caracterizada por la semiamplitud de variación del intervalo comprendido entre los puntos inmediatamente anterior, V_{c-1} , y posterior, V_{c+1} , a V_c obtenidos al variar la tensión de inserción, es decir:

$$u(V_c) = \frac{V_{c+1} - V_{c-1}}{\sqrt{12}} \quad (14)$$

En este caso no existe contribución producida por la incertidumbre del medidor utilizado para medir la tensión a la salida del amplificador porque en los dos casos, medida con señal acústica y con tensión de inserción, se utiliza el mismo instrumento, y su efecto se cancela.



NOTA: Existen otras tres posibles componentes que pueden ser evitadas si se opera con el debido cuidado.

La primera es debida a la tensión de polarización. La sensibilidad de un micrófono de condensador es aproximadamente proporcional a la tensión de polarización. Por tanto, si éste varía respecto a su valor nominal, lo hará su sensibilidad y en consecuencia los valores de las tensiones medidas con él también serán diferentes. Sin embargo, si cuando se calibran micrófonos de polarización externa se mantiene la tensión de polarización dentro de $\pm 0,1$ V el cambio en la sensibilidad es tan pequeño que esta componente puede despreciarse.

La segunda es debida a las posibles diferencias en la medida de tensión debidas a la unidad de inserción. Esta se debería evaluar mediante calibración de la propia unidad.

La última componente es la procedente del redondeo. Si se tiene cuidado en utilizar suficiente número de dígitos durante los cálculos, esta componente puede despreciarse en este estadio, aunque al final, al considerar la incertidumbre total habrá que introducir una componente adicional debida al redondeo.

Finalmente la contribución por la medida de la tensión en circuito abierto vendrá dada por:

$$u(V_o) = \sqrt{u^2(V_o) + u^2(V_{ins}) + u^2(V_c)} \quad (15)$$

NOTA: En la práctica, si se utiliza un generador con una resolución en amplitud lo suficientemente baja, 0,01 mV o mejor, la última componente puede despreciarse en comparación con la experimental.

- **Nivel de presión acústica del calibrador**

La contribución a la incertidumbre por la determinación de la presión acústica producida por el calibrador esta caracterizada por la varianza $u^2(\rho_{cm})$. En esta componente de la incertidumbre hay, al menos, cuatro factores de influencia que constituyen fuentes de incertidumbre.



La primera es el valor reflejado en el certificado de calibración del calibrador, $u(p_{cm-cert})$, y por tanto su estimación se hace a partir de dicho valor. En general, la incertidumbre recogida en los certificados de calibración de los calibradores viene expresada como nivel de presión en decibelios, por lo que es necesario convertirla a valores de presión en pascal mediante (2). Dado el carácter no lineal de la fórmula, para realizar la conversión hay que hay que añadir y restar sucesivamente el valor de la desviación típica del certificado al valor del nivel de presión acústica y convertir ambos números a pascal. Entonces, el valor de la desviación típica de la presión, en pascal, será igual a la media de la diferencia de los valores obtenidos.

La segunda, $u(p_{cm-der})$ es debida a la estabilidad del calibrador a largo plazo o deriva. Se considera que responde a una distribución rectangular y su valor se obtiene del histórico de calibraciones del calibrador y de las especificaciones del fabricante.

La tercera, $u(p_{cm-ret})$ es la correspondiente a las correcciones que hayan de ser introducidas por las diferencias entre las condiciones ambientales existentes en el momento de la medición y las del certificado, normalmente 101,325 kPa, 23 °C y 50 % (HR). Según se discutió en el apartado previo, para los propósitos de este procedimiento, los coeficientes ambientales pueden considerarse prácticamente como constantes sin incertidumbre asociada. Por lo tanto, para cada magnitud ambiental, su contribución, en forma de desviación típica, vendrá dada por el producto de la desviación típica correspondiente a la medición de la citada magnitud y el correspondiente coeficiente ambiental. Aunque, en rigor, en la determinación de estas desviaciones típicas intervienen la repetibilidad del instrumento utilizado, los datos de su certificado de calibración, su resolución, la deriva entre calibraciones, las correcciones no realizadas y la posible influencia de otras magnitudes de influencia, para los propósitos de este procedimiento, es suficiente con estimarlos como distribuciones rectangulares a partir de los límites establecidos para las condiciones ambientales durante la calibración.



$$u^2(p_{cm-ref}) = S_{ps}^2 u^2(p_s) + S_T^2 u^2(T) + S_{HR}^2 u^2(HR) \quad (16)$$

La cuarta, $u(p_{cm-mic})$ componente puede ser doble y tiene su origen en el propio micrófono. Tiene en cuenta los efectos debidos a las posibles diferencias entre el volumen equivalente del micrófono y el nominal de referencia recogido en el certificado, y a la utilización de la rejilla de protección. Para su estimación es necesario recurrir a la información dada por el fabricante del calibrador. Para los propósitos de este procedimiento, esta componente solo se presenta para un tipo de calibradores: los pistófonos. Sin embargo, aun en estos casos, estas correcciones se dan muy a menudo como constantes aplicables a todos los especímenes de un mismo modelo.

A la vista de lo expuesto, la varianza $u^2(p_{cm})$ vendrá dada por la expresión:

$$u^2(p_{cm}) = u^2(p_{cm-cert}) + u^2(p_{cm-der}) + u^2(p_{cm-ref}) + u^2(p_{cm-mic}) \quad (17)$$

- **Coeficientes ambientales**

La estimación de la componente de incertidumbre asociada a los distintos coeficientes de variabilidad ambiental, tanto para la sensibilidad como para el nivel de sensibilidad, deberá hacerse a partir de los certificados de calibración del sistema de medida de las condiciones ambientales y de la información de que se disponga de los fabricantes y de la historia previa del sistema. En rigor, para cada instrumento utilizado habría que tener en cuenta la repetibilidad del mismo, los datos de su certificado de calibración, su resolución, la deriva entre calibraciones, las correcciones no realizadas y la posible influencia de otras magnitudes de influencia. Sin embargo, para los propósitos de este procedimiento, es suficiente con estimarlos como distribuciones rectangulares a partir de los límites establecidos para las condiciones ambientales durante la calibración.

Para los propósitos de este procedimiento, los coeficientes de



variabilidad ambiental pueden considerarse como constantes sin incertidumbre asociada.

- **Redondeo**

Tanto para el caso de la sensibilidad como para el nivel de sensibilidad, el resultado se presenta con un cierto número de cifras significativas. Según la GUM [10] (F.2.4.5), este redondeo debe ser considerado como una corrección conocida que no se realiza y cuyo valor, igual al valor máximo del redondeo (0,5 unidades de la cifra menos significativa) o al valor real del redondeo realizado, debe ser sumado al valor final de la incertidumbre expandida U .

6.1.3 Balance de incertidumbres de la medición

Siguiendo las recomendaciones del documento EA-4/02 [11], el análisis de la estimación de la incertidumbre en la determinación de la sensibilidad en presión debe incluir el llamado balance de incertidumbres de la medida. Este consiste en una lista de todas las fuentes de incertidumbre, junto con las incertidumbres típicas de medida y los métodos para evaluarlas. En el caso de mediciones repetidas, debe indicarse también el número n de observaciones. Para mayor claridad, se recomienda presentar los datos referentes a este análisis en forma tabulada. En esta tabla todas las magnitudes deberían expresarse por un símbolo físico X_i o un identificador breve. Para cada una de ellas, deben especificarse, al menos, el valor estimado x_i , la incertidumbre típica de medida asociada $u(x_i)$, el coeficiente de sensibilidad c_i y las diferentes contribuciones a la incertidumbre $u_i(y)$. La dimensión de cada una de las magnitudes debe indicarse junto los valores numéricos en la tabla. También es conveniente indicar el tipo de distribución de probabilidad aplicable.

A modo de ejemplo, a la vista del estudio realizado en los apartados anteriores, se puede confeccionar el siguiente balance de incertidumbres esquemático, sin unidades, para la sensibilidad en presión en condiciones de referencia (véase página siguiente):



Magnitud X_i	Valor estimado X_i	Incertidumbre típica $u(X_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente sensibilidad c_i	Contribución incertid. $u_i(y)$
V_o	\bar{V}_o	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{oi} - \bar{V}_o)^2}{n(n-1)}}$	normal	$\frac{1}{P_{cm}}$	$u_1(y)$
V_{ins}	0	$u(V_{ins})$	normal	$\frac{1}{P_{cm}}$	$u_2(y)$
V_c	0	$\frac{V_{c+1} - V_{c-1}}{\sqrt{12}}$	rectangular	$\frac{1}{P_{cm}}$	$u_3(y)$
$P_{cm-cert}$	$p_{cm} = p_{ref} 10^{\left[\frac{SH_{cm}}{20}\right]}$	$u(p_{cm-cert})$	normal	$-\frac{V_o}{P_{cm}^2}$	$u_4(y)$
P_{cm-der}	0	$u(p_{cm-der})$	rectangular	$-\frac{V_o}{P_{cm}^2}$	$u_5(y)$
P_{cm-ref}	0	$u(p_{cm-ref})$	rectangular	$-\frac{V_o}{P_{cm}^2}$	$u_6(y)$
P_{cm-mic}	0	$u(p_{cm-mic})$	normal	$-\frac{V_o}{P_{cm}^2}$	$u_7(y)$
p_s	0	$u(p_s)$	rectangular	S_{ps}	$u_8(y)$
T	0	$u(T)$	rectangular	S_T	$u_9(y)$
$H.R.$	0	$u(H.R.)$	rectangular	S_{HR}	$u_{10}(y)$
M_{pref}	(4)	Incertidumbre combinada	$u(M_{pref}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} u_i^2(y)}$		
Número de grados efectivos de libertad $v_{eff} =$			$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}}$		
Factor de cobertura $k =$			$k = f(v_{eff})$		
Incertidumbre expandida ($k =$)			$U = ku(M_{pref})$		
Corrección no realizada máxima			C_{max}		
Incertidumbre global de calibración			$U = C_{max} + U$		



6.1.4. Cálculo de la incertidumbre expandida

De acuerdo con la GUM, la incertidumbre expandida se obtiene multiplicando el valor de la incertidumbre típica combinada por un factor de cobertura k , definiendo así un intervalo con un cierto nivel de confianza. Suponiendo que todas las componentes de la incertidumbre tienen una distribución de probabilidad normal, y que se cumple el criterio de fiabilidad, un valor de k igual a 2 define un intervalo con un nivel de confianza del 95 %.

Para los propósitos de este procedimiento, las simplificaciones introducidas permiten suponer que las distribuciones de probabilidad son normales. Entonces, si se efectúan el número de mediciones suficiente para garantizar que se cumpla el criterio de fiabilidad ($n \geq 10$), el factor de cobertura para obtener un nivel de confianza del 95 % será igual a 2, es decir:

$$U(M_{pref}) = k u_c(M_{pref}) = 2 u_c(M_{pref}) \quad (18)$$

Si no se cumple el criterio de fiabilidad, como es el caso cuando se realiza un número insuficiente de observaciones repetidas en las mediciones, hay que calcular el número de grados de libertad efectivos de la incertidumbre típica, v_{eff} , asociada a la variable de salida mediante la expresión (18) [11]

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (19)$$

donde las $u_i(y)$ son las contribuciones a la incertidumbre típica asociada con la estimación de salida y que resultan de las incertidumbres típicas asociadas a las estimaciones de entrada x_i , y v_i es el número de grados de libertad efectivo de la contribución $u_i(y)$.

Para una incertidumbre típica $u(x_i)$ obtenida a partir de una evaluación de tipo A, los grados de libertad están dados por $v = n - 1$, siendo n el número de observaciones independientes. Es más problemático



determinar los grados de libertad de una incertidumbre típica $u(x_i)$ obtenida de una evaluación de tipo B. Sin embargo, si la evaluación se hace de forma que se evite toda subestimación, puede considerarse que $\nu_i \rightarrow \infty$.

Siguiendo paso a paso el proceso descrito en los apartados anteriores, se obtienen expresiones similares para las otras tres variantes discutidas de la sensibilidad, es decir, en forma logarítmica, en las condiciones de medida y de referencia y en forma lineal en las condiciones de referencia.

6.2. Interpretación de resultados

Habida cuenta de los instrumentos a los que este procedimiento se aplica, micrófonos de condensador de uso general, no cabe plantearse mas declaración de cumplimiento que la derivada del funcionamiento del instrumento, con dos alternativas: su funcionamiento es correcto o no. El primer caso se tendrá cuando el valor de la sensibilidad determinado con el procedimiento esta dentro de las tolerancias del fabricante al compararlo con resultados anteriores y tener en cuenta las posibles derivas. El segundo caso se presentará cuando se observen fluctuaciones o inestabilidades anormales o la diferencia con respecto a resultados de calibraciones previas, si el laboratorio de calibración posee esta información, esté fuera de las tolerancias previstas por el fabricante. En esta ultima instancia, hay que observar detenidamente el comportamiento el micrófono y repetir la calibración pasado un cierto periodo, al menos 15 días, para averiguar si se ha producido un cambio permanente de sensibilidad debido, por ejemplo, a un golpe mecánico o térmico, pero que puede terminar en una condición de estabilidad y por tanto ser aun posible utilizar el micrófono. Si el proceso de variación se mantuviera o si se produjeran cambios bruscos de distinto sentido, entonces, solo cabría enviar el micrófono al fabricante para ver si puede ser reparado, posibilidad bastante remota teniendo en cuenta la construcción de los micrófonos de condensador.

Se podrá dar una orientación acerca del periodo de tiempo razonable para la recalibración del instrumento, teniendo en cuenta el uso que se le da. Así, un periodo comprendido entre los 12 y los 24 meses es



razonable para la mayoría de las aplicaciones de estos instrumentos. Sin embargo, hay que dejar muy claro que, en cualquier caso, el propietario del instrumento es el responsable final de asignar el periodo de recalibración.

7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

Manual de instrucciones del calibrador
Manual de instrucciones del micrófono

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Clasificación de instrumentos de Metrología Acústica y de Vibraciones del sistema de calibración industrial. 1ª Edición. SCI-Ministerio de Industria y Energía.
- [2] Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología (VIM). CEM. Ed 3. 2008.
- [3] Norma UNE-942: 1994. Calibradores sonoros.
- [4] Norma UNE-EN 60942:2003. Electroacústica. Calibradores acústicos.
- [5] Norma UNE-EN 61094-1:2000. Micrófonos de medida. Parte 1: Especificaciones de los micrófonos patrones de laboratorio.
- [6] Norma UNE-EN 61094-2:2009. Micrófonos de medida. Parte 2: Método primario para la calibración de micrófonos patrones de laboratorio por la técnica de la reciprocidad.
- [7] Norma UNE-EN 61094-3:1999. Micrófonos de medida. Parte 3: Método primario para la calibración en campo libre de micrófonos patrones de laboratorio por la técnica de la reciprocidad.



- [8] Norma UNE-EN 61094-4:1999. Micrófonos de medida. Parte 4: Especificaciones para los micrófonos patrones de trabajo.
- [9] Norma UNE-EN 61094-5:2002. Micrófonos de medida. Parte 5: Métodos para la calibración en presión de los micrófonos patrones de trabajo por comparación.
- [10] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. (GUM 1995 with minor corrections).
- [11] EA-4/02. “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration”, European cooperation for accreditation (EA). December 1999.
- [12] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. Grupo de trabajo MINER-CEM. Edición 0. 1997.

8. ANEXO: EJEMPLO DE CALIBRACIÓN DE UN MICRÓFONO DE CONDENSADOR

Con el fin de ilustrar la aplicación del procedimiento en una de sus formas generales, se presentan los datos correspondientes a un micrófono de condensador de $\frac{1}{2}$ " de polarización externa, con coeficientes ambientales de sensibilidad conocidos. En la calibración se utilizó un calibrador acústico calibrado, tipo pistófono, con su correspondiente certificado de calibración y con coeficientes ambientales conocidos y correcciones de nivel por efecto de la rejilla de protección y por la diferencia de volúmenes equivalentes también conocidas. La calibración se realizó con la rejilla de protección colocada en el micrófono. Así mismo, se utilizaron dos multímetros calibrados distintos para la medida de la tensión de inserción y de la tensión de salida y un sistema de medida de condiciones ambientales calibrado con sus correspondientes certificados de calibración.

Datos del calibrador:

- $SPL = 124,0$ dB re 2×10^{-5} Pa, en condiciones re referencia;
- *Certificado:* $U(SPL) = 0,088$ dB



- *Deriva entre calibraciones* = $\pm 0,10$ dB
- Coeficiente de presión, S_{ps} : = 0,087 dB/kPa;
- Coeficiente de temperatura, S_T = -0,001 dB/°C;
- Coeficiente de humedad relativa, S_{HR} = -0,001 dB/%
- Variación nivel de presión acústica por volumen equivalente:

- a) con rejilla: -0,03 dB \pm 0,01 dB
- b) sin rejilla: 0,0 dB \pm 0,01 dB

Datos micrófono:

- Coeficiente de presión estática, L_{smPs} = -0,01 dB/kPa;
- Coeficiente de temperatura, L_{smT} = -0,007 dB/°C;
- Coeficiente de humedad relativa, L_{smHR} = 0,004 dB/%

Condiciones medida:

- Presión estática media: 93,95 kPa
- Temperatura media: 23,1 °C
- Humedad media: 36 %

Márgenes de variación de los parámetros ambientales durante las mediciones:

- presión estática: 93,80 kPa – 94,10 kPa
- temperatura: 22,3 °C – 23,8 °C
- humedad: 33 % – 38 %
- tensión polarización: 200 V \pm 0,1 V

Datos del voltímetro (para el rango de 0 V_{ac} a 2 V_{ac}):

- Incertidumbre del certificado: $k = 2$: 0,05 mV
- Resolución: 0,01 mV
- Deriva entre calibraciones: $\pm 0,04$ mV
- Ninguna influencia de las condiciones ambientales para: temperaturas entre 10 °C y 40 °C; presiones entre 80 kPa



y 110 kPa y humedad relativa menor del 70 %.

Datos medida:

- Número de mediciones: 10
- Tensión en circuito abierto (V_o):
 - Valor medio: 1322,80 mV
 - Desviación típica muestral: 0,66 mV
- Tensión salida (V_c):
 - Valor medido con el calibrador encendido: 1313,45 mV
 - Valor máximo medido al aplicar la tensión de inserción: 1313,60 mV
 - Valor mínimo medido al aplicar la tensión de inserción: 1313,35 mV
- Presión acústica generada (p_{cm}):

$$\begin{aligned}SPL_{cm} &= SPL_{cr} + \Delta SPL_{P_s} + \Delta SPL_T + \Delta SPL_{HR} + \Delta SPL_m \\&= 124,00\text{dB} + 0,087 \text{ dB/kPa}(93, 95 - 101,325)\text{kPa} \\&\quad - 0,001 \text{ dB/}^\circ \text{C}(23,1 - 23,0)^\circ \text{C} \\&\quad - 0,001 \text{ dB/\%H.R.}(36 - 50)\% \text{H.R.} - 0,03 \text{ dB} \\&= 123,34 \text{ dB}\end{aligned}$$

$$p_{cm} = p_{ref} 10^{\left[\frac{SPL_{cm}}{20}\right]} = 2 \times 10^{-5} 10^{\left[\frac{123,34}{20}\right]} = 29,386 \text{ Pa}$$

Resultados:

- Sensibilidad:

En condiciones de medida:



$$M_{p_{cm}} = \frac{V_o}{p_{cm}} = \frac{1,3228}{29,386} = 0,04502 \text{ V/Pa}$$

- Nivel de Sensibilidad:

- En condiciones de medida referidos a 1V/Pa:

$$L_{M_{p_{cm}}} = 20 \log M_{p_{cm}} = 20 \log(0,04502) = -26,93 \text{ dB}$$

referidos a 1 V/Pa

- En condiciones de referencia referidos a 1V/Pa:

$$\begin{aligned} L_{M_{p_{ref}}} &= L_{M_{p_{cm}}} - (p_s - p_{s_{ref}}) S_{ps} - (T - T_{ref}) S_T - (HR - HR_{ref}) S_{HR} \\ &= -26,93 \text{ dB} + 0,001 \text{ dB/kPa} (93,95 - 101,325) \text{ kPa} \\ &\quad + 0,007 \text{ dB/}^\circ\text{C} (23,1 - 23,0)^\circ\text{C} \\ &\quad - 0,004 \text{ dB/\% H.R.} (36 - 50) \% \text{ H.R.} = -26,95 \text{ dB} \end{aligned}$$

referidos a 1 V/PA.

Incertidumbre:

Antes de dar el balance de componentes de la incertidumbre, en su forma tabulada, se discute la obtención de las diversas componentes.

A) Componentes tipo A:

Tensión de inserción: $u(V_o) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,66}{\sqrt{10}} = 0,21 \text{ mV}$

B) Componentes tipo B:



- Tensión de inserción:

- Certificado: $u(V_{ins-cert}) = \frac{U}{k} = \frac{0,05}{2} = 0,025 \text{ mV}$

- Resolución: $u(V_{ins-res}) = \frac{\text{resolucion}}{\sqrt{12}} = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 0,0029 \text{ mV}$

- Deriva del multímetro: $u(V_{ins-der}) = \frac{\text{deriva}}{\sqrt{3}} = \frac{0,04}{\sqrt{3}} = 0,023 \text{ mV}$

$$u(V_{ins}) = \sqrt{u(V_{ins-cert}^2) + u(V_{ins-res}^2) + u(V_{ins-der}^2)} =$$

$$\sqrt{0,025^2 + 0,0029^2 + 0,023^2} = 0,034 \text{ mV}$$

- Desviación tensión inserción:

$$u(V_c) = \frac{V_{c+1} - V_{c-1}}{\sqrt{12}} = \frac{1313,60 - 1313,45}{\sqrt{12}} = 0,072 \text{ mV}$$

- Nivel presión calibrador:

- Certificado de calibración:

$$u(p_{cm-cert}) = \frac{U}{k} = \frac{0,088}{2} = 0,044 \text{ db=}$$

$$= 2 \times 10^{-5} \left(10^{\frac{\text{SPL}+u(\text{SPL})}{20}} - 10^{\frac{\text{SPL}-u(\text{SPL})}{20}} \right) =$$



$$= 2 \times 10^{-5} \left(10^{\frac{123,342+0,044}{20}} - 10^{\frac{123,342-0,044}{20}} \right) = 0,15 \text{ Pa}$$

○ Deriva del calibrador: $u(p_{cm-der}) = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{0,10}{\sqrt{3}} = 0,057 \text{ dB} =$

$$= 2 \times 10^{-5} \left(10^{\frac{123,342+0,057}{20}} - 10^{\frac{123,342-0,057}{20}} \right) = 0,20 \text{ Pa}$$

○ Condiciones ambientales calibrador: $u(p_{cm-ref})$

- Presión:

$$S_{ps}u(p_s) = \frac{0,087 \text{ dB/kPa} \times 0,3 \text{ kPa}}{\sqrt{12}} = 0,0075 \text{ dB}$$

- Temperatura:

$$S_T u(T) = \frac{-0,001 \text{ dB/}^\circ\text{C} \times 1,5^\circ\text{C}}{\sqrt{12}} = -0,00043 \text{ dB}$$

- Humedad relativa:

$$S_{HR}u(HR) = \frac{-0,001 \text{ dB/HR} \times 5 \text{ HR}}{\sqrt{12}} = -0,0014 \text{ dB}$$

$$u(p_{cm-ref}) = \sqrt{S_{ps}^2 u^2(p_s) + S_T^2 u^2(T) + S_{HR}^2 u^2(HR)} =$$

$$= 0,0076 \text{ dB}$$



$$u(p_{cm-ref}) = 2 \times 10^{-5} \left(10^{\frac{123,342+0,0076}{20}} - 10^{\frac{123,342-0,0076}{20}} \right) = +0,026 \text{ Pa}$$

○ Acoplamiento micrófono -calibrador: $u(p_{cm-mic}) = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,0057 \text{ dB}$

$$0,0057 \text{ dB} = 2 \times 10^{-5} \left(10^{\frac{123,342+0,0057}{20}} - 10^{\frac{123,342-0,0057}{20}} \right) = 0,020 \text{ Pa}$$

$$u(p_{cm}) = \sqrt{u^2(p_{cm-cert}) + u^2(p_{cm-der}) + u^2(p_{cm-ref}) + u^2(p_{cm-mic})}$$

$$= \sqrt{0,15^2 + 0,20^2 + 0,026^2 + 0,020^2} = 0,25 \text{ Pa}$$

- Corrección a condiciones referencia micrófono

Como para los propósitos del procedimiento, se puede considerar que los coeficientes de variación ambiental del nivel de sensibilidad son constantes sin incertidumbre, entonces, la aportación a la varianza compuesta de estas correcciones será:

- Presión:

$$L_{Smps} u(p_s) = \frac{0,01 \text{ dB/kPa} \times 0,3 \text{ kPa}}{\sqrt{12}} = 0,00087 \text{ dB} \Rightarrow$$

$$S_{mps} u(p_s) = \left(\frac{10^{\frac{-26,932-0,00087}{20}} - 10^{\frac{-26,932+0,00087}{20}}}{2} \right) = 4,5 \times 10^{-6} \text{ V/Pa}$$



- Temperatura:

$$L_{SmTu}(T) = \frac{0,007 \text{ dB/}^\circ\text{C} \times 1,5^\circ\text{C}}{\sqrt{12}} = 0,003 \text{ 0 dB} \Rightarrow$$

$$S_{mTu}(T) = \left(\frac{10^{\frac{-26,932-0,030}{20}} - 10^{\frac{-26,932+0,030}{20}}}{2} \right) = 1,6 \times 10^{-5} \text{ V/Pa}$$

- Humedad relativa:

$$L_{SmHRu}(HR) = - \frac{0,004 \text{ dB/HR} \times 5 \text{ HR}}{\sqrt{12}} = - 0,005 \text{ 8 dB} \Rightarrow$$

$$S_{mHRu}(HR) = \left(\frac{10^{\frac{-26,932+0,0058}{20}} - 10^{\frac{-26,932-0,0058}{20}}}{2} \right) = -3,0 \times 10^{-5} \text{ V/Pa}$$

- Corrección por redondeo ($u^2 (L_{Mpc-red})$)

El redondeo debe ser considerada como una corrección conocida no realizada por lo que según F.2.4.5 de [10] su valor debe ser sumado a la incertidumbre expandida. Como el resultado de la sensibilidad es representado con una resolución de 0,01 dB, esto da lugar a un valor máximo para el redondeo de 0,005 dB.



C) Balance de componentes de incertidumbre

Magnitud X_i	Valor estimado X_i	Incertidumbre típica $u(X_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente sensibilidad c_i	Contribución incertidumbre $u_i(y)$
V_o	1,322 80 V	0,000 21 V	normal	$\frac{1}{29,386}$	$7,14 \times 10^{-6}$ V/Pa
V_{ins}	0	0,000 034 V	normal	$\frac{1}{29,386}$	$1,15 \times 10^{-6}$ V/Pa
V_c	0	0,000 072 V	rectangular	$\frac{1}{29,386}$	$2,45 \times 10^{-6}$ V/Pa
$P_{cm-cert}$	29,386 Pa	0,15 Pa	normal	$-\frac{1,32280}{29,386^2}$	$-2,29 \times 10^{-4}$ V/Pa
P_{cm-der}	0	0,20 Pa	rectangular	$-\frac{1,32280}{29,386^2}$	$-3,06 \times 10^{-4}$ V/Pa
P_{cm-ref}	0	0,026 Pa	rectangular	$-\frac{1,32280}{29,386^2}$	$-3,98 \times 10^{-5}$ V/Pa
P_{cm-mic}	0	0,020 Pa	normal	$-\frac{1,32280}{29,386^2}$	$-3,06 \times 10^{-5}$ V/Pa
p_s	0	$\frac{4,5 \times 10^{-6} \text{ V/Pa}}{\Delta p_s}$	rectangular	Δp_s	$4,49 \times 10^{-6}$ V/Pa
T	0	$\frac{1,6 \times 10^{-6} \text{ V/Pa}}{\Delta T}$	rectangular	ΔT	$1,57 \times 10^{-6}$ V/Pa
$H.R.$	0	$\frac{-3,0 \times 10^{-6} \text{ V/Pa}}{\Delta HR}$	rectangular	ΔHR	$-2,99 \times 10^{-6}$ V/Pa
M_{pref}	0,04502 V/Pa	Incertidumbre combinada		0,000 39 V/Pa	
Número de grados efectivos de libertad $\nu_{eff} =$				$u_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\nu_i}} = 829$	
Factor de cobertura $k =$				= 2,00	
Incertidumbre expandida ($k= 2$)				0,000 78 V/Pa	
Corrección no realizada máxima				0,000 005 V/Pa	
Incertidumbre global de calibración				0,000 79 V/Pa	



Y expresado en niveles de sensibilidad, referidos a 1 V/Pa:

$$U(L_{M_p}) = \frac{20 \log \left(\frac{M_{p_{cm}} + U}{M_{p_{cm}} - U} \right)}{2} =$$

$$= \frac{20 \log \left(\frac{0,04502 + 0,00079}{0,04502 - 0,00079} \right)}{2} = 0,15 \text{ dB, referidos a } 1\text{V/Pa}$$

