SISTEMA PRIMARIO PARA CALIBRACIÓN DE MICRÓFONOS PATRÓN EN CAMPO LIBRE

J. N. Razo-Razo, Andrés E. Pérez-Matzumoto. Centro Nacional de Metrología (CENAM). División de Vibraciones y Acústica. Carretera a Los Cués km 4,5. CP. 76241. Mpio. El Marqués, Qro. México. jrazo@cenam.mx; eperez@cenam.mx

Resumen: En el presente artículo se describe la calibración de micrófonos patrón usando el principio de reciprocidad electroacústica en condiciones de campo libre. Para esta calibración los micrófonos se colocan en una cámara anecoica, lo que permite que la calibración se realice, en condiciones controladas, en una condición de campo libre más cercana a la ideal. Se describe el sistema de medición implantado en el CENAM y se presenta una discusión de las principales variables de influencia tales como las condiciones ambientales, la interferencia de los micrófonos en el campo acústico y las reflexiones provenientes de las paredes de la cámara, así como las técnicas empleadas para minimizar sus efectos en la sensibilidad de los micrófonos. La calibración se realiza en el intervalo de frecuencia de 1 kHz a 25 kHz para micrófonos LS1 (*Laboratory Standard one-inch*) y de 2 kHz a 40 kHz para micrófonos LS2 (*Laboratory Standard half-inch*), los resultados alcanzados se comparan con los obtenidos en la calibración en presión. Finalmente, se presenta una primera estimación de la incertidumbre de medición, la cual resulta en 0,14 dB(k=2) para el principal intervalo en frecuencias (de 5 kHz a 20 kHz), en ambos tipos de micrófonos.

1. INTRODUCCIÓN

Los micrófonos patrón LS1 y LS2 definidos en [1], dadas sus características pueden ser calibrados mediante el principio de reciprocidad electroacústica [2, 3]. El proceso de calibración requiere de un conjunto de tres micrófonos, de los cuales se forman tres pares transmisor-receptor; 1-2, 1-3 y 2-3; cuvo producto de sensibilidades está diferentes parámetros determinado por ambientales y eléctricos. dimensionales, La sensibilidad de los micrófonos depende del tipo de campo acústico presente durante la calibración, ya sea presión [2] o campo libre [3].

Sobre calibración en presión se han realizado ya varias comparaciones inter-laboratorios [4, 5], con resultados exitosos. En el caso de comparaciones en campo libre [6], se ha identificado la necesidad de abordar técnicas de corrección [7], que permitan disminuir los efectos de las reflexiones provenientes de las paredes de la cámara anecoica, así como la interferencia de los micrófonos en el campo acústico.

En este artículo se describe la implantación del sistema para la calibración de micrófonos patrón por reciprocidad en campo libre en el CENAM, incluyendo las acciones tomadas para resolver algunas de las dificultades más significativas.

2. CALIBRACIÓN POR RECIPROCIDAD EN CAMPO LIBRE

2.1 Ecuación de reciprocidad en campo libre

El producto de sensibilidades en campo libre, $M_{f,1}M_{f,2}$, de un par micrófonos reales transmisorreceptor, se puede expresar a partir de la expresión dada en [3] para micrófonos puntuales como:

$$\underline{M}_{f,1}\underline{M}_{f,2} = -j\frac{2d_{12}}{\rho_{12}f} \cdot \frac{\underline{U}_2}{\underline{i}_1} \cdot e^{\underline{\chi}_{12}\mathbf{x}_{12}}, \qquad (1)$$

donde d_{12} , y x_{12} son la distancia entre los centros acústicos, y entre los diafragmas en [m], respectivamente; ρ_{12} es la densidad del aire en [kg/m³], χ_{12} es el coeficiente complejo de propagación [m⁻¹]; U_2 e i_1 son la tensión eléctrica en las terminales del micrófono receptor [V], y corriente eléctrica aplicada al micrófono transmisor en [A]; y *f* es la frecuencia en [Hz].

La sensibilidad de los micrófonos patrón depende de las condiciones ambientales, principalmente de la temperatura y de la presión estática. Por lo tanto, las sensibilidades se corrigen para expresarse a condiciones de referencia (101,325 kPa; 296,15 K 50 % HR). Así, el nivel de sensibilidad en condiciones de referencia, en [dB re 1 V/Pa], para un micrófono, está dado por:

$$M_{f,1,dB,ref} = \frac{1}{2} \Big[X_{12} + X_{13} - X_{23} - C_{12} - C_{13} + C_{23} \Big]$$
(2)

donde:

$$X_{12} = 20\log|\underline{M}_{f,1}\underline{M}_{f,2}| \tag{3a}$$

$$\begin{split} \mathbf{C}_{12} = \left[\left(\delta_{p,1} + \delta_{p,2} \right) \left(p_{sm} - p_{s,ref} \right) + \left(\delta_{t,1} + \delta_{t,2} \right) \left(T_m - T_{ref} \right) \right] \mathbf{(3b)} \\ \text{Ecuaciones similares a (3a) y (3b) se pueden} \\ \text{escribir para } X_{13} \quad \text{y} \quad X_{23} \quad \text{y para } C_{13} \quad \text{y} \quad C_{23}, \\ \text{respectivamente. En cada caso } \delta_p \quad \text{y} \quad \delta_t \quad \text{son los} \\ \text{coeficientes de corrección por presión [dB/kPa], y} \\ \text{temperatura [dB/K]; } p_{sm} \quad \text{y} \quad T_m \quad \text{son la presión} \\ \text{estática [kPa] y la temperatura [K] en condiciones de} \\ \text{medición; } p_{s,ref} \quad \text{y} \quad T_{ref} \quad \text{son la presión estática y} \\ \text{temperatura de referencia.} \end{split}$$

En la ecuación (1), la razón \underline{U}_2/i_1 se denomina impedancia eléctrica de transferencia (IET), $Z_{e,12}$. El sistema de medición emplea una impedancia de referencia, $\underline{Z}_{e,ref}$, en serie con el micrófono transmisor, por lo que la IET se determina como:

$$Z_{e,12} = \frac{U_2}{\underline{i}_1} = Z_{e,ref} \cdot \frac{\underline{R}_{12,m}}{\underline{R}_{12,r}}$$
(4)

donde $Z_{e,ref}$ es la impedancia eléctrica de referencia, [Ω]; $R_{12,m}$, y $R_{12,r}$ son las razones de tensiones en condición de medición y de referencia respectivamente.

La razón de tensiones $R_{12,r}$, se obtiene aplicando una tensión eléctrica a ambos micrófonos para determinar los valores de la tensión de circuito abierto en las terminales de los mismos, y corregir la ganancia de la cadena de medición empleada para cada micrófono.

2.2 Sistema de medición

En la figura 1, se muestra un diagrama general del sistema de medición implantado. El sistema de medición de dos canales permite la obtención del módulo y fase de las razones de tensiones $R_{12,m}$ y $R_{12,r}$. El aparato de reciprocidad puede emplearse para realizar las mediciones en los dos micrófonos. Sin embargo, debido a la presencia de *cross-talk* entre sus canales [8], se emplea un sistema de acondicionamiento independiente para el micrófono receptor. Así se asegura que el *cross-talk* entre los dos canales esté al menos 60 dB, por debajo de la razón de tensiones de interés. En el sistema de se asegura que la tensión de polarización sea de 200,0 V en ambos canales.

Se desarrolló un programa de control que permite la captura tanto de la razón de tensiones, como de las condiciones ambientales prevalecientes en cada

frecuencia de medición. Las mediciones de las condiciones ambientales permiten aplicar las correcciones por presión estática y temperatura, ecuación (3b), para cada micrófono en el par en que ha sido medido.



Figura 1: Diagrama general del sistema de medición implantado para campo libre.

Los transductores de condiciones ambientales, están ubicados en el interior de la cámara anecoica. Las condiciones ambientales de interés son las más cercanas al centro entre el par de micrófonos, en particular la temperatura. Este transductor y el de humedad se encuentran a la misma altura y a una distancia de alrededor de 1,2 m de los micrófonos, para reducir la interferencia en el campo acústico.

Los micrófonos están colocados en posición horizontal, procurando que el gradiente de temperatura ambiental tenga una influencia mínima entre ambos micrófonos. En posición vertical se observaron variaciones en las mediciones que podrían ser atribuidas al gradiente de temperatura ambiental.

3. VARIABLES DE INFLUENCIA

Cada una de las variables incluidas en las ecuaciones (1) y (2) requieren de consideraciones particulares en su determinación, con excepción de la frecuencia *f*, de la señal de excitación, la cual se puede conocer con una incertidumbre de 25×10^{-6} cuyo efecto no es importante en la determinación de la incertidumbre de la sensibilidad.

3.1 Distancia entre los centros acústicos y entre los diafragmas

El anexo A de la referencia [3], proporciona la posición estimada de los centros acústicos, relativa

al diafragma del micrófono, para micrófonos LS1 de 630 Hz a 20 kHz y LS2 de 1 kHz a 20 kHz. En la figura 2, se ilustran las consideraciones tomadas en cuenta para determinar la distancia entre centros acústicos y entre diafragmas de los micrófonos.



Figura 2: Posiciones relativas de los centros acústicos de los micrófonos colocados en campo libre.

En la figura; l_{12} es la distancia de medición (entre cubiertas); $ca_1 y ca_2$ son las posiciones de los centros acústicos; $cd_1 y cd_2$ son la profundidad de la cavidad frontal; todas las dimensiones en [m].

Las distancias de interés, d_{12} y x_{12} , considerando que $ca_1 = ca_2$ para micrófonos del mismo tipo, están dadas por:

$$d_{12} = l_{12} + cd_1 + cd_2 - 2ca$$
, y (5a)

$$\mathbf{x}_{12} = \mathbf{I}_{12} + \mathbf{c}\mathbf{d}_1 + \mathbf{c}\mathbf{d}_2$$
, (5b)

Los valores de ca para diferentes frecuencias se obtienen interpolando los valores dados en el anexo A de la referencia [3] hasta el límite de 20 kHz. Por encima de este límite se emplea la posición para 20 kHz y se incrementa la incertidumbre asociada por un factor de 2. Cabe señalar que en la información dada en [3], se observa una tendencia hacia valores negativos, aunque en experimentos posteriores a [3] como en [9], se observa que la tendencia se revierte antes de los 30 kHz. En este caso, se decidió ampliar la incertidumbre hasta un valor tal que se contenga el valor mínimo observado en [9]. Para la profundidad de las cavidades frontales, cd, se realiza una calibración en un laboratorio dimensional. La distancia I_{12} , se determina mediante un vernier y un par de barras de longitud conocida en cada medición. Además, se realizan mediciones a 4 diferentes distancias, dependiendo del tipo de micrófono, para LS1: 240 mm, 280 mm, 347 mm y 414 mm. Para LS2: 160 mm, 190 mm, 220 mm y 250 mm. Esto permite considerar posibles variaciones en la alineación de los micrófonos y errores en la determinación de la posición de los centros acústicos.

3.2 La densidad del medio y la atenuación del sonido en el aire

Las condiciones ambientales, (p, T, H) permiten determinar la densidad del aire ρ . Esta se determina de acuerdo con el anexo F de la referencia [2].

En la determinación del módulo de la sensibilidad, el coeficiente complejo de propagación, $\underline{\gamma}$, puede ser sustituido por su parte real, α , que representa la atenuación del sonido en el aire en [Np/m]. Este parámetro se determina de acuerdo con el anexo B de la referencia [3].

Los valores de ρ y α se calculan para cada frecuencia medida de la señal de excitación, a partir de la medición de las condiciones ambientales.

3.3 Medición y limpieza de la impedancia eléctrica de transferencia

La impedancia eléctrica de transferencia (IET), ecuación (4), contiene las condiciones del campo acústico: las reflexiones de las paredes, la interferencia entre los micrófonos, *cross-talk*, etc. La impedancia de referencia, $Z_{e,ref}$, se determina a partir de los valores calibrados de los elementos que la componen: un capacitor de 4,76 nF y un resistor en paralelo.

La medición de las razones de tensiones consideradas en (4) se realiza en el intervalo de frecuencias, $[f_{min}, f_{max}]$, dado en la tabla 1. Esto debido a la poca eficiencia de radiación de los micrófonos, la relación señal a ruido y el *cross-talk* en los canales de medición, fuera de este intervalo.

Tabla 1: Parámetros de medición de $Z_{e,12}$.

Intervalo de frecuencia, [Hz]	Micrófonos	
	LS1	LS2
Frecuencia inferior f_{\min} .	768	1 152
Frecuencia superior f_{\max} .	33 312	52 992
Resolución Δf .	96	128

Para reducir el efecto de las interferencias en el campo acústico, se emplea la técnica de la ventana temportal descrita en [7] con una modificación en la aproximación para completar la IET en el intervalo de frecuencia $[0, f_{MAX}]$. La figura 3, muestra el proceso general de la técnica de limpieza de la IET.

La IET se completa en el intervalo de $[0, f_{MAX}]$, con

 $f_{MAX} = 512 * \Delta f$, de modo que se cuente con 513 frecuencias. En el intervalo $[0, f_{min})$, se emplea una extrapolación de los últimos datos medidos de la IET a diferencia de [7] donde emplea la IET medida en la calibración en presión con un proceso de normalización. En el intervalo $(f_{max}, f_{MAX}]$ se emplea una caída suave a un valor de 1x10⁻⁶, para evitar una discontinuidad en el espectro medido, a diferencia [7] en el que se emplea un filtro en el dominio del tiempo. A partir de la IET completa se respuesta al impulso mediante la obtiene la Transformada de Fourier Inversa. El impulso principal se filtra con una ventana tipo Tukey de 64 puntos con α =0,25, equivalente a una duración 651,04 µs y 488,3 µs para micrófonos LS1 y LS2 respectivamente. La respuesta al impulso 'limpia' se transforma nuevamente al dominio de la frecuencia, para obtener la IET empleada en el cálculo de las sensibilidades de los micrófonos.



Figura 3: Proceso general de limpieza de la IET. (a).- IET medida, (b).- IET completa; (c).- IET compleja completa; (d).- Respuesta al impulso completa; (e).- Respuesta al impulso con la ventana temporal; (f).- IET 'limpia' en el dominio de la frecuencia.

Este proceso de limpieza genera variaciones en los extremos del intervalo de frecuencia. Esto debido principalmente al empleo de la ventana temporal, y al proceso de completar artificialmente la IET. Por lo anterior, el intervalo de frecuencia definitivo se reduce, a los valores mostrados en la tabla 2. El límite inferior de frecuencia se considera tomando en cuenta la repetibilidad de las mediciones, mientras que el límite superior se considera tomando en cuenta la frecuencia máxima medida.

 Tabla 2: Intervalo se frecuencia para la sensibilidad de los micrófonos.

Parámetro	Micrófonos		
	LS1	LS2	
Frec. inferior f_{\min} , [Hz]	960	2048	
Frec. superior f_{\max} , [Hz]	25 600	40 064	
Nivel de sensibilidad, [dB(re 1 V/Pa)]	-33 a -12	-54 a -25	

3.4 Corrección por condiciones ambientales

Los valores de los coeficientes de corrección por presión estática y temperatura, δ_p y δ_t , de ecuación (3b), para cada micrófono se calculan de acuerdo con [10]. Estos valores corresponden a los valores de los coeficientes determinados para la calibración por reciprocidad en presión, dado que al momento no se cuenta con estimaciones para la calibración en condiciones de campo libre. La ecuación (10) muestra la aproximación propuesta:

$$\delta_m = a_{0,m} + \sum_{k=1}^{9} a_k \cdot (f/f_{0,m})^k , \qquad (6)$$

donde $a_{0,m}$ coeficiente de corrección para el micrófono *m* a 250 Hz; a_k coeficientes de las tablas 1 y 2 de la referencia [10]; $f_{0,m}$ frecuencia de resonancia; para el micrófono *m* en [Hz].

Esta aproximación permite calcular los coeficientes de corrección para presión y temperatura en función de la frecuencia. Se recomienda hasta 14 kHz y 35 kHz para micrófonos LS1 LS2 у respectivamente, del tipo empleados como patrones. En este caso, para frecuencias por encima de los límites anteriores, se usa el valor obtenido para la frecuencia más alta y se duplica la incertidumbre asociada. Esto considerando que el grado del polinomio dado en la ecuación (6) hace que la extrapolación arroje valores muy altos para el intervalo de frecuencias de interés.

El valor de la frecuencia de resonancia empleado en el cálculo corresponde al determinado en la calibración en presión. Este valor puede diferir un poco del correspondiente en la calibración en campo libre, debido al cambio en las condiciones de la capa de aire encerrada entre el diafragma y la placa trasera. En el caso de $a_{0,m}$, para presión se emplea el valor determinado en la calibración en presión, y para temperatura se emplea el valor típico declarado por el fabricante. En algunos casos se cuenta con determinaciones del coeficiente de temperatura para los micrófonos del laboratorio.

4. **RESULTADOS**

En la figura 4 se muestran resultados para las sensibilidades en campo libre de micrófonos LS1 y LS2. La figura 4a, muestra resultados para tres micrófonos LS1 en el intervalo de 500 Hz a 30 kHz. La figura 4b, muestra tres resultados para un mismo micrófono tipo LS2, en el intervalo de frecuencia de 1 kHz a 50 kHz.

La corrección de campo libre [6, 11], C_f , ecuación (7), relaciona la sensibilidad en campo libre \underline{M}_f , y la sensibilidad en presión \underline{M}_{ρ} , para un mismo

micrófono.

$$C_{f} = 20 \log \left| \frac{M_{f}}{M_{\rho}} \right| = M_{f,dB} - M_{\rho,dB}, \qquad (7)$$

Los valores de C_f , se pueden aproximar, de acuerdo con [11], mediante un polinomio de la forma:

$$C_{f} = \sum_{k=1}^{9} c_{k} \cdot \left(f_{\sqrt{296,15/T_{m}}} \right)^{k}$$
, (8)

donde c_k son los coeficientes de la tabla 1 de [11].

Esta aproximación se considera útil hasta alrededor de 12,5 kHz y 25 kHz para micrófonos LS1 y LS2, respectivamente.

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para los micrófonos LS1 y LS2 del laboratorio; se incluye el promedio de la corrección obtenida para los micrófonos medidos y el valor esperado (P.IEC61094-7), de acuerdo con [11]



Figura 4: Sensibilidad en campo libre. (a).- 3 micrófonos LS1; (b).- 4 mediciones para un micrófono LS2.





(a)

Figura 5: Resultados para la corrección en campo libre, C_{ϵ} . (a).- micrófonos LS1; (b).- micrófonos LS2.

La frecuencia superior para la que se muestran resultados en la figura 4, está determinada por el límite de frecuencia para la cual se ha determinado la sensibilidad en presión. La sensibilidad en campo libre puede ser medida a frecuencias por encima del límite de la calibración en presión.

INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN 5.

sensibilidades de micrófonos Las los tres empleados en el proceso de calibración son interdependientes, ver ecuación (2). Esto es, las incertidumbres de los micrófonos serán similares al depender del mismo conjunto de variables de entrada. En la figura 6, se muestra un diagrama con las variables ambientales involucradas en la determinación de la sensibilidad de los micrófonos, en condiciones ambientales de referencia.



Figura 6: Variables involucradas en la determinación de la sensibilidad de los micrófonos

En la tabla 3, se muestran las incertidumbres asociadas únicamente de los componentes de mayor influencia. Cabe mencionar que la incertidumbre por repetibilidad para $R_{12,m}$ y $R_{12,r}$, depende de la frecuencia. Se incrementa en frecuencias por debajo de 5 kHz y por encima de 25 kHz, para el caso de micrófonos LS2. Para el caso de micrófonos LS1, el comportamiento es similar. Este comportamiento de la repetibilidad en la razón de tensiones es el responsable del comportamiento observado en la figura 7 para la incertidumbre expandida en frecuencias bajas. Esto se debe principalmente a la pobre relación señal a ruido en las frecuencias bajas en la medición de $R_{12,m}$ y $R_{12,r}$.

(b)

Para estimar el valor de la incertidumbre asociada se consideran los lineamientos dados en [12, 13], empleando el método de Simulación de Monte Carlo (SMC) descrito en [13]. Los resultados obtenidos, utilizando como modelo la ecuación (2), se muestran en la figura 7.

En los valores de incertidumbre empleados en la SMC, se consideran algunos términos comunes para considerar la correlación existente entre las distintas variables. Por ejemplo, la incertidumbre por calibración del medidor de distancia se considera como un componente de las tres distancias (I_{12} , I_{13})

y I_{23}) requeridas para determinar la sensibilidad.

Tabla 3: Principales componentes de incertidumbre Valor de Variable Origen.Tipo. incertidumbre Ref [3]. B-Uniforme. са ±2 mm Espec. B-Uniforme. ±0,01 dB $\underline{R}_{ij,m}, \underline{R}_{ij,r}$ ±0,002 dB Rep. A-Normal. k=1 Ī_{ij} ±0,5 mm Rep. A-Normal. k=1. р ±0,025 kPa Cal. B-Normal. k=1. Rep. A-Normal. k=1 ±0,01 kPa ±0,04 K Cal. B-Normal. k=1. Т ±0,3 K Rep. A-Norma.k=1. Н ±0.8 % Cal. B-Normal. k=1.



±2 %

Rep. A-Normal.k=1.

En la figura 7 se observa un incremento escalonado en la incertidumbre en los 20 kHz, esto se debe al incremento de incertidumbre considerado para la posición de los centros acústicos, dado que no se cuenta con información suficiente para frecuencias superiores. En la frecuencia de 35 kHz, se debería notar otro leve incremento, debido a la ausencia de

datos para los coeficientes de corrección por temperatura y presión de los micrófonos LS2, para frecuencias superiores.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados de sensibilidad obtenidos muestran una concordancia adecuada con lo esperado tomando como base la corrección de campo libre y la sensibilidad en presión, al menos en el intervalo de frecuencia en que se dispone de valores para esta última, hasta 10 kHz para micrófonos LS1 y 31,5 kHz para micrófonos LS2.

Los resultados de la determinación de la sensibilidad en campo libre, muestran que es posible emplear este tipo de micrófonos en frecuencias superiores a las establecidas por la calibración en presión. Esto debido a que para valores por encima del límite de presión aún se tienen valores de sensibilidad similares a los de baja frecuencia.

La incertidumbre en la posición de los centros acústicos es la componente principal en la incertidumbre de la sensibilidad en campo libre, por lo que es conveniente contar con una estimación individual, para cada micrófono.

La incertidumbre en la sensibilidad en campo libre de micrófonos a bajas frecuencias se incrementa considerablemente. Por lo que se contempla la realización de un número mayor de mediciones para reducir la incertidumbre por repetibilidad, principal responsable de este incremento.

Otros fenómenos como la difracción del campo acústico por los micrófonos, y el efecto de la no planicidad de la onda incidente en el micrófono receptor, no abordados en este trabajo, requieren de atención en el futuro. Así mismo, la medición de temperatura en puntos más cercanos a la posición de los micrófonos es un aspecto que debe ser considerado con más detalle.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ing. Osvaldo Llamas Llamas y al Ing. Adolfo Esquivel Delgado por el apoyo, durante el desarrollo del sistema de medición.

REFERENCIAS

- [1] Norma Internacional *IEC* 61094-1: *Measurement Microphones. Part* 1: *Specifications* for *laboratory standard microphones.* 1992.
- [2] Norma Internacional IEC 61094-2: Measurement

Microphones. Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique. 1992.

- [3] Norma Internacional IEC 61094-3: Measurement Microphones. Part 3: Primary method for freefield calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique. 1995. ICS 17.140.50; 33.160.50.
- [4] Barham, R. Report on key comparison CCAUV.A-K1. NPL Report CAIR 02. Agosto 2003.
- [5] Cutanda V., Rasmussen, K. *Report on the key comparison CCAUV.A-K3.* Draft B. Enero 2006
- [6] Rasmussen, K, Sandermann Olsen, E. INTERCOMPARISON on free-field calibration of microphones. BCR Contract No. 3286/1/0/146/89/3-BCR-DK(30). Contractor's final report. FINAL VERSION. The Acoustics Laboratory – Technical University of Denmark. Report PL-07, 1993.
- [7] Barrera-Figueroa, S. New methods for transducer calibration: Free-field reciprocity calibration of condenser microphones. PhD Thesis. Ørsted•DTU, Acoustic Technology. Technical University of Denmark. Mayo de 2003.
- [8] Razo-Razo, J,N., Llamas-Llamas, O. Sobre la influencia del cross-talk en la calibración primaria de micrófonos por reciprocidad en campo libre: un caso de estudio. Memorias del IEEE 3º Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, Morelos, México. 28 al 30 de septiembre de 2005.
- [9] R. P. Wagner; V. Nedzelnitsky, "Determination of acoustic center correction values for type LS2aP microphones at normal incidence," J. Acoust. Soc. Am. **104**, 192-203 (1998).
- [10] Brüel & Kjær. Technical Review No. 1- 2001. Properties and calibration of laboratory standard microphones & Uncertainties in microphone frequency response. ISSN 0007-2621. 2001.
- [11] Especificación Técnica. IEC/TS 61094-7: Measure-ment Microphones. Part 7: Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones. Borrador versión 29/WG5/61094-7/WD10 2005/07.
- [12] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 1995.
- [13] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Supplement 1 – Numerical Methods for the Propagation of Distributions. Versión: 2004-03-16