



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A084

Bases Metrológicas en Acústica y Vibraciones de la Argentina

TAIBO, Lucía N. ⁽¹⁾
BARCELO, Lucía E. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Área Técnica ACÚSTICA, FÍSICA Y METROLOGÍA, INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), Av. Gral. Paz 5445, (1650) SAN MARTÍN, Pcia. Buenos Aires, R. ARGENTINA; E-mails: luciat@inti.gov.ar; lubar@inti.gov.ar

Abstract

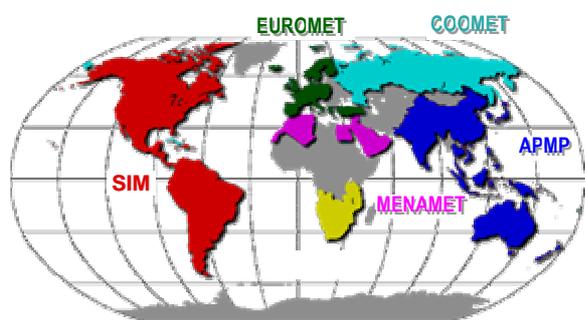
The National Institute of Industrial Technology, INTI, is the argentinian state technical referring in the application of quality regulations or product identity, as public assistant for the industrial development and technological responsible to endeavor the integration of the whole community to the productive system. Besides, it is the National Institute of Metrology, NMI of Argentina, due to its legal responsibility on the national measurement standards. The dissemination of accuracy from the metrological pyramid apex, comprises the transference of knowledge and the provision of traceability to an ample spectrum of users from industry, trade and services. In our increasingly globalized world, it is essential to attain the international equivalence of measuring standards. In America, the first joint actions in Acoustics and Vibrations within the Interamerican System of Metrology (SIM) were initiated in the past decade. Nowadays, INTI holds the international accreditation by ISO/IEC 17025 of its calibration and measurement capabilities, sustained by regional key comparisons among the NMIs of Brasil, Mexico, Canada, USA and Argentina, and the peer review from PTB-Germany and INMETRO-Brazil. This paper gives an overview of the attained status of INTI primary standards and some examples of its dissemination to measurements and testing in laboratory and field applications.

Resumen

El INTI es el referente técnico del estado argentino en la aplicación de regulaciones de calidad o identidad de producto, asistente público para el desarrollo industrial y responsable tecnológico para la integración de la comunidad al sistema productivo. Además, es el Instituto Nacional de Metrología, NMI, debido a su responsabilidad legal sobre los patrones nacionales de medición. La diseminación de la exactitud desde la cúspide de la pirámide metrológica, se efectúa mediante la transferencia de conocimientos y provisión de trazabilidad a un amplio espectro de usuarios de la industria, comercio y servicios. En nuestro mundo día a día más globalizado, es preciso lograr la equivalencia internacional de las referencias metrológicas. En América, se iniciaban las primeras acciones conjuntas en Acústica y Vibraciones en el marco del Sistema Interamericano de Metrología, SIM en la década pasada. Actualmente, INTI posee acreditación internacional según ISO/IEC 17025 de sus capacidades de calibración y medición, sustentada por comparaciones regionales clave entre los NMIs de Brasil, Méjico, Canadá, EEUU y Argentina, y evaluación de pares por parte del PTB-Alemania e INMETRO-Brasil. Este trabajo presenta un panorama de la base primaria de medición del INTI y ejemplos de mediciones y ensayos aplicados en condiciones de laboratorio y de campo.

1. Introducción

La metrología, o la *ciencia de medición* [1], es probablemente la más antigua de las ciencias y hoy en día, juega un rol preponderante en el mundo altamente globalizado donde la economía y la calidad de vida cotidiana dependen de la realización de mediciones confiables, coherentes y aceptadas internacionalmente. La Convención del Metro es el acuerdo internacional sobre las unidades de medición que comprende a la mayoría de los países industrializados, por el que se confiere autoridad para actuar en la metrología mundial, a organismos tales como la *Conferencia General de Pesas y Medidas* (CGPM), al *Comité Internacional de Pesas y Medidas* (CIPM) y al *Buró Internacional de Pesas y Medidas* (BIPM). Las actividades desarrolladas se vinculan principalmente a la demanda de patrones de medición de exactitud, alcance y diversidad crecientes, y a la necesidad de demostrar la equivalencia entre los patrones nacionales de medida.



Esta estructura metroológica requiere de la participación de diversos organismos internacionales y nacionales con el objeto de transferir los avances en el campo técnico y científico. La acción conjunta de los países situados en distintas regiones del mundo se canaliza a través de las denominadas Organizaciones Regionales de Metrología (RMOs) coordinadas por el CIPM, con el fin de desarrollar proyectos de interés común.

Figura 1. Organizaciones Regionales de Metrología (RMOs) en el mundo.

1.1 El rol de los Institutos Nacionales de Metrología (NMIs)

Los denominados Institutos Nacionales de Metrología (NMIs) de los países intervinientes en el acuerdo internacional, cumplen un rol protagónico en el avance del conocimiento básico y aplicado. Los NMIs son los responsables de proveer las bases de referencia o Patrones Nacionales de Medición (PNMs) en cada país, para ser transferidos a un amplio espectro de usuarios de la industria, el comercio y los servicios, a través de calibraciones y mediciones *trazables*. El concepto de **trazabilidad** se refiere a “*la propiedad del resultado de una medición, o de un patrón, de estar relacionado con referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas con incertidumbres establecidas*”¹.

Con el objeto de definir los valores de referencia en las distintas magnitudes, es preciso evaluar la equivalencia entre los distintos NMIs y las infraestructuras verticales de trazabilidad de cada país. A tal efecto se llevan a cabo comparaciones internacionales denominadas *clave*, coordinadas por el CIPM con la participación de un número reducido de países. Asimismo, dentro de las organizaciones regionales también se efectúan comparaciones clave con la participación de un número mayor de países, en cuyo caso debe cumplirse un complejo procedimiento de evaluaciones que puede demandar varios años de actividad, a fin de lograr la equivalencia al CIPM.

En 1999 la firma del *Acuerdo de Reconocimiento Mutuo* (CIPM-MRA), constituyó un importante avance que posibilita a los gobiernos y usuarios contar con una base técnica

¹ VIM - Vocabulary of International Metrology ISO 1995.

coherente y confiable que sirva de sustento para acuerdos más amplios en el comercio internacional y en los ámbitos reglamentados. El proceso del MRA comprende básicamente dos etapas:

(i) *Comparaciones de medida internacionales, denominadas clave, (ii) Implementación de sistemas de calidad y demostración de competencia por parte de los NMIs, cumpliendo la norma ISO/IEC 17025 por autodeclaración o por acreditación.*

Como resultado del proceso del MRA, las capacidades de medición y calibración de los respectivos NMIs se incluyen en una base de datos mantenida en el BIPM [2], reconocida mutuamente por los NMIs según lo establecido en el acuerdo.

2 Trazabilidad en Acústica y Vibraciones

2.1 Comparaciones internacionales en el SIM

La trazabilidad en Acústica y Vibraciones es de creciente interés en ámbitos muy diversos que abarcan actividades relacionadas con el comercio, medio ambiente, salud y caracterización de productos de muy variada naturaleza.



Figura 2. SIM, NMIs integrantes del MWG9-AUV.

En el marco del CIPM el comité consultivo sobre Acústica, Ultrasonido y Vibraciones es el CCAUV² [3]. La RMO del continente americano es el Sistema Interamericano de Metrología (SIM), formado por cinco subregiones (Figura 2). Desde la primera mitad del siglo pasado, ya se realizaban importantes trabajos de metrología en acústica y vibraciones en EEUU y Canadá. En Argentina, el tema comenzó a desarrollarse en forma sostenida en el INTI a partir de la década del 80, incentivándose la integración con los demás países de la región [4]. No obstante, las primeras comparaciones formales en el continente, tuvieron lugar en 1995 en la subregión NORAMET entre los NMIs de EEUU, Canadá y Méjico.

En 1996 se llevaron a cabo actividades importantes [5] que culminaron con la incorporación de Brasil y Argentina (SURAMET) a la región del norte, dando comienzo en ese mismo año a la primera comparación internacional en aceleración del continente americano. Desde entonces, el *Grupo de Trabajo de Metrología en Acústica, Ultrasonido y Vibraciones, MWG9-AUV* del SIM integrado por el NIST-EEUU, NRC-Canadá, CENAM-Méjico, INMETRO-Brasil e INTI-Argentina, desarrolla actividades en forma sostenida, manteniendo reuniones periódicas en las que se intercambian experiencias en el avance de las investigaciones, se planean proyectos conjuntos y organizan comparaciones internacionales según las prioridades y recursos de los países participantes.

En la Tabla 1 se resumen las comparaciones llevadas a cabo en la región, hasta el presente.

² Comité Consultivo en Acústica, Ultrasonido y Vibraciones

Tabla 1. Comparaciones Internacionales en Acústica y Vibraciones

Tipo de Comparación	Magnitud	Patrón Viajero	Campo de Medida	Período Laboratorio Piloto
<i>Regional</i> SIM-AUV-AK1	Presión sonora	Micrófonos LSP1	125-8000 Hz	1997-2000 NRC-Canadá
<i>Regional</i> SIM-AUV-VK1	Aceleración vibratoria	Acelerómetros Piezoeléctricos	50-5000 Hz	1996-1999 NIST-EEUU
<i>Internacional,</i> Dinamarca, Brasil Méjico, Argentina	Presión sonora	Micrófonos LSP1	125-8000 Hz	1998-2000 DTU, Dinamarca
<i>Regional,</i> SIM.AUV.A-S1	Nivel de Presión Sonora	Pistonfón	124 dB, 250Hz	2001-2004 CENAM-Méjico

2.2 El rol del INTI

El Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI, es el referente técnico del estado argentino en la aplicación de regulaciones de calidad o identidad de producto en la industria y el comercio, es el asistente público para desarrollo industrial y el responsable tecnológico de procurar la integración entre la comunidad y el sistema productivo en todo el país.

Asimismo, dada la responsabilidad legal ³ que le compete sobre los patrones de medida, es el NMI de la República Argentina. Cumpliendo este rol, efectúa la realización y mantenimiento de los patrones de las unidades de medida conforme al Sistema Internacional de Unidades (SI), y su diseminación en los ámbitos de la metrología científica, industrial y legal, constituyendo la cúspide de la pirámide de trazabilidad metrológica en el país. Los patrones nacionales en Acústica y Vibraciones mantenidos por el INTI se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Patrones Nacionales en Acústica y Vibraciones

Magnitud	Patrón materializado	Método
Presión Sonora	<i>Micrófono a condensador</i>	IEC 61094-2
Aceleración	<i>Acelerómetro piezoeléctrico</i>	ISO 16063-11
Potencia Sonora	<i>Fuente sonora de referencia</i>	ISO 6926

El laboratorio cuenta con el reconocimiento internacional de las capacidades metrológicas declaradas [2], acreditado según ISO/IEC 17025 por auditoria de pares (*peer review*) de PTB-Alemania e INMETRO-Brasil.

2.2.1 Presión Sonora

El Patrón Nacional de Presión Sonora está formado por un conjunto de tres micrófonos del tipo condensador que son considerados internacionalmente como los más exactos y estables en el intervalo audible. Esta unidad se materializa a través de un micrófono que al exponerse a un campo sonoro, genera una tensión eléctrica proporcional a la presión sonora. Esta relación de proporcionalidad se conoce como sensibilidad y se expresa en dB re 1 V/Pa. Alcance: Sensibilidad - 50 dB a - 23 dB re 1 V/Pa. Incertidumbre 0,05 dB re 1 V/Pa. En la Figura 3 se da la carta de trazabilidad en presión sonora partiendo de las unidades básicas y derivadas del SI, u_c : incertidumbre combinada expandida con $k = 2$, la cual se incrementa a medida que se desciende en la cadena metrológica.

³ Ley Nacional de Metrología N° 19511/1971

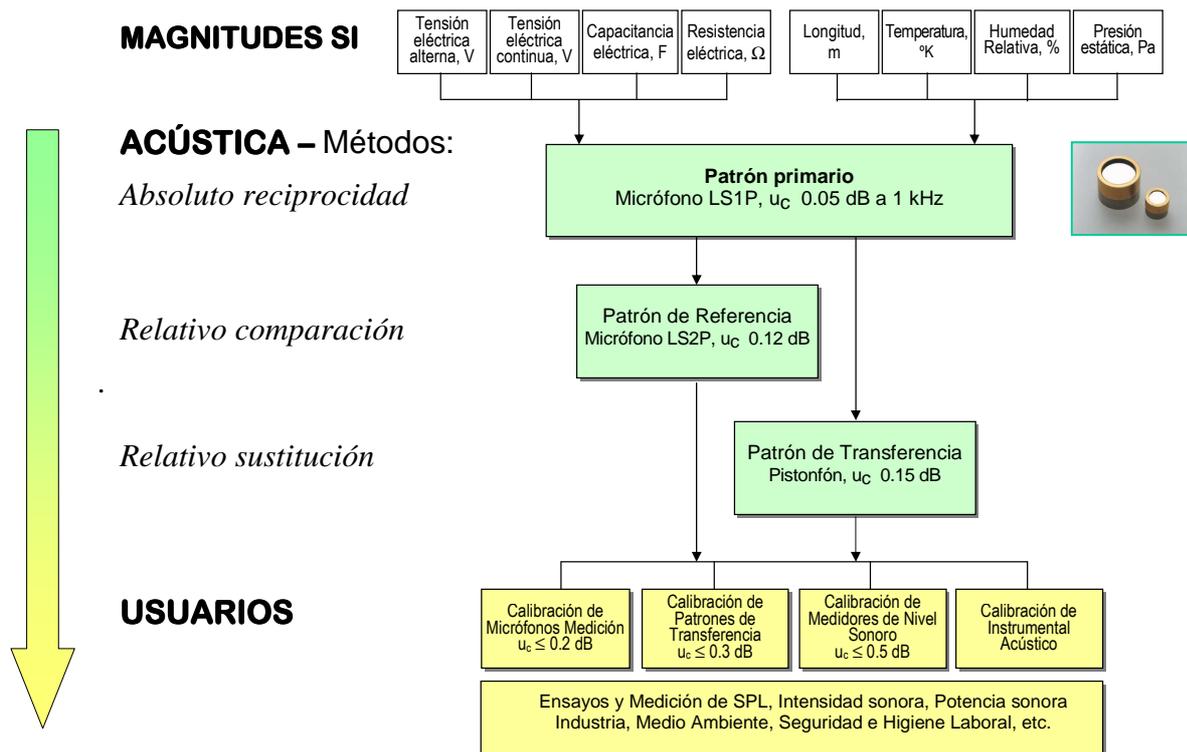


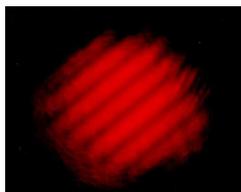
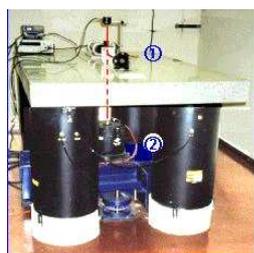
Figura 3. Carta de trazabilidad en presión sonora

Comparación SIM-AUV-AK1

La comparación internacional en presión sonora (Tabla 1) contó con la participación de los cinco NMIs que forman el MWG9-AUV: National Measurement Standards (INMS - Canada), National Institute of Standards and Technology (NIST - U.S.A.), Centro Nacional de Metrología (CENAM - Mexico), Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO - Brazil) e Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI - Argentina). Resultó muy satisfactoria encontrándose una desviación máxima < 0.04 dB en la sensibilidad de los micrófonos entre los distintos laboratorios, valor que es aún inferior a la incertidumbre estimada de 0.05 dB según la norma IEC para micrófonos LS1P [6]. Los resultados de esta comparación fueron aprobados para su vinculación a la comparación clave internacional CCAUV.A-K1, junto con las regionales de Europa y Asia Pacífico, EUROMET.AUV.A-K1 y APMP.AUV.A-K1 respectivamente.

2.2.2 Aceleración lineal

El patrón nacional de aceleración lineal tiene un valor definido por la sensibilidad promedio de un acelerómetro patrón con cristales piezoeléctricos de cuarzo de alta estabilidad cuando se aplica un movimiento armónico simple con frecuencia y nivel de aceleración determinados por el método absoluto de interferometría láser.



La medición de la aceleración alterna, que es una magnitud derivada del SI, trazable a las magnitudes de base de tiempo y longitud, se realiza con un interferómetro láser tipo Michelson de plano vertical [7].

Figura 4. Montaje interferométrico de plano vertical y líneas de interferencia

En la Figura 5 se da la carta de trazabilidad en aceleración, u_c : incertidumbre combinada expandida con $k = 2$.

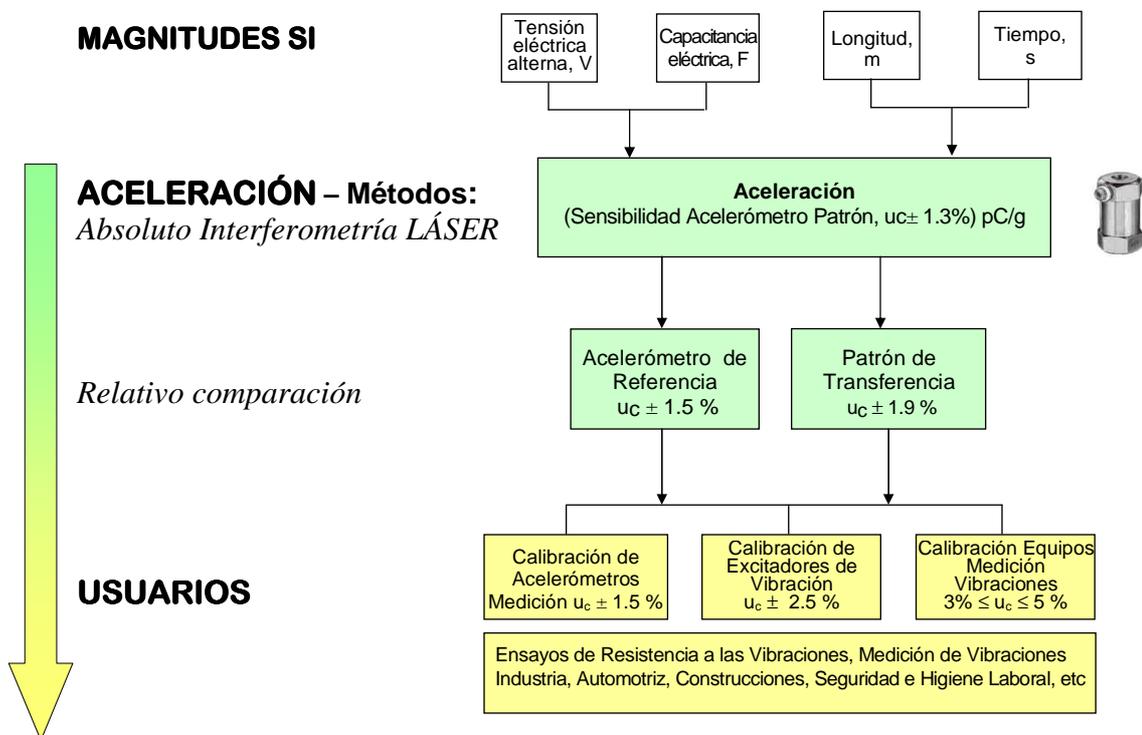
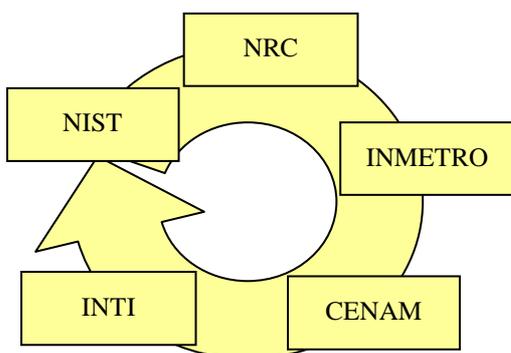


Figura 5. Carta de trazabilidad en aceleración vibratoria

Comparación SIM-AUV-VK1



La primera comparación internacional en aceleración en el continente americano (Tabla1), piloteada por el NIST-EEUU, se efectuó siguiendo un esquema circular entre los 5 Institutos que se indican en la Figura 6. Todos los participantes obtuvieron resultados dentro de $\pm 1\%$ en el rango de frecuencias analizado (50 Hz a 5000 Hz) para los acelerómetros “double ended”. Para los “single ended” todos los laboratorios estuvieron dentro de los límites normalizados hasta una frecuencia de 1 kHz. [8].

Figura 6. Participantes 1º comparación internacional SIM en aceleración

En la actualidad se encuentra en la etapa de revisión final el Informe (Draft B) preparado por el NIST para la equivalencia con el CCAUV [9].

2.2.3. Potencia Sonora

El patrón nacional de potencia sonora se materializa mediante una *Fuente Sonora de Referencia*, FSR, de tipo aerodinámico altamente estable en el tiempo, cuyo nivel de potencia sonora, $L_{w, re\ 1pW}$, se determina según la norma ISO 6926.

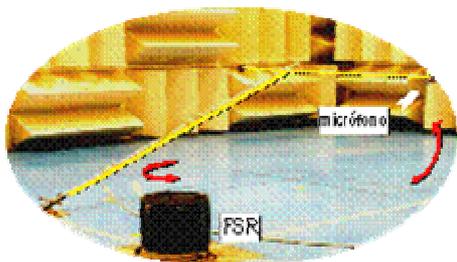


Figura 7a. Calibración de la FSR, B&K 4204, cámara semianecoica del INTI (método espiral)

En la Figura 7a. (izquierda) se observa la ubicación de la Fuente Sonora de Referencia, FSR, B&K tipo 4204 en la cámara semianecoica del Laboratorio de Acústica del INTI (frecuencia de corte inferior 75 Hz). Para la medición de potencia sonora se siguen los lineamientos de la norma ISO 6926, y se han investigado hasta el presente distintos métodos de medición de SPL efectuando barridos automáticos y posiciones fijas alrededor de la fuente.

Se comprobó que la repetibilidad del método de camino espiral sobre una semiesfera centrada alrededor de la fuente es equivalente al de arcos meridionales desplazados en 120° , debido a la simetría axial de la fuente, aunque el primero es más preciso para los emisores que poseen características direccionales asimétricas en el plano x-y. La medición de la FSR se efectúa por el método espiral sobre una semiesfera de 2 m de radio.

Los ángulos polares desde el plano horizontal hasta la dirección vertical se cubren mediante un dispositivo que desplaza el micrófono en un cuarto de círculo. La proyección vertical de la velocidad del micrófono es constante, y los ángulos de azimut se cubren mediante la rotación de la fuente con velocidad uniforme, resultando constante el área cubierta por unidad de tiempo debido a esta combinación de movimientos.



En la Figura 7b (izquierda) se observa el brazo móvil que desplaza el micrófono y la FSR apoyada sobre una plataforma rotatoria..

Figura 7b. Vista de FSR y brazo móvil.

En el año 2000 se efectuó la calibración de la FSR, B&K 4204 del INTI en el PTB-Alemania, determinándose el $L_{w, re\ 1pW}$ en bandas de 1/3 de octavas entre 100 Hz y 12500 Hz mediante el método espiral. Los resultados fueron concordantes en ambos casos, ubicados dentro de la franja de incertidumbre dada por el PTB, u_c de ± 0.6 dB en todo el rango de frecuencias, excepto en las bandas de inferiores a 160 Hz donde $u_c \pm 1.2$ dB.

3 Diseminación de la exactitud a diferentes tipos de usuarios

En el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del INTI se brinda trazabilidad a usuarios de mediciones, ensayos y calibraciones, provenientes de innumerables sectores de la industria, comercio y servicios vinculados a la protección del medio ambiente, salud e higiene y seguridad ocupacional. También se efectúan trabajos de investigación aplicada, orientados principalmente al estudio e implementación de métodos ingenieriles de medición, y asistencia técnica para la mejora de la calidad acústica de los productos y de las condiciones del habitat en el plano laboral y social.

Para los ensayos en laboratorio, se cuenta con instalaciones normalizadas que permiten abarcar una diversidad muy amplia de aplicaciones como los aparatos de uso doméstico, equipos industriales, sistemas constructivos, protectores auditivos, etc. En la Figura 8, se observan instalaciones del Laboratorio de Acústica.



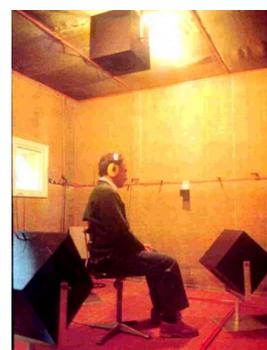
Cámara Semianecoica

ISO 3745, $f_c = 75$ Hz,
Planta ext: ≈ 10 m x 13 m, h = 7.3 m



Cámara Reverberante

$V = 210$ m³, ISO 3741/2/3, IRAM 4112/3,
ISO 354, IRAM 4075



Cámara Silente

ISO 4869.1/3, IRAM 4060 -1/3
Medición Protectores Auditivos

Figura 8. Cámaras de ensayos acústicos en el INTI



Seguidamente se proporcionan ejemplos de ensayos brindados a diversos tipos de usuarios.

En la Figura 9 se observa la medición del Nivel de Potencia Sonora de una enfriadora exhibidora vertical, de acuerdo con el método IRAM 4112 (eq. ISO 3741). Las mediciones se efectúan en forma directa o por comparación, obteniéndose el promedio espacial por barrido continuo. Se observa el brazo rotatorio de micrófono y la fuente sonora de referencia.

Figura 9. Medición de L_w en cámara reverberante



Figura 10. Medición de L_w en cámara semianecoica de una cortadora de césped según ISO 3475, método espiral. [10]

Figura 11. Ensayo de emisión de ruido de vehículos automotores según Decreto 779/95, por el método dinámico (norma IRAM 9C), en la pista de pruebas normalizada del INTI.



Figura 12. Medición de vibraciones, asistencia técnica al desarrollo de neumáticos



Figura 13. Medición de vibraciones en la construcción



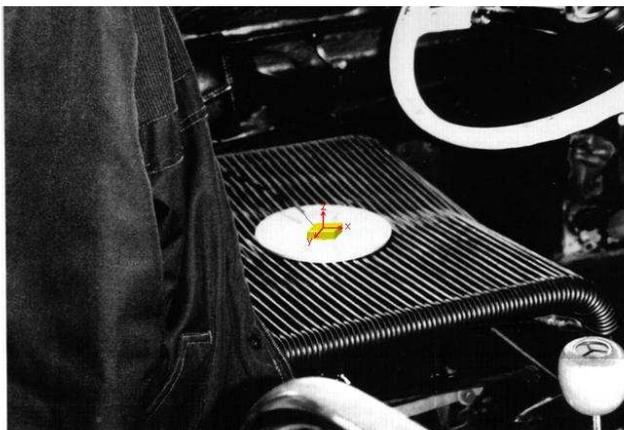


Figura 14. Medición de vibraciones humanas en vehículos y maquinaria autopropulsada (agrícola, vial, para la construcción, etc),

El presente trabajo ha mostrado un panorama sucinto de la trazabilidad en Acústica y Vibraciones desde la cima de la pirámide metrológica en el INTI como el NMI de la Argentina, hasta la diseminación de la exactitud a usuarios muy diversos a través de ejemplos de aplicaciones concretas. En la medida en que la relación entre el INTI y los usuarios sea más cercana y se transfieran conocimientos y experiencia, podrán obtenerse mayores beneficios mutuos que permitan acrecentar la confiabilidad y coherencia en las mediciones, lo que en definitiva apuntará a mejorar la calidad de vida del hombre en su medio ambiente.

Referencias

- [1] Kind, Dieter, Lübbig, Heinz (2003) "Metrology-the present meaning of a historical term", *Metrologia* 40, 255-257.
- [2] BIPM (Buró Internacional de Pesas y Medidas) "Capacidades de calibración y medición de los Institutos Nacionales de Metrología (Apéndice C).
- [3] Echeverría Villagómez, S., Valdés, J. (2001) "El CCAUV del CIPM: Impacto industrial de la equivalencia internacional en mediciones de Acústica, Ultrasonido y Vibraciones, Simposio Nacional de Metrología, Querétaro, México.
- [4] Taibo, L., Riganti, J. (1992) "National System of Acoustical Metrology: its Role within MERCOSUR", *Proceedings IV International Seminar on Noise Control*, Río de Janeiro, Brasil.
- [5] Taibo, L. "Metrología en Acústica y Vibraciones en el INTI" (1996), "Metrologia em Acústica e Vibrações no Âmbito das Américas", I Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações, INMETRO/SOBRAC, Petrópolis, Brasil.
- [6] Wong, G., Wu, L. (2007) "SIM.AUV.AK-1 LSIP Microphone Inter-Laboratory Comparison", Final Report, NRC.
- [7] Taibo, L et al.: *Implementación de Técnica Interferométrica para Calibración de Acelerómetros*, 2º Jornadas de Desarrollo e Investigación INTI, Buenos Aires 1998. Posteriormente publicado en la revista *Industria y Desarrollo*, Año 2, N° 5, Mayo 1999,.
- [8] Taibo, L., Barceló, L. (2002) "El INTI en la primera comparación interamericana en aceleración en el marco del SIM", *Memorias 4º Jornadas de Desarrollo e Innovación, INTI*.
- [9] Evans, D.J. et al (2007) "Report on Acceleration Comparison SIM.AUV.VK-1", Draft B, NIST.
- [10] Taibo L. et al., "Sound power measurement standards at laboratory and field environments", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 112, No. 5, Pt 2, noviembre 2002.