

El CCAUV del CIPM: Impacto industrial de la equivalencia internacional en mediciones de Acústica, Ultrasonido y Vibraciones

Salvador Echeverría Villagómez¹ & Joaquín Valdés²

¹ Miembro del CCAUV, Centro Nacional de Metrología e Instituto Tecnológico de Celaya, México
Tel: + 52 (4) 2110550; Fax: + 52 (4) 211 0553; e-mail: saleche@cenam.mx

² Presidente del CCAUV y Miembro del CIPM, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina
Tel: + 54 (11) 4314 0882; Fax: + 54 (11) 4313 2130; e-mail: iovaldes@inti.gov.ar

Resumen

En 1999 el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) determinó la creación del Comité Consultivo de Acústica, Ultrasonido y Vibraciones (CCAUV), con base en un estudio realizado en 1997 y 1998 a iniciativa del propio CIPM. En la primera reunión del Comité se definieron 5 Comparaciones Clave, las que se están llevando a cabo en el periodo 2000-2001, y establecerán los niveles de equivalencia internacional en el área de Acústica, Ultrasonido y Vibraciones (AUV), entre los laboratorios nacionales participantes. Esta definición de los niveles de equivalencia internacional significará un paso fundamental para dar un nuevo y más sólido sustento a las rutas de trazabilidad nacional en los países participantes en las comparaciones clave organizadas por el CIPM, y en los que queden ligados a ellas vía las comparaciones suplementarias a nivel de organizaciones regionales participantes (actualmente SIM, EUROMET y APMP). Entre los múltiples usuarios que se verán beneficiados están aquellos pertenecientes a los sectores industrial y de servicios. Dentro del sector industrial, uno de los subsectores en los que se tendrá mayor impacto será el automotriz y, en general, el metal-mecánico. El artículo mostrará la base de las comparaciones clave, su interconexión con las comparaciones regionales, y algunas implicaciones del reconocimiento de patrones y certificados de calibración y medición de los Institutos Nacionales de Metrología para los usuarios y la industria a niveles nacional e internacional.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de los gobiernos al participar en la Convención del Metro, es el de lograr consistencia y confiabilidad entre las mediciones que se realizan en sus países y las que se realizan a nivel internacional. Esto tiene actualmente importantes implicaciones para la competitividad en un ambiente caracterizado por la globalización de los mercados. Para que el trabajo científico y técnico del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) y sus Comités Consultivos (CCs) llegue a las organizaciones de un país y a sus usuarios, se precisa la acción coordinada de múltiples organizaciones, internacionales y nacionales. A nivel internacional, coordinadas por el CIPM están las Organizaciones Regionales de Metrología (ORMs), que permiten vincular a un número mayor de países, así como abordar proyectos de interés regional.

En todo este esquema, son normalmente los laboratorios o Institutos Nacionales de Metrología (INMs) de los países las entidades en las que se genera y avanza el conocimiento, tanto básico como aplicado, en materia de mediciones.

En el ámbito de cada país, es también normalmente responsabilidad de los INMs el proveer las

referencias o Patrones Nacionales de Medición (PNM) validadas internacionalmente para sus propios Sistemas Metrológicos Nacionales. La función coordinada y sinérgica de los INMs y las entidades complementarias de acreditación y normalización permiten transferir la exactitud y confiabilidad de los patrones nacionales, vía los laboratorios metrológicos acreditados, a los usuarios en la industria, el comercio y los servicios. Sin un beneficio final para estos usuarios, la acción de todas las organizaciones involucradas sería muy cuestionable.

La reciente creación del Comité Consultivo de Acústica, Ultrasonido y Vibraciones (CCAUV) del CIPM ofrece una oportunidad sin precedente para estructurar y optimizar, con una perspectiva global, pero con acciones locales y regionales, el trabajo que venían desarrollando los INMs en AUV, para beneficio de los sectores usuarios.

El presente trabajo resume avances logrados recientemente en la organización internacional en este campo y comenta algunas de sus implicaciones en dos ámbitos específicos: la metrología básica y las aplicaciones en la industria y los servicios.

ACÚSTICA, ULTRASONIDO Y VIBRACIONES EN EL CIPM

La iniciativa del CIPM en septiembre de 1996 para analizar la pertinencia de crear un Comité Consultivo en Acústica, Ultrasonido y Vibraciones (CCAUV) respondió a la creciente necesidad de establecer consistencia y equivalencia mundial de mediciones en estos campos. Esta necesidad se corrobora en el documento *National and international needs relating to metrology* [1], emitido por el propio CIPM en 1998, que en lo que toca a AUV se apoya en los resultados del estudio conducido por A. Wallard [2] en 1997.

En la primera reunión del Grupo de Trabajo de AUV (National Physical Laboratory, Inglaterra, marzo 1998) estuvieron 22 participantes de 16 países signatarios de la *Convención del Metro*. En esta reunión se evidenció que las distintas regiones metrológicas participantes ya registraban avances importantes en comparaciones regionales de Acústica y Vibraciones. El pleno del grupo avaló la recomendación para la creación del CCAUV [3], el cual realizaría las funciones propias de los CCs para el campo AUV. En la misma reunión, se definieron las comparaciones clave (KC) a ser realizadas en el periodo 1999-2001, conforme a la Guía emitida por el BIPM para este fin.

Tabla 1. Comparaciones Clave (KC) del CCAUV

Clave CCAUV	Descripción	Alcance	Periodo Laboratorio piloto
A-K1	Presión acústica en aire	63 Hz - 8kHz	Mar 99- Mar 01 NPL, Inglaterra
V-K1	Aceleración en vibración	40 Hz- 5 kHz	Jan 00- Jun 01 PTB, Alemania
U-K1	Potencia ultrasónica	10 – 100 Mw 2, 6, 10 MHz	Jul 99- Ago 01 PTB, Alemania
U-K2	Presión ultrasónica en agua	1, 2, 5,10, 15 MHz	Jan 00- Jun 01 NPL, Inglaterra
W-K1	Presión acústica en agua	1 – 315 kHz	Jan 00- NPL, Inglaterra

En septiembre de 1998 el CIPM aprobó la creación del CCAUV y éste sostuvo su 1ª Reunión en el BIPM en julio de 1999, en la cual se presentaron los protocolos para las comparaciones clave y los avances en la organización de las mismas por los laboratorios piloto [4], así como los avances en la

realización e informes de las comparaciones regionales de Europa, Asia y América. La 2ª Reunión del CCAUV se llevará a cabo en octubre de 2001 y para entonces se presentarán los resultados, al menos, de dos de las comparaciones clave terminadas, *i.e.* A-K1 y V-K1.

El Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MRA) de patrones nacionales de medición y certificados de calibración y medición emitidos por NMIs [5], promovido por el CIPM-BIPM, fue suscrito por 38 países miembros de la CGPM y 2 organizaciones internacionales en la 21ª Conferencia General de Pesas y Medidas en París, 14 octubre 1999.

El soporte técnico del MRA esta contenido en sus apéndices, principalmente:

- Apéndice B: Lista de resultados de las comparaciones clave y suplementarias del CIPM y las ORM, por cada área de trabajo de los CCs.
- Apéndice C: Lista de magnitudes, alcances e incertidumbres para las cuales son reconocidos los Certificados de Medición y Calibración (CMCs) de los INMs de los países signatarios del MRA.

Estos apéndices están ahora en proceso de construcción y pueden ser consultados en la Base de Datos del BIPM [6].

AUV EN EL SISTEMA INTERAMERICANO DE METROLOGÍA

En el campo de AUV ya han existido actividades en el NIST-EEUU y en el NRC-Canadá desde sus inicios. Estos institutos han realizado aportaciones importantes a la comunidad internacional en el área. Como ejemplo, el método actual para calibraciones primarias en acústica por reciprocidad fue propuesto por R. K. Cook en el *National Bureau of Standards* (NBS, antecesor del NIST) en 1940 [7]. Otros laboratorios de posterior creación, como el INMETRO-Brasil y el INTI-Argentina, también han dedicado áreas específicas para AUV y mantienen una actividad constante en el campo. En la generación más reciente de nuevos laboratorios, el CENAM-México, ha establecido laboratorios y un grupo de trabajo en AUV que ya se perfila como uno de los actores significativos en el panorama regional para los próximos años [8].

Los 5 INMs mencionados llevan a cabo la actividad en metrología primaria de AUV en el Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y ofrecen trazabilidad a otros que la requieren. De estos NMIs, NRC-Canadá, NIST-EEUU y CENAM-México, forman parte del CCAUV. Los mismos 3 NMIs participan en las comparaciones A-K1 y V-K1 y con ello establecen el vínculo entre el CCAUV y el SIM. En las comparaciones de ultrasonido y acústica bajo el agua, U-K1, U-K2 y W-K1, solamente el NIST-EEUU dispone de facilidades en el ámbito del SIM.

A nivel regional, las primeras comparaciones internacionales en Acústica y Vibraciones entre los 3 países de Norte América (NORAMET) fueron promovidas por el CENAM en 1995-1996, y después se extendieron para todo el SIM, incluyendo a INTI-Argentina e INMETRO-Brasil. NRC y NIST aceptaron ser los laboratorios piloto, respectivamente para Acústica y Vibraciones. La siguiente tabla muestra las comparaciones regionales que se han completado a la fecha.

Tabla 2. Comparaciones Clave (KC) en el SIM

Clave SIM	Descripción	Alcance	Periodo Laboratorio piloto
AUV. A-K1	Presión Acústica en aire	125 Hz - 8kHz	1997-2000 NRC, Canadá
AUV. A-K2	Presión Acústica en aire	63 Hz- 8 kHz	1998-2000 DTU, Dinamarca
AUV. V-K1	Aceleración en vibración	50 Hz- 5 kHz	1997-1999 NIST, EEUU

Como se ha mencionado, además de las comparaciones clave y suplementarias (Apéndice B, MRA), otro elemento importante de soporte técnico para el Acuerdo es la lista de magnitudes, alcances e incertidumbres para las cuales son reconocidos los Certificados de Medición y Calibración (CMCs) por los INMs de los países signatarios (Apéndice C). Para el área de AUV, la lista se encuentra actualmente en revisión por los 5 países participantes del SIM. En el primer semestre de 2001 será entregada para su revisión al Comité Conjunto de Organizaciones Regionales y BIPM (JCRB). Para la reunión del CCAUV en octubre 2001 se contará con el documento completo y su análisis seguramente será uno de los puntos de la agenda. Una vez realizada la revisión y validación, el Apéndice C del

MRA conteniendo los servicios de calibración y medición reconocidos de cada NMI, será publicado en la base de datos del BIPM para uso y soporte de todos los usuarios a nivel internacional.

Otras actividades de AUV que se planea realizar en el corto plazo dentro de la región son comparaciones suplementarias en potencia acústica y en vibraciones de alta frecuencia. De la misma manera, se están abordando proyectos conjuntos de metrología básica para reducir incertidumbres en los patrones primarios y proyectos de desarrollo para uniformizar métodos de transferencia hacia patrones de referencia de laboratorios secundarios.

PATRONES NACIONALES Y DISEMINACIÓN DE LA EXACTITUD EN AUV

Los patrones e instrumentos de medición en los campos de Acústica, Ultrasonido y Vibraciones tienen, en general, rutas de trazabilidad muy cortas, con sólo de 3 a 5 eslabones debido a lo especializado de la instrumentación requerida para la medición y a los limitados intervalos de incertidumbre existentes entre patrones e instrumentos de campo — ver Figuras 1 y 2, donde u : incertidumbre con $k=2$.

Figura 1: Carta de trazabilidad típica en Acústica

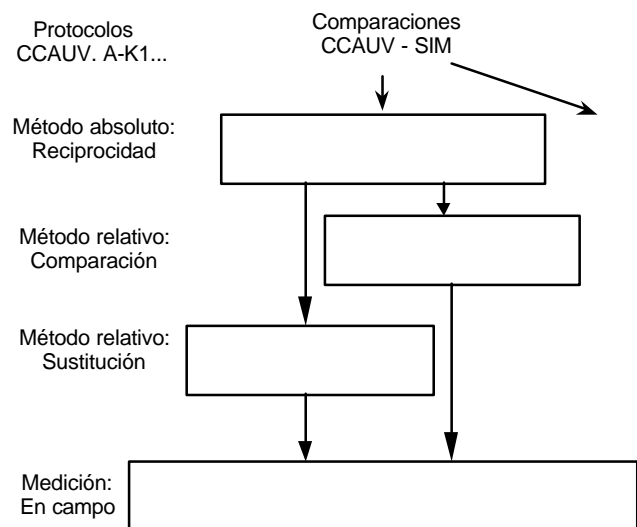
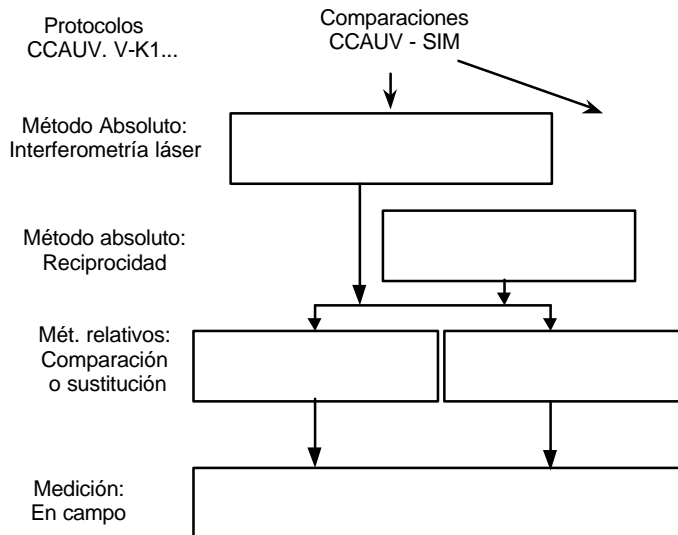


Figura 2: Carta de trazabilidad típica en Vibraciones



Lo anterior se debe a que, aún cuando existen numerosos principios físicos de operación que teóricamente serían aplicables para transductores, en la práctica sólo unos cuantos resultan ser viables para fabricarlos con las características metrológicas de precisión, sensibilidad, linealidad y estabilidad requeridas para mediciones de cierta exactitud.

En la actualidad los transductores que dominan las mediciones de precisión en acústica son los micrófonos de condensador, y las mediciones de precisión en vibraciones, son los acelerómetros piezoeléctricos. La exploración de nuevos principios de operación y materiales para la fabricación de transductores con las características metrológicas adecuadas es una de las áreas de mayor oportunidad para la investigación y el desarrollo próximo del campo de AUV.

AUV EN LOS SECTORES USUARIOS

Los segmentos de la sociedad que directamente son usuarios de las mediciones en Acústica, Ultrasonido y Vibraciones son innumerables, pero en una simplificación pueden ser clasificados en los sectores de la industria, el comercio y los servicios, incluyendo en esta categoría prominentemente los de salud, de seguridad y de protección ambiental.

Tabla 3. Sectores usuarios de mediciones en AUV y áreas de aplicación

Sector	Aplicaciones (ejemplos)
Industria	
Acústica	<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad: niveles de ruido y vibración permisibles sin causar daño • Diseño acústico de recintos; diseño y fabricación de equipos de audio
Ultrasonido	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento preventivo y predictivo
Vibraciones	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño y fabricación de artefactos y vehículos con mínima vibración y ruido • Monitoreo de maquinaria para mantenimiento preventivo y predictivo
Comercio	
Acústica	<ul style="list-style-type: none"> • Máxima calidad en equipos de audio y sonido, comunicaciones, etc.
Vibraciones	<ul style="list-style-type: none"> • Criterio de calidad: mínima vibración y ruido emitido por artefactos
Servicios	
Acústica	<ul style="list-style-type: none"> • Sonorización con calidad acústica • Evaluación de niveles de ruido en ambientes, laboral, residencial, etc.
Ultrasonido	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de ultrasonido médico para diagnóstico • Uso de ultrasonido para terapia • Pruebas no destructivas en elementos, e.g. piezas de fundición. • Sondeo marítimo con sonar
Vibraciones	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo de actividad sísmica • Múltiples servicios de cribado, separación, compactación, etc.

La tabla mostrada solamente incluye ejemplos y no es, de ninguna manera, exhaustiva. Su objetivo es ilustrar la amplia variedad de aplicaciones que tienen las mediciones en AUV y dar una idea del impacto que puede tener el lograr asegurar las mediciones a escala internacional en estos campos en la industria, el comercio, la salud, etc.

Ejemplo: sector automotriz

Tomando como ejemplo sólo un renglón de la tabla, se podría intentar una estimación del impacto de la consistencia y confiabilidad de mediciones de AUV en la industria automotriz de los países de América. Es preciso primero considerar que, en el ambiente competitivo actual, los niveles de ruido y vibración de un vehículo tienen serias implicaciones industriales y comerciales porque están asociados, entre otros factores, con:

- La calidad objetiva del vehículo, exactitud en su fabricación, funcionalidad y robustez
- Los criterios de comodidad del consumidor, minimización de las molestias por ruido y vibración
- La apreciación subjetiva de calidad por el cliente.

Estos criterios que son determinantes para los fabricantes de automóviles, se extienden, por encadenamiento natural, a toda la industria de autopartes. Aquí se pone en evidencia el carácter multidisciplinario de la metrología. Por ejemplo, la calidad acústica del vehículo está íntimamente ligada a cuestiones de metrología dimensional y superficial. Al reducir la variación dimensional total aceptada en el diseño del vehículo ensamblado, los paneles y ventanas encajan mejor en las correspondientes aberturas, lo mismo sucede con las partes interiores, el vehículo terminado tendrá menor vibración, brindará una sensación sustancial de mayor solidez y finalmente una marcha más tranquila debido al menor ruido que ingresa a la cabina proveniente del viento y del rozamiento con el suelo. Un detallado estudio de impacto económico por reducir la variación dimensional en los automóviles por debajo de los 2.0 mm muestra cifras multimillonarias de beneficio [9].

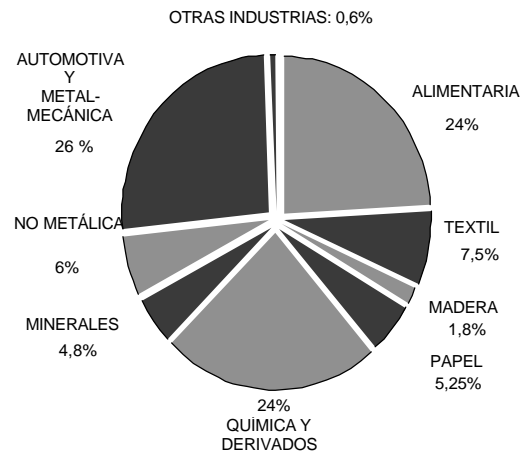
Por otro lado, la incorporación masiva de nanosensores en esta década habrá de producir un impacto comparable al de los microprocesadores en los años 80 y los láseres en los 90. La industria automotriz será una de las primeras en adoptar las nuevas tecnologías de sensores, traduciendo en

mediciones todo tipo de efectos, desde las emisiones hasta la predicción de la inminencia del choque. Un buen ejemplo se encuentra en los acelerómetros que determinan la funcionalidad de los *airbags*. Estos sensores, anteriormente de elevado costo, ya se pueden incorporar dentro de un único chip a un precio que no supera los USD \$ 2.50, y no son solamente mucho más económicos, si no también más inteligentes y más confiables [10].

Para ofrecer una apreciación de la importancia de la industria automotriz en México, es preciso notar los siguientes puntos:

- Esta industria es, con la química y las telecomunicaciones, vanguardia en el desarrollo industrial nacional.
- Del 20% que contribuyen las manufacturas al PIB nacional, la metalmecánica es el 30% y, de ésta, la automotriz aporta el 85% [11].

Figura 3. Contribución de la industria metalmecánica y automotriz al PIB nacional en manufacturas.



Beneficios del CCAUV y del MRA

En la actualidad, con el CCAUV, las comparaciones clave del CIPM y del SIM, el MRA y el catálogo de capacidades de medición y calibración en proceso de aprobación, muchas empresas de todos los ámbitos ya están beneficiándose del reconocimiento mutuo de patrones y certificados de calibración. Esto ha permitido a las cadenas productivas transnacionales y a los proveedores locales operar de manera mucho más eficiente, midiendo con trazabilidad al NMI de cada país, debido a:

- Incremento en la confiabilidad y consistencia en las mediciones
- Reducción de tiempos y costos para mantenimiento de los sistemas de medición
- Mayor disponibilidad de conocimiento y experiencia de los expertos del NMI, vinculados internacionalmente

Retos de la medición industrial

Existen, no obstante, algunos aspectos importantes de la medición de AUV que plantean grandes retos en el sector industrial de vanguardia, estos son:

- Los requerimientos industriales implican, en ocasiones, mediciones con una incertidumbre del mismo orden de magnitud que la de los patrones nacionales.
- Los requerimientos y condiciones de medición son, muchas veces, diversos a los encontrados en el laboratorio, e.g. medición puntual vs superficial; medición uniaxial vs multiaxial, etc.

Estos aspectos son determinantes para indicar, a los NMIs como el CENAM o el INTI, y al mismo CCAUV, posibles líneas de investigación para el avance del conocimiento en la metrología básica y aplicada de AUV.

ALGUNOS RETOS EN METROLOGÍA DE AUV PARA EL FUTURO PRÓXIMO

En esta sección sólo se comentan aspectos generales de algunos de los retos que afronta el campo A y V en dos ámbitos de su acción: metrología básica y metrología aplicada. En lo que toca a estudios completos de estado del arte en AUV, se cuenta con la reciente publicación, a instancias del CCAUV, de una edición especial de Metrología [12].

Metrología básica

Vibraciones

La medición de vibración involucra idealmente la posibilidad de medir movimiento en las 6 coordenadas posibles, 3 lineales y 3 rotacionales, más impacto o picos de aceleración. Los transductores, métodos y sistemas más avanzados para lograrlo son reportados por H-J. v. Martens [13]. En lo que toca a aceleración lineal, el transductor aceptado metrologicamente como patrón en la actualidad es el acelerómetro piezoeléctrico, y el

método estandarizado es el de interferometría láser, ISO 5347-1, revisado en ISO 16063-11 [14]. Todos los NMIs miembros del CCAUV y algunos otros participantes en las comparaciones clave cuentan con estas capacidades de medición y calibración, pero son contados los NMIs que tienen otras capacidades, destacando el *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*.

Otros transductores o medidores de vibración, de gran relevancia son los velocímetros láser, para vibración lineal, los codificadores ópticos rotatorios, para vibración torsional y los vibrómetros láser de moteado, para vibración de superficies. Los transductores optoelectrónicos y los métodos ópticos de medición cobran cada vez mayor importancia y merecen líneas de investigación dedicadas a ellos.

Acústica

Las mediciones en acústica están enfocadas a varios parámetros, siendo el principal el Nivel de Presión Acústica (NPA), y otros la potencia e intensidad acústicas. La dificultad en las mediciones acústicas es que el parámetro de interés es una fluctuación pequeña y rápida en un gas. Para aspectos de audición, se trata de variaciones en frecuencias que van de 20 Hz a 15 kHz, con presiones tan pequeñas como 20 μ Pa, en el umbral de audición, y 10^{12} veces mayores en el umbral de dolor. Una revisión de los tipos de medición existentes en acústica, la instrumentación relacionada y su desarrollo histórico está dada por D. Jarvis [15].

El transductor aceptado metrologicamente como patrón es el micrófono de condensador, IEC Standard 61094-1 [16], y el método primario más ampliamente usado es el de calibración en presión por reciprocidad, IEC Standard 61094-2 [16]. Este método tiene limitaciones en frecuencia debidas a la relación entre el tamaño del *acople* y la longitud de onda de la señal acústica. Otro método es el de calibración en campo libre por reciprocidad, IEC Standard 61094-2 [16], pero éste tiene implicaciones prácticas debido a que la presencia del transductor modifica el campo acústico a ser medido.

Pocos NMIs cuentan con facilidades para calibración en campo libre. En los últimos años ha sido cuestionada la necesidad de ambientes acústicos controlados (anecóico, semianecóico o reberverante) para la medición, dado que las nuevas técnicas de procesamiento rápido en electrónica pueden, hasta cierto grado, eliminar o controlar reflexiones. La opinión de los expertos, sin embargo, se inclina por los ambientes controlados; un aspecto a considerar es que las técnicas electrónicas para eliminar o controlar reflexiones no han sido estandarizadas.

Algunas líneas de investigación prometedoras son:

- Nuevos transductores
- Métodos de medición
- Técnicas electrónicas de control
- Procedimientos y sistemas de medición
- Análisis espectral para la correcta estimación de la incertidumbre (e.g. varianza de Alan)

Metrología aplicada

A nivel de las aplicaciones, que finalmente determinan los requerimientos de medición, las exigencias son cada vez mayores. Algunas de las demandas de los usuarios para medir AUV, que a su vez sugieren líneas de investigación son:

- Transductores o medidores no intrusivos (e.g. optoelectrónicos)
- Nuevos materiales para transductores (e.g. fibras ópticas, materiales cerámicos)
- Métodos de medición (e.g. exploración de nuevos principios de medición)
- Procedimientos y sistemas de medición (mejoramiento tecnológico de los sistemas)
- Medición simultánea de varias variables (e.g. vibración en varios ejes)
- Medición no puntual, sino de campo (e.g. interferometría de moteado para superficies)
- Ampliación de alcances a muy altas y muy bajas frecuencias
- Sistemas de medición robustos y ligeros para trabajo *in situ*
- Nanosensores

Algunas de las líneas mencionadas ya tienen avances logrados, otras no, y están siendo propuestas de manera exploratoria, pero se cuenta con elementos para considerarlas prometedoras.

CONCLUSIONES

El artículo ha mostrado un panorama general de cómo se relaciona el trabajo del CCAUV y de los NMIs participantes con los usuarios. Se considera que en la medida en que estos estén más enterados de las funciones y actividades del CCAUV y, recíprocamente, los NMIs estén más cerca de los usuarios, la colaboración será más fructífera y los beneficios mutuos mayores. Los retos percibidos y las posibles líneas de investigación mencionadas dan una idea de los problemas de medición que se podrían abordar conjuntamente entre NMI y usuarios, para avanzar el campo de la metrología en AUV.

REFERENCIAS

- [1] BIPM Report, National and international needs relating to metrology, Bureau International des Poids et Mesures, 1998.
- [2] Wallard, A., Possible Initiatives and activities in acoustics and vibration, Report to the CIPM, 1997.
- [3] Wallard, A., Allisy-Roberts, P., AUV Working Group, Recommendations of the AVG to the CIPM, NPL, 1998.
- [4] BIPM, Report of the 1st Session of the CCAUV, Bureau International des Poids et Mesures 1999.
- [5] CIPM, Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes, Comité international des poids et mesures, 1999.
- [6] BIPM, Key Comparisons Database of the CCs, http://www.bipm.fr/enus/8_Key_Coparisons
- [7] Cook, R. K., Absolute pressure calibration of microphones, Journal of Research, National Bureau of Standards, 1940, **25**, 489-505.
- [8] Lista de publicaciones del Grupo de AUV, CENAM, Base de Datos del BIPM, http://www.bipm.fr/enus/6_Publications, 2000.
- [9] NIST – Advanced Technology Program Case Study: The development of advanced technologies and systems for controlling dimensional variation in automobile body manufacturing. <http://www.atp.nist.gov/ea0/qcr-709.htm>
- [10] Ottilia Saxl. Opportunities for industry in the application of nanotechnology. The Institute of Nanotechnology. 07/12/00. <http://www.nano.org.uk/industry6.htm>
- [11] INEGI, Sensores Económicos, México, 1999.
- [12] Martin P.W., v. Martens H.J., Wong G.S.K., Preston R.C. and Van Buren A.L. editors, Special issue on airborne acoustics, vibration and shock, ultrasound and underwater acoustics, *Metrologia* 1999, **36-4**
- [13] v. Martens H.J., Current state and trends of ensuring traceability for vibration and shock measurements, *Metrologia* 1999, **36-4**, 357-373.
- [14] International Standard ISO 5347-1, *Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups, Part 1: Primary vibration calibration by laser interferometry*, Geneva, 1993; rev. ed. ISO 16063-11, 1999.
- [15] Jarvis D, Sound measurements, *Metrologia* 1999, **36-4**, 249-255.
- [16] IEC Standard 61094-1, *Measurement Microphones- Part 1, Specifications for Laboratory Standard Microphones; Part 2, Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique (1992); Part 3, Primary Method for Free-field Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique (1995)*, International Electrotechnical Commission, Geneva.