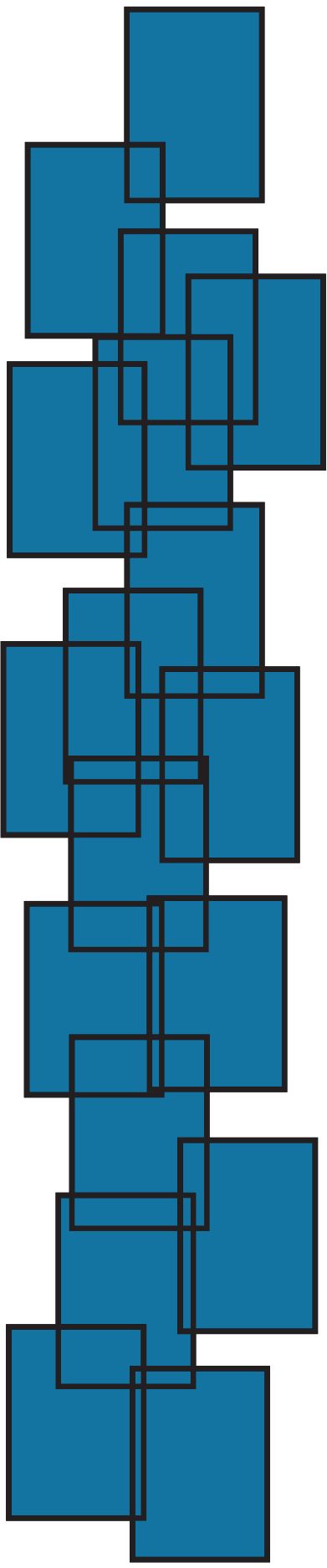
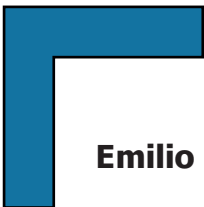


NANOMETROLOGÍA





Emilio Prieto



Lugar y fecha de nacimiento: Madrid (España), 3 de Septiembre de 1956.

Formación: Ingeniero del ICAI en 1981. Ing. Industrial por la Univ. Politécnica de Madrid en 1982 (Reválida). Doctorado (Física Aplicada a la Ingeniería) en la misma universidad. Diploma de Estudios Avanzados en 2003. Tesis sobre "Desarrollo de Comparador Interferométrico Universal para la calibración de patrones materializados de longitud".

Carrera Profesional: En 1982 ingresa en la Comisión Nacional de Metrología y Metrología. De 1987 a 1994 es responsable del Laboratorio de Metrología Dimensional de la CNMM. Desde 1994 es Jefe del Área de Longitud del Centro Español de Metrología.

Experto en metrología de longitudes, técnicas de medida y estimación de incertidumbres, es miembro del Comité Consultivo de Longitud (CCL) y del de Unidades (CCU), del Comité Internacional de Pesas y Medidas, persona de contacto sobre Longitud en EURAMET, organización que engloba a los Institutos Nacionales de Metrología europeos, y representante de España ante IMEKO, International Measurement Confederation.

Miembro de la International Society for Optical Engineering (SPIE), de la Red NanoSpain, de los Comités de Metrología Dimensional de ENAC y CTN82 de AENOR y Presidente del grupo AENOR GET15 sobre normalización en Nanotecnologías.

1. Introducción

La determinación cuantitativa de propiedades de micro y nanoestructuras es esencial en la I+D y un requisito previo para el aseguramiento de la calidad y el control de procesos industriales. El conocimiento de las dimensiones geométricas de las estructuras es la base a la que están ligadas otras propiedades físicas y químicas. La medición cuantitativa presupone contar con instrumentos de medida exactos y fiables, trazados a patrones de nivel metrológico superior, junto con patrones de calibración y procedimientos de medida ampliamente aceptados¹.

Cualquier nanosistema basado en dispositivos eléctricos, ópticos, magnéticos, mecánicos, químicos o biológicos requiere de medios metrológicos para caracterizar parámetros críticos como dimensiones, composición, rigidez, rugosidad, concentración de dopantes, coercitividad magnética y otros. Las nanoestructuras requieren un control dimensional exacto para garantizar su correcta fabricación y funcionalidad.

Los sistemas organizados requieren generalmente algún tipo de vía de comunicación entre dispositivos (hilos, guías ópticas, transmisores químicos, etc.), lo que a su vez requiere un control exhaustivo del dimensionado y posicionamiento de los conductos y las interfases. Así, un nanotubo de carbono empleado en un circuito puede generar un circuito abierto, en caso de que sea demasiado corto, o un cortocircuito en un circuito próximo, en caso de ser demasiado largo².

La nanometrología, ciencia de la medida aplicada a la nanoescala (< 100 nm) juega pues un papel esencial en la producción de nanomateriales y dispositivos nanométricos, al permitir determinar no sólo dimensiones críticas, con incertidumbres inferiores al nanómetro, sino fuerzas, masas, propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas, etc. Esta realidad ha sido reconocida por gobiernos, instituciones de investigación y el sector privado en todo el mundo. Así, la *US National Nanotechnology Initiative* ha considerado la investigación sobre instrumentación, metrología y normas dentro de sus prioridades, definiéndola como "paso crucial para la comercialización de la nanotecnología"³. También el VIII Informe Nanoforum sobre Nanometrología⁴ apunta en la misma dirección, mostrando a la nanometrología como el núcleo de la nanociencia y la nanotecnología.

La propia Comisión Europea⁵ afirma que para que la UE pueda desarrollar todo el potencial comercial de la nanotecnología, la industria y la sociedad requieren de medios de caracterización cuantitativa y técnicas de medición fiables, tal que sostengan la competitividad y la confianza en los futuros productos y servicios.

Muchos de los esfuerzos actuales en investigación no están teniendo éxito ni lo tendrán si no existen medios para trasladar estas tecnologías al plano industrial. La infraestructura petrológica necesaria en todo proceso productivo, es aún muy débil,

1 Nanoscale Metrology, Editorial, Meas. Sci. Technol. 18 (2007).

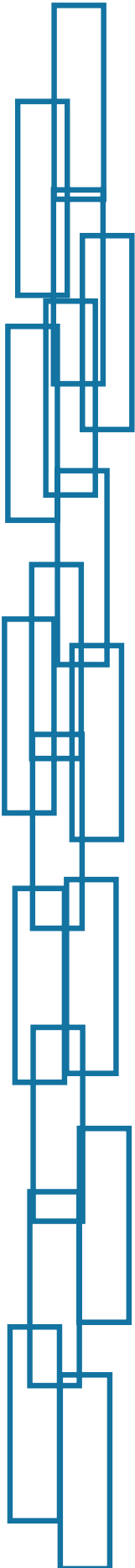
2 The critical role of metrology in nanotechnology. M.L. Schattenburg, H.I. Smith, Proc. SPIE, Vol. 4608, p. 116, Workshop on Nanostructure Science, Metrology and Technology, Gaithersburg, Maryland, 5-7 September 2001.

3 The National Nanotechnology Initiative: Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry (2006) Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, Committee on Technology, National Science and Technology Council
http://www.nano.gov/NNI_07Budget.pdf

4 Eighth Nanoforum Report on Nanometrology, Julio 2006, www.nanoforum.org

5 Towards a European Strategy for Nanotechnology (2004) European Commission, Brussels
ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nano_com_en.pdf





incluso inexistente en algunos casos, por lo que debe darse prioridad al desarrollo de la nanometrología⁶, sin la que “la revolución de la nanotecnología está muerta en el agua”⁷.

Precisamente, la nanotecnología no ha eclosionado en forma de producción industrial masiva, en gran parte debido a que no existe un desarrollo paralelo de la metrología necesaria, ni una toma de conciencia sobre la importancia de ésta por parte de los investigadores, desarrolladores de productos y financiadores de la I+D.

Todas las revoluciones industriales han requerido una infraestructura metrológica apropiada, y la nanotecnología no es una excepción a dicha regla ^[8]. Al enfrentarnos a la nanotecnología descubrimos sin embargo que la metrología existente es adecuada para el campo micro pero no para el campo nano, lo que impide pasar del centro de investigación a la producción masiva.

Por ejemplo, aunque en muchos procesos de nanofabricación se emplean microscopios electrónicos o interferómetros láser de alta resolución, se observa gran dispersión en las características de las fabricaciones, fruto de la falta de exactitud y reproducibilidad de los sistemas de medida y posicionado, y de la dificultad de contar con patrones de calibración adecuados a la nanoescala.

No es sencillo crear una infraestructura metrológica adecuada, dada la gran variedad de aplicaciones y desarrollos de la nanotecnología; sin embargo, tampoco se habían dado pasos claros en este sentido, debido a que los financiadores de los planes de I+D, incomprensiblemente, no habían detectado dicha necesidad. Solo recientemente, tras la constitución de EURAMET por parte de los Laboratorios Nacionales de Metrología europeos, la Unión Europea ha decidido financiar a través de un llamamiento específico, el EMRP (*European Metrology Research Programme*)⁹, proyectos de investigación tendentes a mejorar la infraestructura metrológica.

2. Estado del arte general

Los instrumentos y técnicas de medición empleados en la nanoescala son muchos y variados: Exploración por sonda (STM, SPM, AFM, KPM, LFM, CMM), Haz de iones (AES, IBA, SIMS), Haz electrónico (TEM, HRTEM, SEM, EELS, AES), Métodos ópticos (NSOM, Raman, DLS), Rayos X (XPS, SRD, XPS, EDX), Técnicas electro-magnéticas (SET, ELM, MFM, SCM, SKPM, C-AFM), métodos mecánicos (nanoindentación), etc.

Estos equipos deben hallarse correctamente calibrados para que puedan dar todas sus prestaciones metrológicas pero, en muchos casos, simplemente no existen patrones adecuados para calibrar los equipos, y en otros, carecen de trazabilidad o no especifican la incertidumbre asociada al parámetro que materializan. Ello hace que la comparación entre resultados y métodos resulte imposible, afectando tanto a la

6 The critical role of metrology in nanotechnology. M.L. Schattenburg, H.I. Smith, Proc. SPIE, Vol. 4608, p. 116, Workshop on Nanostructure Science, Metrology and Technology, Gaithersburg, Maryland, 5-7 September 2001.

7 Nanometrology in Nanomanufacturing, M.L. Schattenburg, NASA Tech Briefs, Nanotech 2003 Conference, Massachusetts, Oct. 23, 2003.

8 The critical role of metrology in nanotechnology. M.L. Schattenburg, H.I. Smith, Proc. SPIE, Vol. 4608, p. 116, Workshop on Nanostructure Science, Metrology and Technology, Gaithersburg, Maryland, 5-7 September 2001.

9 <http://www.emrponline.eu>

investigación, como a la producción de dispositivos nanométricos, al obtenerse una amplia dispersión de resultados y por tanto, una falta de reproducibilidad.

La dificultad de contar con patrones adecuados deriva de que su propia fabricación requiere técnicas y equipos similares a los empleados en nanofabricación, pero modificados desde el punto de vista metrológico, a fin de cancelar errores y fuentes de incertidumbre. En el caso ideal, la incertidumbre de medida de un equipo debería ser 10 veces inferior a la tolerancia permitida al mensurando pero en la nanoescala, en bastantes ocasiones, la incertidumbre es prácticamente de la misma magnitud que el propio mensurando.

La contribución a la creación de la infraestructura metrológica necesaria está siendo acometida desde hace unos pocos años por los principales Institutos Nacionales de Metrología (INM), a través de Programas de Investigación, como el *Critical Dimension and Overlay Program* del NIST, dirigido a solucionar los problemas de medida de la industria de semiconductores, apuntados en el *International Technology Roadmap for Semiconductors*, ed. 2005, o el *Nanometrology Program* del Materials Science and Engineering Laboratory (MSEL)¹⁰.

En Europa, el Reino Unido con el *Nanometrology Technology Roadmap*¹¹, apoyado desde el DTI (Department of Trade and Industry), Alemania, Italia y Suiza, con programas en los que sus Institutos Nacionales de Metrología (PTB, INRIM, METAS) juegan un papel fundamental de liderazgo, y que han permitido obtener ya desarrollos importantes, como las μ -CMM o los MAFM (AFM metrológicos)¹².

También se ha comenzado a trabajar con ahínco en el desarrollo de normas para la aplicación de métodos comunes de medición y caracterización, contribuyendo así a la obtención de resultados de medida reproducibles y comparables, algo vital para los procesos industriales¹³.

En la actualidad, tanto ISO (TC 229) como CEN (TC 352) están trabajando en la obtención de normas aplicables a las nanotecnologías. Ambos Comités están divididos en tres grupos de trabajo: el primero, dedicado a Nomenclatura y Terminología; el segundo, a Medición y Caracterización, y el tercero dedicado a Salud, Seguridad y Medio Ambiente, incluyendo Toxicología. Los trabajos desarrollados hasta el momento van encaminados a la generación de normas sobre caracterización de nanotubos de pared sencilla y múltiple, y de nanopartículas. España se ha incorporado recientemente a los trabajos de estos Comités Técnicos a través del Grupo GET 15, creado por AENOR, desde donde se contribuye, con la colaboración de expertos de la Universidad y la Empresa, a la creación de las futuras normas internacionales y europeas.

10 Nanometrology, FY 2004/2005 Projects, Clare Allocca, Stephen Freiman, Materials Science and Engineering Laboratory, Abril 2005.

11 <http://www.cemmnt.co.uk/index.php>

12 Meas. Sci. Technol. 18 (2007), págs. 319-696.

13 Industrial Nanometrology - Metrology for the next decade, E. Westkämper, M.R.H. Kraus, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Universität Stuttgart, Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart.



3. Actuaciones a desarrollar en España en el plazo 2008-2011

La infraestructura metrológica española, formada por el Centro Español de Metrología (CEM) y sus Laboratorios Asociados (CIEMAT, IFA, INTA, ISCIII, LCOE, ROA, TPYCEA) no tiene la misma capacidad, ni en medios ni en personal, que las infraestructuras existentes en países como EE.UU., Reino Unido o Alemania, desarrolladas en torno a sus respectivos Laboratorios Nacionales, NIST, NPL y PTB, creados a comienzos del siglo XX precisamente para potenciar sus respectivas industrias nacionales.

La dependencia orgánica de las distintas Instituciones también juega en contra de la facilidad de actuación, a la hora de abordar soluciones a los problemas. Sin embargo, es necesaria una reacción urgente, realizada de manera coordinada. En esta cuestión el Consejo Superior de Metrología puede jugar un papel impulsor de primer orden.

Sería deseable que el CEM y sus Laboratorios Asociados lideraran un cambio significativo de la infraestructura metrológica existente, ampliándola a la nanoescala, pero para ello se debe potenciar de manera urgente sus recursos, no solo económicos, sino principalmente humanos, a fin de formar equipos compuestos por metrologos, investigadores del mundo nano y fabricantes, que analicen las distintas problemáticas y aborden los desarrollos necesarios, como se ha hecho en otros países, tras la realización de amplias encuestas generales y sectoriales.

En definitiva, es necesario potenciar urgentemente la investigación y el desarrollo en nanometrología:

- Financiando infraestructuras metrológicas que sean capaces de proporcionar patrones primarios, servicios de medición y experiencia técnica, como soporte a las mediciones realizadas en la nanoescala en los campos dimensional, eléctrico, óptico, magnético, mecánico, químico y biológico¹⁴.
- Contratando técnicos y post-docs para trabajar en proyectos para el desarrollo de instrumentación y patrones de calibración, adaptados a las necesidades y mejorados respecto a las versiones comerciales existentes.
- Realizando proyectos interdisciplinares y coordinados, a tres bandas: CEM-Universidad-Empresa.
- Incrementando la participación en proyectos europeos específicos sobre nanometrología, a través del EMRP y, en el próximo futuro, por la vía del Art. 169 del Tratado de la UE.
- Difundiendo los principios y criterios metrológicos entre la comunidad investigadora y la industria, mediante workshops y jornadas de divulgación.

¹⁴ Australian Government, National Measurement Institute, Technical Report 12, Nanometrology: The Critical Role of Measurement in Supporting Australian Nanotechnology, Dr John Miles, First edition, November 2006.

- Intercambiando conocimientos y actuando de manera coordinada: los metrologos no son expertos en nanociencia y nanotecnología y los investigadores y empresarios no son expertos en nanometrología, pero todos pueden ayudar a todos desde sus respectivas visiones del problema.
- Integrando la metrología en los procesos productivos, de forma que aporte reproducibilidad, bajo coste, velocidad y utilización sencilla.
- Potenciando la participación de expertos en el Grupo AENOR/GET15 sobre normalización en nanotecnologías, así como en los Comités Técnicos europeos (CEN) e internacionales (ISO), de forma que se cuente con una posición nacional sólida bien soportada por la realidad existente y la que se desea construir.

4. Publicaciones más relevantes en el área (año 2004-2007)

- The metrological infrastructure and the nano word, E. Prieto, 1st NanoSpain Workshop. 12th March 2004. San Sebastián. Spain.
- Metrology at the nanoscale, E. Prieto, E-Nano Newsletter nº 7, March 2007, 5-7 http://www.phantomsnet.net/files/E_NANO_Newsletter_Issue07.pdf
- International Standards in Nanotechnology, Report by Nanoposts.com, an information exchange website of the Technology Transfer Centre (IoN), September 2007.
- Workshop Nanometrology 2007: Metrology for Nanotechnology, June 14-15 2007, Book of Abstracts, National Institute of Metrological Research (INRIM), Torino, Italy.
- Nano-Metrology Technology Roadmap Update. The Centre of Excellence in Metrology for Micro and Nano Technologies, April 2007.
- Nanoscale Metrology, Editorial, Meas. Sci. Technol. 18 (2007).
- Korpelainen, V. and Lassila, A. (2006) Calibration of a commercial AFM: Interferometric traceability for a coordinate system. NanoScale 2006, Switzerland.
- Leach, R.; Chetwynd D.; Blunt, L.; Haycocks, J.; Harris, P.; Jackson, K.; Oldfield, S. and Reilly, S. (2006) Recent advances in traceable nanoscale dimension and force metrology in the UK. Meas. Sci. Technol. 17(3), 467–476.
- Pekelsky, J. R.; Nistico, B. J.; Eves, B. J. and Decker, J. E. (2006) Imaging laser-diffractometer for traceable grating pitch calibration (poster). NanoScale 2006, Switzerland.
- Project Proposal on Technological Cooperative Framework on Nanoscale Analytical and Measurement Methods (2006) APEC.



- 
- Australian Government, National Measurement Institute, Technical Report 12, Nanometrology: The Critical Role of Measurement in Supporting Australian Nanotechnology, Dr John Miles, First edition, November 2006.
 - The National Nanotechnology Initiative: Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry (2006) Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, Committee on Technology, National Science and Technology Council http://www.nano.gov/NNI_07Budget.pdf
 - Eighth Nanoforum Report on Nanometrology, July 2006, www.nanoforum.org
 - Cumpson, P. (2006) Roadmap for NPL manufacturing theme: Micro and Nanoparticles: rapid, reliable multi-property analysis techniques National Physical Laboratory.
 - Wilkening, G. and Koenders, L. eds (2005) Nanoscale Calibration Standards and Methods: Dimensional and Related Measurements in the Micro- and Nanometre Range, Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
 - Wilkening, G. (2005) Report to the 10th Working Group on Dimensional Metrology, Consultative Committee for Length, International Bureau of Weights and Measures.
 - Kopanski, J. (2005) Report: Nanotechnology Research and Development at the National Institute of Standards and Technology.
 - Postek, M. T. (2005) Nanometer-scale Metrology. National Institute of Science and Technology, http://www.mel.nist.gov/div821/webdocs-14/nanoscale-metrology_2001.pdf
 - Takatsuji, T. (2005) National project: Research and development of 3D nanoscale certified reference materials. 21st APMP General Assembly, TCL Report.
 - Nanoscale Characterisation of Advanced Materials (2005) APEC Workshop, Industrial Technology Research Institute, Taiwan.
 - Report on Nanoparticle Metrology (2005) National Metrology Institute of Japan.
 - Eom, T. B. (2005) Nanometrology in KRISS. 21st APMP General Assembly, TCL Report.
 - Wilkening, G. (2005) Presentation on Dimensional Nanometrology at PTB: Recent Developments, Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
 - Brand, U. and Kirchhoff, J. (2005). A micro-CMM with metrology frame for low uncertainty measurements. Meas. Sci. Technol. 16(12), 2489–2497.
 - The Measurement of Engineered Nanoparticles (2005) Presentation to the Micro and Nano Technology Measurement Club, London.

- Lan, Y. P. (2005) Dimensional Nanometrology Developments at CMS. 21st APMP, General Assembly, TCL Report.
- Preliminary Interlaboratory Comparison on Nanoparticle Size Characterization, Comparison Report First Draft (2005) APEC.
- Nanometrology, F. Y. 2004/2005 Projects, Clare Allocca, Stephen Freiman, Materials Science and Engineering Laboratory, Abril 2005.
- The International Technology Roadmap for semiconductors, Ed. 2005, Metrology.
- Nanosciences and Nanotechnologies: An Action Plan for Europe 2005-2009 (2005), European Commission, Brussels, http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/nano_action_plan_en.pdf
- Materials Metrology in Nanotechnology, Robert D. Shull, NIST, Meeting on nanostructured materials, Junio 2005.
- Postek, M. T. (2004) Nanometrology: fundamental for realizing products at the nanoscale. Micro Nano Breakthrough Conference 2004, Washington.
- MNT Roadmap in Metrology, Micro Nano Technology Network, Dr. Alan Smith, September 2004.
- Towards a European Strategy for Nanotechnology (2004) European Commission, Brussels. ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nano_com_en.pdf
- First International Symposium on Standard Materials and Metrology for Nanotechnology (2004) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo. Voltage-induced membrane movement, P. Zhang, A. Keleshian, and F. Sachs, Nature 413, 428–432 (2001).
- Atomic Resolution Imaging of the (001) Surface of UHV Cleaved MgO by Dynamic Scanning Force Microscopy, C. Barth and C. Henry, Phys. Rev. Lett. 91, 196102 (2003).

5. Proyectos

España

Pocos proyectos específicos sobre nanometrología se han abordado en España, aunque lógicamente en muchos de los no específicos, la medición y la caracterización constituyen una parte muy importante de los mismos. En lo que respecta al CEM, éste ha abordado y financiado algunos directamente aplicables al campo nano, en colaboración con empresas españolas; p. ej. :

- SARTSI - Sistema de detección y eliminación de no linealidades en sistemas interferométricos láser de medida, para la calibración de actuadores

piezoeléctricos y sistemas de nanoposicionado, con incertidumbre subnanométrica.

A partir de 2008 el CEM va a encarar un nuevo proyecto nacional en este campo:

- Desarrollo y construcción de un AFM metrológico para la calibración de patrones y muestras en el rango nanométrico y subnanométrico.

Dicho sistema, realizado en colaboración con socios españoles, integrará técnicas de microscopía de campo cercano (SPM, Scanning Probe Microscopy) e interferometría de alta resolución a partir de fuentes láser estabilizadas.

Unión Europea

Nanostrand es un proyecto del VI Programa Marco que pretende identificar nuevas necesidades de medida, tecnologías y normas. Los resultados se traducirán en dos roadmaps, uno sobre prioridades de investigación en nanometrología y otro sobre prioridades en normalización, que deben contribuir al desarrollo y explotación de las nanotecnologías en Europa.

Por su parte, los Institutos Nacionales de Metrología englobados en EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) llevan tiempo participando en comparaciones de medidas, con el fin de comprobar el estado de la técnica y la compatibilidad de los resultados a la hora de calibrar patrones empleados en el mundo nano. Entre estas comparaciones cabe citar:

- NANO4: Calibración de retículos holográficos monodimensionales (*1D gratings*).
Participantes: 11 laboratorios nacionales.
Referencia: Nano 4 Final Report, 2000, 34 págs.
- NANO3: Calibración de patrones a trazos (line scale standards).
Participantes: 13 laboratorios nacionales.
Referencia: Metrología, 2003, 40, Tech. Suppl., 04002.
- NANO2: Calibración de patrones de escalón (*step height standards*).
Comentarios: Comparación entre mediciones realizadas por varios métodos de medida: instrumentos de palpador, microscopios interferenciales y microscopios de fuerza atómica.
Participantes: 14 laboratorios nacionales, entre ellos el CEM.
Referencia: Metrología, 2003, 40, Tech. Suppl., 04001.

En la actualidad, están en marcha las siguientes comparaciones, con participación del CEM, organizadas por EURAMET (European Association of National Metrology Institutes):

- EURAMET.L-K7.2006: Calibración de patrón a trazos (line scale) de cuarzo.
- EURAMET-672: Caracterización de planitud mediante interferometría de Fizeau, con incertidumbre nanométrica.
- EURAMET-866: Calibración interferométrica de actuadores para microdesplazamientos, con resolución e incertidumbre subnanométricas.

A comienzos de 2008, los Institutos Nacionales de Metrología, entre ellos el CEM, han iniciado los proyectos del EMRP (European Metrology Research Programme) financiados por la Unión Europea. Entre éstos destacan:

- JRP1.1 - Calibración trazable de nanopartículas.
- JRP1.4 - Nuevas rutas para la trazabilidad en nanometrología.
- JRP1.2 - Interacciones Punta-Muestra en microscopios de sonda de barrido (AFMs).

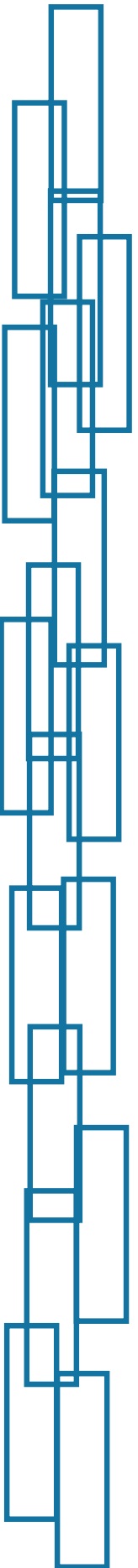
6. Infraestructura necesaria para cumplir objetivos (2008-2011)

La reducción de dimensiones, un mejor control de los parámetros electromagnéticos de los nanodispositivos, y nuevas tecnologías de interconexión en 3D (quizá mediante nanotubos de carbono) serán posiblemente los retos a los que se enfrente la nanometrología. En cualquiera de los campos de la nanotecnología, serán necesarios nuevos instrumentos, capaces de medir propiedades cuya magnitud se sitúa en la actualidad muy poco por encima de su incertidumbre.

La infraestructura que habría que desarrollar, mediante acciones coordinadas entre metrologos, investigadores e industrias, debería comprender:

- Grupos de trabajo permanentes que sean capaces de desarrollar soluciones metrológicas aplicables a la nanoescala. Físicos, químicos, metrologos, ingenieros, expertos en software, etc., deben pensar conjuntamente, aportando sus conocimientos.
- Red de Centros coordinados, que lleven a la práctica las ideas más prioritarias, apoyándose en la industria nacional para la fabricación de prototipos y soluciones (estos modelos se han experimentado con éxito en otros países de nuestro entorno).
- Diseño y fabricación de instrumentos metrológicamente correctos, o mejora de modelos comerciales, que permitan calibrar con baja incertidumbre los patrones empleados en la nanoescala.
- Diseño y fabricación de nuevos patrones de calibración, dotados de trazabilidad, adaptados a los distintos procesos de medición y caracterización.
- Conjunto de normas, en cuya gestación se haya colaborado activamente, que faciliten el camino de la producción masiva de nanodispositivos y nanomateriales.

En cualquier caso, dado que España no es, en general, un país fabricante de instrumentación, sino usuario de la misma, al menos se debe mantener una buena base de datos con información actualizada sobre desarrollos en nanometrología, lo que es fácil gracias a la colaboración existente entre los institutos de metrología europeos, a través de EURAMET y sus Comités Técnicos. De esta forma, mediante una divulgación y difusión continua del conocimiento, ésta llegará a Investigadores y empresas españolas, ayudando a mejorar la tecnología y métodos empleados en la nanoescala (*la información es poder*).



Concretamente, el CEM podría actuar como correa de transmisión entre los Institutos Nacionales de Metrología y la sociedad española, para mantener informados a los distintos agentes del estado actual de la nanometrología y del futuro que se está construyendo, realimentando al sistema con los intereses nacionales.

7. Grupos más relevantes

España

- CEM (Centro Español de Metrología)-Área de Longitud: <http://www.cem.es>
- NanoSpain: <http://www.nanospain.org>
- CIMTAN (Círculo de Innovación en Materiales, Tecnología aeroespacial y Nanotecnología): <http://www.madrimasd.org/cimtán>
- AENOR/GET 15: <http://www.aenor.es>

Europa

- EURAMET (European Association of National Metrology Institutes): <http://www.euramet.eu>
- EMRP (European Metrology Research Programme): <http://www.emrponline.eu>
- MNT Network (Measurement Club)(UK): <http://mnt.globalwatchonline.com>
- PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany): http://www.ptb.de/index_en.html
- NPL (National Physical Laboratory, UK): <http://www.npl.co.uk>
- CEN/TC 352: <http://www.cen.eu/cenorm/homepage.htm>

8. Iniciativas relevantes (Plataformas Tecnológicas, etc.)

España

No se conocen plataformas tecnológicas o iniciativas relevantes específicas en el campo de la nanometrología, salvo los proyectos acometidos por el CEM, ya mencionados anteriormente en el apartado 5 de este informe.

Europa

En Europa existe una variedad de iniciativas y plataformas, normalmente ligadas a los respectivos Institutos Nacionales de Metrología, con colaboración de Universidades Técnicas y también fabricantes de instrumentación, en aquellos países que tienen un mayor nivel de desarrollo industrial (Reino Unido, Alemania, Suiza).

Las iniciativas suelen canalizarse a través de las organizaciones y programas que se han mencionado en el apartado de esta misma página: Grupos europeos más relevantes.

9. Conclusiones y Recomendaciones.

- Las nanoestructuras y los nanodispositivos requieren un control dimensional exacto para garantizar su correcta fabricación y sus prestaciones.
- La infraestructura metrológica necesaria en todo proceso productivo es aún muy débil, incluso inexistente en algunos casos, por lo que debe darse prioridad al desarrollo de la nanometrología.
- La nanotecnología no ha dado aún el gran salto a la producción industrial masiva, en parte debido a que no existe un desarrollo paralelo de la infraestructura metrológica en la nanoescala.
- En general, la metrología existente es adecuada para el campo micro pero no para el campo nano.
- Deben financiarse programas educativos para mejorar las capacidades de la Universidad y de las empresas, creando comunidades multidisciplinares dedicadas a la investigación sobre metrología aplicable a la nanoescala.
- Las características de las nanofabricaciones presentan gran dispersión, fruto de la falta de exactitud y precisión (reproducibilidad) de los sistemas de medida, por lo que la metrología debe integrarse en los procesos productivos.
- No existen patrones de calibración que cubran todas las necesidades de la nanoescala, por lo que es necesario desarrollarlos con urgencia.
- Deben fabricarse instrumentos metrológicamente fiables, que permitan la caracterización adecuada de los nuevos patrones, empleando éstos posteriormente para dotar de trazabilidad a los instrumentos habituales.
- Debe mantenerse una buena base de datos con información actualizada sobre desarrollos en nanometrología.
- Debe mejorarse la divulgación y difusión continua del conocimiento, desde los Institutos de Metrología hacia los agentes implicados en el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología. El CEM podría actuar en este sentido como correa de transmisión de información entre los Institutos Nacionales de Metrología y la sociedad española.
- Debe incrementarse la participación de expertos en el Grupo AENOR/GET15 sobre normalización en nanotecnologías, y en los Comités Técnicos del CEN, Organismo Europeo de Normalización.

Esquema de trazabilidad en nanometrología, propuesto por el CEM

