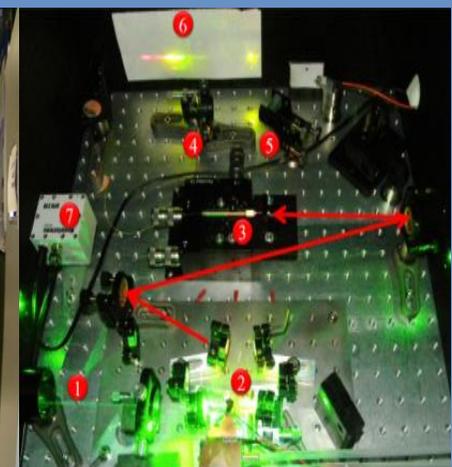
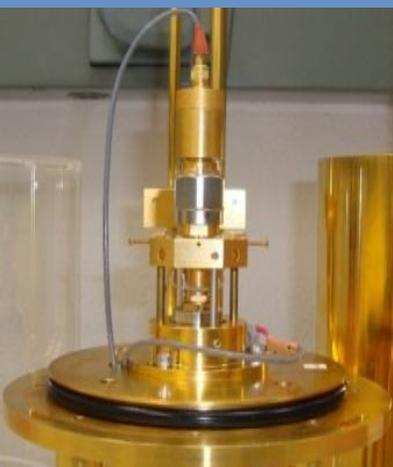


**INVESTIGACIÓN APLICADA
Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO
EN
METROLOGÍA ELÉCTRICA
2012**



PRESENTACIÓN

En la atención de necesidades de medición de sectores industriales y sociales, en el 2012 incrementamos nuestras actividades de investigación aplicada en metrología. En este Reporte de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico en Metrología 2012 presentamos los objetivos y resultados de los proyectos de investigación que desarrollamos en el 2012.

La evolución de la actividad productiva nacional se acompaña de un crecimiento considerable de tecnologías de vanguardia que se aplican en diversos procesos productivos, las cuales se caracterizan por presentar retos de medición de alta complejidad. El CENAM dedica una gran parte de sus actividades a la investigación aplicada en metrología para dar atención a este tipo de necesidades de medición. Resultado directo de estas actividades son métodos y técnicas de medición de alta calidad metrológica, que ponemos a la disposición de la industria nacional mediante la prestación de servicios metrológicos, tales como: calibración de equipos de medición; medición de propiedades físicas de materiales; cursos y asesorías en metrología, además de una gran cantidad de artículos técnico-científicos en metrología.

La investigación aplicada en metrología que realiza el CENAM, también resulta en una nueva generación de patrones nacionales de medición. Sobre ellos descansa la confiabilidad y uniformidad de las mediciones de alto nivel metrológico que se realizan en la industria. En nuestra relación con laboratorios de metrología de otros países, frecuentemente realizamos comparaciones de patrones de medición; estas comparaciones nos ayudan a confirmar la confiabilidad y seguridad de los métodos y técnicas de medición que realizamos en el CENAM.

Es muy satisfactorio compartir con los usuarios de nuestros servicios metrológicos en la industria y en la sociedad en general, algunos de los proyectos de investigación aplicada en metrología que realizamos en el 2012. Estas actividades de investigación se han llevado a cabo mediante la colaboración de investigadores del CENAM y de otras instituciones en el país, así como de otros institutos de metrología en el mundo.

Marzo 2013

Contenido

Presentación	1
Contenido	2
Patrón primario de potencia electromagnética en radiofrecuencias de 50 MHz a 18 GHz.	3
Patrón nacional de coeficientes de reflexión y transmisión a 32 GHz.	3
Trazabilidad para mediciones de compatibilidad electromagnética	4
Metrología eléctrica cuántica en grafeno	5
Mediciones eléctricas basadas en sistemas cuánticos	6
Disminución de la incertidumbre del patrón nacional de tensión eléctrica continua	7
Sistema de referencia para la medición de propiedades magnéticas de aceros eléctricos	8
Sistema de referencia para la medición de niveles de tensión eléctrica continua en valores menores a 100 mV	9
Metrología en el sector salud: control metrológico de termómetros de radiación óticos	10
Evaluación del contenido de humedad en materiales de construcción	11
Sector agrícola: contenido de humedad en granos	11
Emisividad de los materiales: emisión de energía por radiación electromagnética	12
Mediciones confiables de temperatura arriba de 1 000 °C	13
Ampliación de la capacidad de medición del patrón nacional de humedad en gases	14
Conductividad térmica de materiales aislantes: comparación internacional del patrón nacional de conductividad térmica de materiales sólidos aislantes	15
Medición de conductividad térmica de materiales de construcción	15
Materia ultra fría para relojes atómicos	16
Desarrollo del patrón nacional de peine de frecuencias ópticas	17
Escalas de tiempo de aplicación crítica	18
Referencias bibliográficas	20

Patrón primario de potencia electromagnética en radiofrecuencias de 50 MHz a 18 GHz

Investigadores: Mariano Botello e Israel García Ruiz

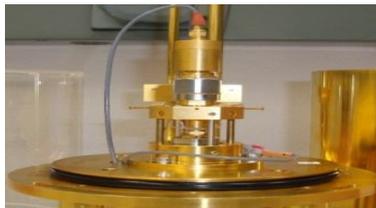
En el año 2012 se concluyó y puso en operación el patrón primario de potencia electromagnética basado en un microcalorímetro de radiofrecuencias operando en el intervalo de 50 MHz a 18 GHz.

Este nuevo patrón es la realización en el CENAM de la unidad del watt para señales eléctricas de radiofrecuencias. Siendo un patrón primario, se le atribuye el más alto nivel metrológico, de tal forma que no es trazable a ningún otro patrón de la misma magnitud de medición.

Para determinar su valor se recurre a la investigación aplicada en varias disciplinas: teoría electromagnética, propiedades electromagnéticas y termoelectricas de los materiales; mecanismos de transferencia de calor; medición de temperatura y de parámetros de dispersión.

Como resultado de la investigación realizada, el diseño obtenido permitió minimizar las pérdidas en la conducción de las señales de radiofrecuencia hasta el detector y optimizar la incertidumbre de la medición de temperatura en el detector de medición. Se desarrolló un

modelo matemático que describe el proceso de conversión de la energía electromagnética incidente en energía térmica, y que permite cuantificar con mayor confiabilidad las magnitudes de medición de influencia en el mensurando.



Componentes principales del patrón primario de potencia en radiofrecuencias. En la parte superior de la imagen se observa un detector de potencia conectado al microcalorímetro para medir las pérdidas de potencia electromagnética manifestadas en calor

La caracterización experimental del calorímetro consiste en la obtención de un factor de corrección del calorímetro que describe la respuesta relativa del medidor de temperatura a la potencia de corriente continua y de radiofrecuencias. Durante esta etapa de la investigación se diseñó una conexión simétrica o “frente a frente” de los planos de referencia de dos

calorímetros del mismo nivel metrológico.

El anterior patrón nacional de potencia electromagnética en el CENAM, estaba basado en un termistor mantenido dentro de un horno cilíndrico a temperatura controlada, y debía ser recalibrado contra el patrón nacional de otro laboratorio en el extranjero, lo cual resultaba en una incertidumbre mayor a 10 mW/W. Este valor de incertidumbre era insuficiente para dar trazabilidad a patrones de laboratorios de calibración en la industria, los cuales también están basados en termistor.

Esta investigación inició en el año 2009 mediante una colaboración científica y tecnológica con el NIST. Actualmente, este patrón primario permite mediciones al más alto nivel de exactitud [1] y con ello dar trazabilidad a las mediciones de potencia electromagnética en radiofrecuencias que se realizan en nuestro país en sectores de la economía nacional tales como: telecomunicaciones, eléctrico, electrónico, automotriz, aeronáutico, entre otros [2].

Patrón nacional de coeficientes de reflexión y transmisión a 32 GHz

Investigadores: Susana Padilla e Israel García Ruiz

Las aplicaciones de medición en radiofrecuencias en laboratorios de calibración y de pruebas en la industria nacional, requieren una mínima incertidumbre de medición en frecuencias hasta 40 GHz. Se estima que en pocos años, el alcance de medición será hasta 50 GHz y 70 GHz. Entre las principales necesidades de medición de la industria se encuentran

las propiedades de reflexión y transmisión de ondas en componentes y equipos de telecomunicaciones que operan con señales de radiofrecuencias.

En el CENAM se contaba anteriormente con un patrón primario de reflexión y transmisión, basado en un conjunto de líneas coaxiales de precisión de 7 mm

en conector tipo N con un alcance en frecuencia hasta 18 GHz. Esta capacidad de medición era insuficiente ya que los sectores de manufacturas y de servicios han incrementado sus capacidades tecnológicas de producción y servicios de telecomunicaciones y con ello, han llevado sus necesidades de medición a frecuencias más altas.

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

Con el objetivo de satisfacer estas demandas presentes y futuras de calibración a frecuencias por arriba de los 18 GHz, en el año 2012 se desarrolló y concluyó un proyecto para ampliar el alcance del patrón nacional primario. En la investigación realizada para obtener un patrón de medición de reflexión y transmisión para señales de frecuencias hasta 32 GHz, se determinaron con mínima incertidumbre los coeficientes de transmisión y reflexión de líneas coaxiales de precisión de 3.5 mm de diámetro y conector GPC3.5 [3].

Una línea de investigación consistió en determinar un modelo electromagnético de las líneas coaxiales, cuya

sensibilidad requiere un conocimiento muy exacto de las dimensiones de las líneas y de las propiedades electromagnéticas del material con que están construidas. Otra línea de investigación consistió en la caracterización exhaustiva de los errores sistemáticos de un sistema de transferencia que se utiliza para la diseminación del patrón nacional a otros patrones de medición en la industria [4].

Para atender necesidades futuras de medición de la industria nacional, la capacidad lograda actualmente se complementará con nuevos desarrollos de patrones de medición en frecuencias hasta 40 GHz.



A la izquierda y derecha de la imagen, se observan los conductores exterior e interior de un par de líneas coaxiales de precisión de 3.5 mm, que tienen un dieléctrico de aire, y que forman parte del patrón primario de medición de coeficientes de reflexión y transmisión hasta 32GHz

Trazabilidad para mediciones de Compatibilidad Electromagnética

Investigadores: Miguel Angel Muñoz e Israel García Ruiz

Las antenas son muy conocidas por su aplicación para recibir o radiar señales de radiofrecuencias en sistemas de comunicación inalámbrica.

Una aplicación singular de las antenas, que tiene un impacto muy alto en sectores de telecomunicaciones, de sistemas eléctricos de potencia y en las industrias eléctrica, electrónica, automotriz y aeronáutica, es la determinación de los niveles de intensidad de campo eléctrico emitidos por cualquier aparato o dispositivo que en su operación utilice energía eléctrica.

En esta aplicación, la característica de mayor relevancia en una antena de medición de campo eléctrico es su Factor de Antena, el cual establece una relación directa entre la indicación de un receptor de medición y la intensidad del campo eléctrico incidente en la antena [5].

En otras aplicaciones se requiere determinar qué tan robusto es un componente o equipo eléctricos cuando

se operan en ambientes inmersos en campos electromagnéticos interferentes.

Para estas aplicaciones se requieren antenas de medición, cuyos parámetros metrológicos hayan sido medidos con mínima incertidumbre. Ambos aspectos, la inmunidad y la robustez en la operación de dispositivos o sistemas que operan con energía eléctrica, están comprendidos en un área de la ingeniería y la tecnología conocida como Compatibilidad Electromagnética [6, 7].

En el CENAM se ha desarrollado la infraestructura de medición necesaria para determinar con mínima incertidumbre los parámetros de antenas de medición empleadas tanto en la industria de telecomunicaciones, así como en laboratorios de pruebas de compatibilidad electromagnética de equipos y sistemas eléctricos y electrónicos.

El patrón de medición de referencia consiste en un Sitio de Calibración de

Antenas a Campo Abierto, conocido en inglés como CALTS (Calibration Test Site). Es una instalación altamente especializada cuyos parámetros de planicidad, rugosidad y transmisión en microrondas fueron consideradas en su construcción. Su diseño permite alcanzar una incertidumbre en sus parámetros de medición a un nivel menor que la establecida en la norma internacional CISPR 16-1-4 [8].

En el año 2012 se inició una investigación teórico-experimental para determinar el valor de medición del CALTS, buscando satisfacer ampliamente los requerimientos técnicos establecidos en la norma CISPR 16-1-5 [9]. Una línea de investigación fue la determinación de su principal atributo metrológico, la Atenuación de Sitio, la cual se obtuvo en forma teórica y experimental en nueve posiciones geométricas del CALTS y que están distribuidas uniformemente sobre el mismo. De esta forma, se realiza una caracterización de la Atenuación de

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

Sitio y su gradiente sobre un área extensa del CALTS. Con este patrón nacional de medición, el CENAM está apoyando a la industria nacional de telecomunicaciones a participar en el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de equipos y sistemas empleados en telecomunicaciones, firmado recientemente por Estados Unidos, Canadá y México. Este Acuerdo requiere un soporte tecnológico y científico confiable en metrología de compatibilidad electromagnética, para

asegurar la confiabilidad de las mediciones industriales que se realizan en nuestro país.



Antenas patrón de medición posicionadas sobre el Sitio de Calibración de Antenas (CALTS) a campo abierto, durante el proceso de medición de sus parámetros de referencia.

Metrología eléctrica cuántica en grafeno

Investigadores: Felipe Hernández-CENAM, Randolph Elmquist-NIST, Estados Unidos

En el laboratorio de Resistencia Eléctrica del Centro Nacional de Metrología (CENAM) se reproduce desde 1998, la unidad de resistencia eléctrica mediante el efecto Hall cuántico (EHC), cuyo valor de resistencia Hall cuantizada sólo depende de dos constantes físicas fundamentales: la carga del electrón (e) y la constante de Planck (h), sirve como referencia nacional para establecer una escala de resistencia eléctrica desde $1 \text{ m}\Omega$ ($1 \times 10^{-3} \Omega$) hasta $1 \text{ T}\Omega$ ($1 \times 10^{12} \Omega$). Con el conocimiento de los valores de esta escala de resistencia se brindan servicios de medición y calibración en el país y otros países en Latinoamérica.

Para observar el EHC en el CENAM es necesario enfriar una muestra semiconductor de AlGaAs/GaAs a una temperatura de $\approx 1.5 \text{ K}$ ($-271.65 \text{ }^\circ\text{C}$), esta temperatura solo se puede lograr mediante el empleo de helio líquido. El mantenimiento de la infraestructura metroológica con la que cuenta el CENAM requiere de un alto consumo de helio líquido, cuyo precio ha venido incrementándose año tras año, adicionalmente se han presentado problemas de desabasto debido a que Estados Unidos, poseedor de las mayores

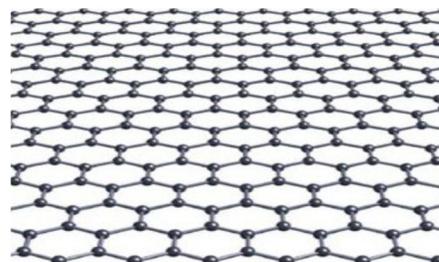
reservas de helio líquido, ha catalogado a éste como un recurso no renovable estratégico.

Por otra parte el grafeno, descubierto en 2004, un material bidimensional constituido por una capa monoatómica de átomos de carbono ordenados en forma hexagonal poseedor de varias propiedades muy interesantes, donde una de ellas es que puede exhibir una alta movilidad de sus portadores de carga (hasta del orden de $50 \text{ 000 cm}^2/\text{Vs}$). Esta movilidad tiene una débil dependencia con la temperatura por lo que es posible conservar esta alta movilidad incluso a temperatura ambiente.

Esta propiedad junto con el hecho que se trata de un sistema bidimensional han permitido observar el EHC [10], incluso a temperatura ambiente. El EHC observado en grafeno abre la posibilidad de no utilizar helio líquido para reproducir la unidad de resistencia eléctrica. Esto es importante ante la problemática del encarecimiento de dicho material criogénico.

En este escenario, es de vital importancia que el CENAM incursione en la forma de

desarrollar muestras de grafeno para observar el EHC.



Ordenamiento de los átomos de carbono en el grafeno

Por tal motivo se mantiene una colaboración con el National Institute of Standards and Technology (NIST), para que en este periodo el CENAM pueda contar con muestras de grafeno, ya que esto permitirá observar el EHC sin necesidad de ocupar helio líquido y potencialmente reproducir la unidad de resistencia eléctrica, garantizando con ello la operación de la infraestructura metroológica del CENAM para continuar brindando sus beneficios a nuestro país.

Mediciones eléctricas basadas en sistemas cuánticos

Investigadores: David Avilés, Enrique Navarrete, Dionisio Hernández, Jesús Medina

Las nuevas tecnologías de mediciones eléctricas permiten a la industria contar con instrumentos de medición cada vez más exactos, gracias a los cuales, es posible medir y controlar de manera más precisa la calidad de una gran cantidad de productos, cuyas características principales se determinan en base a mediciones de magnitudes eléctricas.

Dentro de las industrias beneficiadas por la aparición de estas nuevas tecnologías están: la industria eléctrica, electrónica, automotriz, informática, electrodomésticos, aeronáutica. Los instrumentos de mediciones eléctricas que usan estas nuevas tecnologías requieren de patrones cada vez más exactos para su calibración.

En México desde hace 18 años la unidad de tensión eléctrica continua, el volt, se reproduce a partir del efecto Josephson. Este es un efecto cuántico que se produce en estructuras superconductoras, de manera que permite generar una tensión eléctrica V que es proporcional a la frecuencia f de una radiación de microondas de acuerdo a la ecuación:

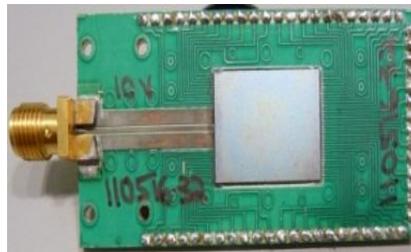
$$V = nf/K_J$$

en donde n es un número entero y K_J la constante Josephson.

Los nuevos desarrollos en circuitos integrados superconductores han mejorado sustancialmente la estabilidad y velocidad de los circuitos integrados usados para el efecto Josephson. Esto ha hecho posible la aparición de los patrones de efecto Josephson programables, que permiten la generación de señales de tensión alterna de referencia con una incertidumbre de medición tan pequeña como la obtenida con el efecto Josephson convencional. Actualmente se desarrollan diferentes aplicaciones que mejorarán los patrones de tensión eléctrica alterna y de magnitudes eléctricas derivadas de ésta.

Los watthorímetros digitales domiciliarios e industriales y los proyectos de redes eléctricas inteligentes (smart grids), hacen necesario el desarrollo de patrones de energía eléctrica de mayor nivel metrológico, y para asegurar su confiabilidad metrológica resulta indispensable el efecto Josephson programable.

El CENAM tiene un programa de desarrollo de patrones eléctricos en corriente alterna, basados en el efecto Josephson programable, que permitirá la generación de señales patrón de tensión eléctrica alterna, la calibración de generadores y medidores de tensión eléctrica alterna de alta exactitud. Será posible desarrollar patrones de potencia eléctrica e impedancia basados en el efecto Josephson programable. [11]



Chip de efecto Josephson programable que es la base del nuevo patrón de efecto Josephson Programable en el CENAM.

La base del patrón de efecto Josephson programable es un chip superconductor que permite obtener valores de tensión de salida de muy alta estabilidad, facilitando la generación de múltiples formas de onda de señales eléctricas con aproximaciones de niveles cuánticos escalonados.

El diagrama siguiente muestra el esquema básico del patrón que consta del chip superconductor de efecto Josephson programable, una fuente de polarización, que se está desarrollando en el CENAM y un sistema de microondas sincronizado con un patrón atómico de frecuencia, todo controlado por computadora.

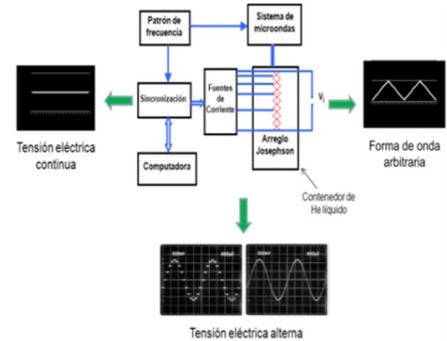
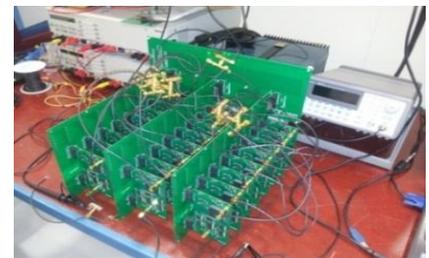


Diagrama a bloques del Patrón de efecto Josephson Programable en desarrollo

El diseño y construcción de este patrón requiere de un conocimiento profundo del funcionamiento de los patrones cuánticos, basados en el efecto Josephson. Se requerirá el desarrollo de electrónica de alta velocidad y bajo ruido, para el diseño y construcción de la fuente de polarización.



Fuente de polarización para el patrón de efecto Josephson programable en desarrollo en CENAM.

La integración del sistema de microondas requiere de conocimientos de electrónica

de muy alta frecuencia. Debido a que el patrón funciona en base a superconductores de baja temperatura crítica, se requieren conocimientos de sistemas criogénicos. Los sistemas serán necesariamente automatizados por lo que el desarrollo de software para este fin es también necesario.

Gracias a estos desarrollos contaremos con patrones eléctricos para señales eléctricas alternas, basados en tecnologías cuánticas

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

que son muy estables y de muy alta exactitud.

Las aplicaciones del patrón de efecto Josephson programable están en desarrollo en los principales laboratorios

de metrología del mundo. El CENAM está trabajando en esta área con desarrollos propios y en colaboración con el grupo del National Institute of Standards and Technology (NIST) de los Estados Unidos,

que es el grupo más importante de desarrollo de estas tecnologías a nivel mundial.

Disminución de la incertidumbre del patrón nacional de tensión eléctrica continua

Investigadores: David Avilés, Enrique Navarrete, Dionisio Hernández

El volt se reproduce en el CENAM por medio del efecto Josephson. Este es un experimento cuántico que se produce cuando una unión Josephson, formada por dos superconductores separados por una fina capa de material aislante, se radia con microondas. En esta condición se produce una tensión eléctrica continua de referencia que es proporcional a la frecuencia de las microondas.

El volt es una de las unidades eléctricas de medición de base, y otras unidades eléctricas se derivan de esta. Las nuevas tecnologías de medición con niveles de incertidumbre cada vez menores, hacen necesario que este patrón nacional tenga un nivel de incertidumbre muy pequeño.

La investigación nos condujo a un modelo matemático que cuantifica con mínima incertidumbre, la influencia de la estabilidad de la frecuencia de microondas radiadas, y fue necesario usar un reloj atómico de cesio para asegurar la estabilidad de la frecuencia radiada; la presencia de fuerzas electromotrices debidas a gradientes térmicos en conductores eléctricos de las señales de interés; una determinación de corrientes eléctricas de fuga en filtros eléctricos en el circuito de medición; una valoración de pérdidas en dieléctrico en conductores y conexiones; la ganancia y linealidad del detector de nulos y la dispersión de las mediciones. Como resultado de esta investigación, el modelo matemático de medición permitió alcanzar una incertidumbre de

medición de algunos nanovolts en 10 V (algunas partes en 10^{11}).

Una línea de investigación fue la medición de la frecuencia de microrondas con una técnica de heterodinación, alcanzando niveles de resolución e incertidumbre no reportados en la literatura. En la estimación de la incertidumbre debida a corrientes de fuga, se desarrolló un sistema de medición de muy alta resistencia eléctrica a niveles de $T\Omega$.

Fue necesario determinar experimentalmente algunos parámetros operativos de los nanovóltmetros, como: resistencia de entrada, niveles de offset, corriente de fuga y de polarización para evaluar y corregir los errores sistemáticos producidos por estos instrumentos en la tensión eléctrica generada por el patrón Josephson. En la medición de tensión eléctrica, las fuerzas electromotrices inducidas térmicamente (fems térmicas), son una componente importante de incertidumbre de medición; aunque pueden ser evaluadas y compensadas, su valor cambia con las variaciones de temperatura del laboratorio. En la Tabla se muestran los resultados de esta investigación.

Al disponer del nuevo laboratorio de tensión eléctrica continua del CENAM, que cuenta con temperatura controlada a $23^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, alimentación eléctrica regulada y de muy bajo nivel de distorsión, tierras eléctricas de alta calidad y blindaje electromagnético,

fue posible disminuir sensiblemente la incertidumbre por fems térmicas y la incertidumbre por ruido electromagnético.



Mediciones en el nuevo laboratorio del volt durante la comparación directa de patrones de efecto Josephson entre el BIPM y el CENAM.

Fuentes de incertidumbre de medición	Incertidumbre estándar		
	(nV)		
	1996	2005	2012
Frecuencia	1	1.2	0.01
Corrientes de fuga	6	0.3	0.023
Ganancia y linealidad del detector	3	3	0.5
Dispersión de las mediciones	5.8	6.9	0.5
Interruptor de inversión de polaridad			0.3
Incertidumbre combinada	8.9	7.6	0.77

Mediciones en el nuevo laboratorio del volt durante la comparación directa de patrones de efecto Josephson entre el BIPM y el CENAM.

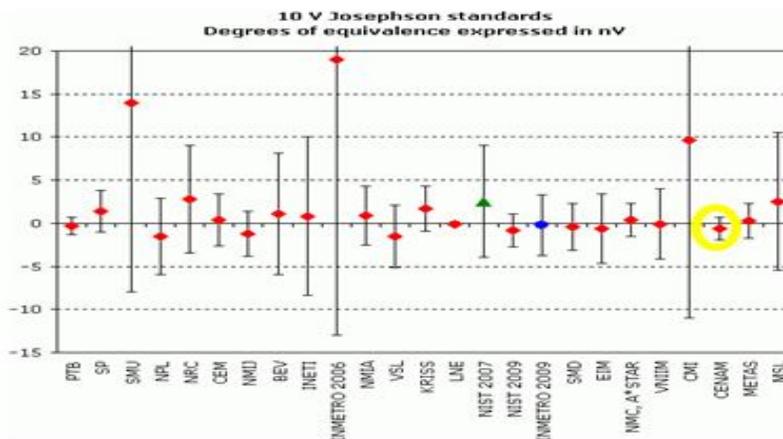
INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

La última evaluación de desempeño del efecto Josephson del CENAM, realizada en mayo del 2012, muestra que la investigación realizada permitió reducir la incertidumbre del patrón nacional en un orden de magnitud respecto a la anterior evaluación hecha en 2005. La incertidumbre combinada del patrón es actualmente de 0.77 nV [12].

Considerando que la tensión máxima del patrón es de 10 V, esta incertidumbre de medición, expresada en forma relativa, es igual a 7.7 partes en 10^{11} . Este valor tan pequeño de incertidumbre de medición muestra la alta calidad metroológica del patrón nacional de tensión en corriente continua.

La gráfica muestra los resultados de la comparación directa de patrones de efecto Josephson entre diversos laboratorios nacionales contra el patrón del BIPM. Las diferencias medidas están en nV. Las barras muestran la incertidumbre de medición para $k=2$, para un nivel de confianza de 95 %. El círculo amarillo muestra el resultado del CENAM, que es el tercer mejor resultado en la historia de estas comparaciones. [13,14].



Sistema de referencia para la medición de propiedades magnéticas de aceros eléctricos.

Investigadores: Marco A. Escobar y Mario G. Alatorre

Algunos materiales magnéticos como los aceros eléctricos (de grano orientado y no orientado), empleados en los núcleos de transformadores y motores, tienen un papel muy importante en la generación, distribución y transformación de la energía eléctrica, la cual es esencial para el desarrollo económico del país y es una respuesta confiable a las políticas de ahorro de energía. El conocimiento de las propiedades magnéticas de este tipo de aceros, es una componente esencial para el diseño, fabricación y operación confiable de transformadores, generadores de energía eléctrica y motores eléctricos.

El estudio e investigación de los materiales magnéticos ha ido en aumento en los últimos años debido al

interés que muestran las industrias del sector eléctrico. Por ejemplo, el uso adecuado de aceros en el núcleo de los transformadores, puede contribuir a minimizar las pérdidas energéticas en los núcleos magnéticos de estos equipos, a reducir las pérdidas de energía eléctrica y por tanto a un uso más eficiente de ésta. Las pérdidas magnéticas, también llamadas pérdidas totales específicas (P_s), se miden en watt por kilogramo (W/kg), y es una de los parámetros de referencia para la clasificación de estos materiales.

En esta investigación se desarrolló un sistema de medición de referencia para la caracterización magnética de aceros eléctricos, basado en el método de medición Epstein [15], y que es propuesto en la norma internacional IEC 60404-2.

Para minimizar la incertidumbre de medición, se debe generar un campo magnético en el cuadro Epstein, que tenga la mayor energía en la frecuencia fundamental del campo magnético. Las propiedades magnéticas del material bajo estudio generan frecuencias armónicas en el espectro eléctrico, cuya energía se mide y permite cuantificar algunos parámetros magnéticos del material. Con este sistema de medición se midieron las propiedades magnéticas de una muestra de acero de grano orientado y otra de grano no orientado, donadas al CENAM por un laboratorio del Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia. En las muestras bajo prueba se midieron sus dimensiones y masa, y se determinaron los valores de las siguientes propiedades magnéticas: pérdidas

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

magnéticas (W/kg), potencia aparente específica (VA/kg), polarización magnética (T), e intensidad de campo magnético (A/m), para valores de frecuencia de 50 Hz y 60 Hz. Para confirmar esta investigación se realizó una comparación bilateral con el laboratorio de magnetismo del Instituto Nacional de Investigación en Metrología de Italia, en la cual se obtuvieron resultados muy satisfactorios.

Con el establecimiento de este sistema de referencia de medición se apoyará al sector eléctrico: fabricantes de transformadores, generadores y motores eléctricos.



Sistema de medición de propiedades magnéticas de aceros eléctricos con el método del Cuadro Epstein

Sistema de referencia para la medición de niveles de tensión eléctrica continua en valores menores a 100 mV.

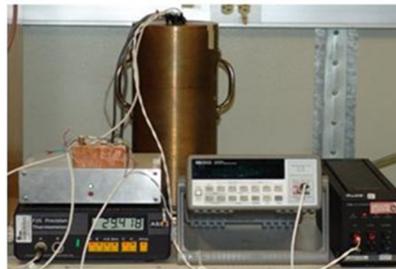
Investigadores: Carlos D. Avilés, Enrique Navarrete, Dionisio Hernández y Marco A. Rodríguez

La medición de tensiones eléctricas de valores menores a 100 mV, tiene una importancia significativa en algunos sistemas de control usados en aplicaciones industriales. Muchos transductores usados en la industria tienen una función de transferencia cuya salida es una señal de tensión en corriente continua de algunos milivolts, por ejemplo; termómetros de termopar, medidores de desplazamiento, de presión y otros. Para asegurar el desempeño metrológico de estos medidores en la industria, los laboratorios secundarios recurren al patrón de referencia que se estableció en el CENAM

Las mediciones de tensión eléctrica continua, a niveles menores de 100 mV, son de gran importancia en la industria, como la automotriz, ya que la mayoría de los transductores que son utilizados para la medición de fuerza, presión y temperatura, entre otros, están relacionados con mediciones de tensión eléctrica continua. Los transductores se componen de dos partes, el sensor de la magnitud de interés y típicamente un amplificador en magnitudes eléctricas, el cual genera señales eléctricas en el intervalo de 2 mV a 10 mV.

En laboratorios secundarios de calibración se requiere mediciones de

tensión eléctrica continua en valores menores a 100 mV con trazabilidad a patrones nacionales.



Sistema de medición de referencia de tensión eléctrica continua para valores de 1 mV a 100 mV.

Por la necesidad de asegurar una incertidumbre de medición muy pequeña en la calibración de los patrones para calibrar medidores de tensión de nivel de milivolts, en el CENAM se utilizaba directamente el patrón nacional basado en el efecto Josephson para calibrar tales patrones. Como resultado de la presente investigación es posible medir valores de 1 mV con una incertidumbre de medición menor a 100 $\mu\text{V}/\text{V}$ sin recurrir al efecto Josephson [16].

Las principales líneas en la investigación son: resistores de mínimo coeficiente térmico y alta estabilidad, operando a una potencia máxima específica dentro en una cavidad isotérmica, mantenida a temperatura controlada a centésimas de grado y en condiciones adiabáticas; configuración de conductores y dispositivos eléctricos para minimizar fuerzas electromotrices debidas a gradientes térmicos en materiales conductores diferentes. Se estudiaron diversos métodos para minimizar la transferencia de calor del exterior de la cavidad al circuito de medición. Adicionalmente, se requiere asegurar que la variabilidad de la tensión de salida no presentara variaciones mayores a 0.01 $\mu\text{V}/\text{V}$, y un alto rechazo de ruido electromagnético de modo común.

Durante la implementación del sistema de referencia para tensión eléctrica para niveles menores a 100 mV, se realizó un estudio de la estabilidad a largo plazo del divisor resistivo, mediante mediciones con el patrón del efecto Josephson. Siendo esta incertidumbre por estabilidad la principal componente de incertidumbre en la calibración de medidores de tensión. Los resultados van de los 40 nV en 1 mV hasta los 200 nV en 100 mV por año. El seguimiento metrológico que

se le ha dado a este sistema de referencia desde el año 2007, comprueba que es suficientemente

estable para responder a las necesidades de calibración de medidores de referencia en bajos

valores de tensión eléctrica continua [17].

Metrología en el Sector Salud: Control Metrológico de Termómetros de Radiación Óticos

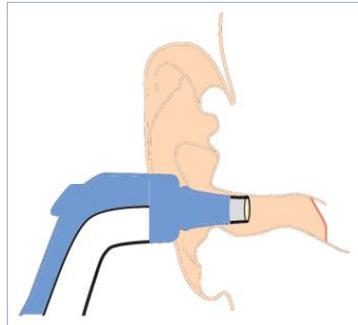
Investigadores: Daniel Cárdenas García y Edgar Méndez Lango

La medición de la temperatura corporal es fundamental para diagnosticar enfermedades y evaluar la efectividad de tratamientos. Unas décimas de grado Celsius en el valor de la temperatura del paciente pueden ser la diferencia al tomar la decisión de suministrar o no un medicamento. La Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) recomienda para los termómetros clínicos un error máximo de 0.2 °C en el intervalo de 35 °C a 42 °C [18]. En consecuencia, los termómetros clínicos deben calibrarse y verificarse regularmente, con patrones de referencia con incertidumbres menores que 0.06 °C.

La Organización Mundial de la Salud recomienda el uso de termómetros óticos como uno sustituto de los termómetros de mercurio [19]. los termómetros óticos miden la temperatura del tímpano que está localizado al fondo del canal auditivo, cerca de las arterias y venas mayores que alimentan al cerebro, y en la proximidad del hipotálamo que es el órgano que regula la temperatura corporal [20]. Por esto, la temperatura del tímpano proporciona información de alto valor para un juicio clínico.

El tímpano, como cualquier otro cuerpo, emite una radiación electromagnética cuya potencia está en función de su temperatura. Un patrón de referencia para termómetros óticos que cumpla con la incertidumbre de medición requerida debe tener una fuente de radiación electromagnética cuya potencia represente adecuadamente la temperatura del tímpano.

Para la caracterización metrológica de la fuente de radiación electromagnética se requiere investigar la eficiencia de los materiales para emitir radiación térmica, propiedad conocida como emisividad. Dado que los materiales con valores de mayor emisividad no alcanzan el valor de emisividad efectiva de la cavidad del canal auditivo, también se investigaron diseños de fuentes de radiación que permitieran obtener un valor de emisividad efectiva similar al requerido.

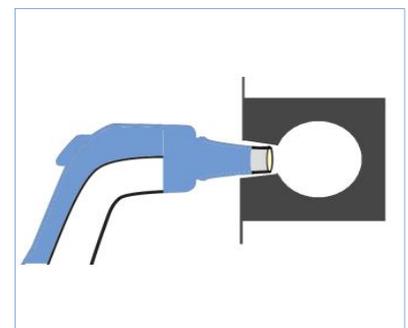


Medición de la temperatura de la membrana del tímpano

Para conseguir la mayor calidad metrológica de este patrón, se realizó un diseño de cavidad esférica con dimensiones que permiten que el termómetro ótico bajo calibración enfoque directamente el fondo de dicha cavidad. Esta particularidad de la cavidad asegura que el termómetro ótico sea operado como si se estuviera utilizando en el oído humano, en donde enfoca directamente al tímpano de la persona. Para medir la temperatura interna de la cavidad, un termómetro calibrado de resistencia de platino se

insertó en el bloque, cerca del fondo de la cavidad esférica.

Mediante una solución analítica se hizo una evaluación de la emisividad efectiva de la cavidad esférica, considerada isotérmica. Posteriormente, para tomar en cuenta condiciones más cercanas a la realidad, la emisividad efectiva se evaluó por medio de algoritmos y herramientas computacionales especializadas. Finalmente, se hicieron correcciones a los valores de temperatura de radiación obtenidos con el patrón de referencia para compensar la diferencia entre la emisividad efectiva de la fuente de radiación y la del canal auditivo.



Calibración de un termómetro ótico en una cavidad isotérmica, cuya temperatura y emisividad son trazables a patrones nacionales

Para controlar la temperatura de la fuente de radiación, el bloque que la contiene se insertó en un horno de pozo seco, como los que se encuentran en la mayoría de los laboratorios de medición y calibración. Se caracterizaron la deriva y los

gradientes de temperatura del patrón verificando la lectura de temperatura en el punto del hielo y realizando mediciones con el bloque en diferentes posiciones y orientaciones dentro del pozo seco.

Como resultado se obtuvo una fuente de radiación para termómetros de radiación clínicos óticos, que representa la temperatura de radiación del canal auditivo y que es trazable al Patrón Nacional de Temperatura (CNM-PNE-2). La fuente de radiación está basada sobre una cavidad en un bloque que puede alojarse en un horno de pozo

seco comercial. La incertidumbre estimada del patrón de referencia es de $0.052\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el intervalo de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El patrón de referencia obtenido representa una diferencia práctica con los diseños de otros Institutos Nacionales de Metrología, que son tan complejos que su manejo impide que salgan del ámbito de los propios institutos. En nuestro caso se consideró que, dado el gran número de termómetros óticos en el país, el CENAM no puede atender directamente su calibración. Por ello, el diseño está planeado para ser

transferido a laboratorios de calibración, de instrumentación del sector salud y de fabricantes.

Los resultados de esta investigación se presentaron en el Noveno Simposio Internacional de Metrología – 9th International Temperature Symposium (ITS9) – en Anaheim, California, en 2012 [21]; y en el Simposio Nacional de Metrología 2012, en Querétaro [22]. Además, un artículo está aceptado para su publicación internacional, otro está publicado en la página electrónica del CENAM y está en trámite.

Evaluación del contenido de humedad en materiales de construcción

Investigadores: Enrique Martines Lopez y Leonel Lira Cortés

El proceso de secado de materiales es complicado, porque involucra un conocimiento exhaustivo de los mecanismos de transferencia de calor y de transferencia de masa en los materiales de interés. Esta interacción fue estudiada por Liukov, quien utilizó la metodología de la termodinámica de procesos irreversibles y formuló un par de ecuaciones de transferencia de calor y masa.

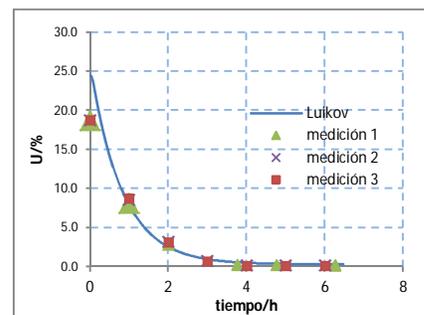
El modelo de Liukov es útil para determinar las condiciones de secado (tiempo y temperatura) antes de realizar los experimentos de medición de humedad contenida en sólidos, lo cual reduce el tiempo de experimentación y se puede aplicar a diversos materiales porosos.

En el CENAM se realizó una investigación basada en el trabajo de Liukov y se obtuvo la solución general analítica del modelo de Liukov en una dimensión para determinar las condiciones de tiempo y

temperatura necesarios para estimar la masa seca de diversos materiales, entre los que se encuentran: cerámica, madera, yeso y ladrillo. No obstante que la solución obtenida es exacta, los coeficientes termofísicos y los parámetros involucrados en las condiciones de frontera sí tienen una incertidumbre de medición, por lo que se evaluó su contribución a la misma.

El modelo de Liukov se ha aplicado por diversos investigadores en el estudio de la transferencia de calor y humedad de varios materiales, sin embargo hasta ahora no se ha realizado un análisis y aplicación similares. En la actualidad distintos investigadores continúan trabajando con este modelo. Los resultados del modelo de Liukov en la región de interés en muestras de madera y ladrillo, se compararon con los experimentales con resultados muy satisfactorios.

Este trabajo de investigación se presentó en Thermophysiscs 2012, Conference Proceedings, Institute of Physics, Slovak Academy of Science in Bratislava. [23]



Comparación de las curvas de secado del modelo Liukov y los resultados experimentales para tres muestras de ladrillo

Sector agrícola: contenido de humedad en granos

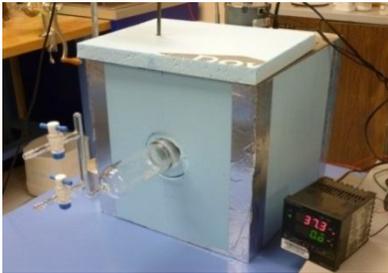
Investigadores: Enrique Martines Lopez y Leonel Lira Cortés

En el sector agrícola y en las industrias de alimentos y farmacéutica, se

necesitan mediciones confiables en el contenido de humedad en sólidos.

El método más confiable para medir el contenido de humedad en sólidos es el

gravimétrico, que consiste en medir la masa inicial (material húmedo), realizar su secado y medir su masa final (material seco) y de ahí obtener su contenido de humedad. Este método se encuentra implementado en el laboratorio de humedad de sólidos del CENAM [24].



Sistema de secado al vacío

Para el secado regularmente se usan hornos que operan a temperaturas mayores de 100 °C, pero con esta técnica, además del agua libre, también se evaporan otros materiales que, por un lado, incrementan la incertidumbre de la medición del contenido de humedad y, por otro, degradan el material. La evaporación de otros materiales es crítico en la determinación del contenido de humedad de algunos productos (granos y farmacéuticos) y es mejor secarlos a

una temperatura menor que la empleada en los hornos convencionales.

Para obtener una técnica alternativa de secado, se investigó el secado por vacío [25]. Se diseñó y construyó una celda la cual tiene dos partes: una para depositar la muestra y la otra contiene un desecante que al hacer vacío, mejora el proceso de secado ya que evita la entrada de aire húmedo a la muestra; en esta celda se puede generar una presión de vacío de aproximadamente 3 kPa y opera desde 40 °C hasta 80 °C.

Los parámetros críticos para las técnicas de secado son la temperatura y el tiempo; para el secado por vacío no hay datos científicos publicados. Para obtener los valores óptimos de temperatura y del tiempo de secado, se obtuvieron distintas curvas como función de la temperatura y del tiempo para muestras de maíz, frijol, arroz y cebada. Además, se continúa con la investigación para obtener curvas de otros materiales como café soluble, harina de trigo, azúcar y materiales farmacéuticos.

Con el método gravimétrico de medición de contenido de humedad se puede emplear la técnica de secado en

horno de convección o por vacío, en un alcance del 9.0 % al 17 % en contenido de humedad en base húmeda con una incertidumbre del 0.2 %. Con el vacío se seca a menor temperatura lo que evita la evaporación de materia volátil.

Los resultados del sistema de secado convencional se presentaron en la conferencia Measurement Science Conference 2012, en los Estados Unidos de Norteamérica. Otros resultados se presentarán en el congreso internacional TEMPMEKO 2013.

Emisividad de los materiales: emisión de energía por radiación electromagnética

Investigadores: Daniel Cardenas García y José Efraín Hernández López

Para el ahorro de energía y el desarrollo tecnológico de los sistemas de generación y manejo de fuentes de energía se debe conocer la emisividad de los materiales: su eficiencia al emitir energía en forma de radiación electromagnética. Esto es particularmente útil en los materiales opacos puesto que al saber su emisividad nos permite también conocer su comportamiento para reflejar la radiación electromagnética.

Para diversas aplicaciones científicas, técnicas e industriales, tales como el diseño

y simulación de estructuras aislantes, la normalización de envolventes de edificios, o el desarrollo de patrones y sistemas de referencia para termómetros y cámaras termográficas, usados en detección de fugas térmicas y circuitos eléctricos sobrecalentados, se requieren valores confiables de emisividad.

La emisividad es una cantidad adimensional, la cual relaciona la radiación electromagnética que emite un material debido a su temperatura, respecto de la emitida por un "emis

perfecto" (cuerpo negro) a la misma temperatura: un cuerpo negro tiene emisividad igual a uno.

Aunque existen bases de datos de valores de emisividad para algunos materiales, la mayoría de los valores que proporcionan carecen de la información técnica mínima necesaria para utilizarla en mediciones confiables: no declaran su incertidumbre, la banda espectral de aplicación, ni su dependencia con la temperatura. Para resolver este problema es necesario un sistema de medición para obtener valores

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

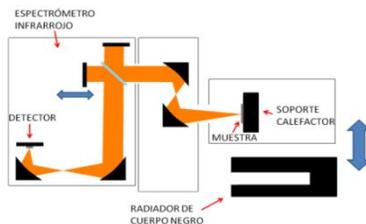
Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

confiables de emisividad.

En CENAM la investigación teórica y experimental sobre emisividad dio como resultado un sistema y un método de medición que cuantifican la emisividad normal espectral de materiales opacos en el intervalo de longitudes de onda de 5 a 20 μm , con temperaturas entre 50 y 250 $^{\circ}\text{C}$ y con incertidumbre de medición del 5 %. Con este sistema se ha medido la emisividad de pinturas y otros acabados sobre metales conductores térmicos, así como de algunos materiales de construcción. El sistema de medición consiste de un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier (EFTIR), un cuerpo negro de referencia, un sistema óptico para guiar la radiación desde la muestra hasta el EFTIR y un soporte-calefactor para sostener y calentar las muestras a medir.

Para garantizar que el sistema y el método de medición son metrologicamente confiables, se hizo una comparación internacional de medición de la emisividad espectral de muestras de pintura entre el CENAM y en el instituto nacional de metrología de Alemania (PTB). Los

resultados de ambos institutos concuerdan dentro de la incertidumbre estimada, es decir, son equivalentes, a pesar de que los arreglos experimentales utilizados son diferentes.

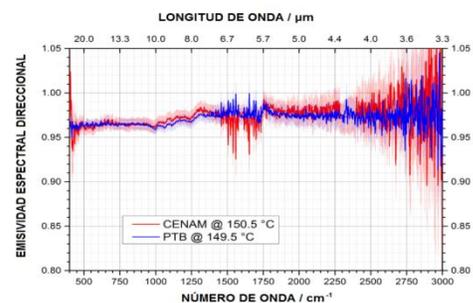


Sistema de medición de emisividad

Por ejemplo, en el PTB, la muestra y su calefactor están en el interior de una cavidad esférica, isotérmica y de alta emisividad diseñada para evitar la radiación parásita de otras fuentes radiantes cuando se realizan mediciones de emisividad espectral a diferentes ángulos [26]. Por otra parte, en el CENAM se mide la emisividad espectral normal, lo que disminuye la influencia de la radiación parásita, pero limita el ángulo de medición. El conocimiento de las diferencias

entre los arreglos experimentales del CENAM y del PTB, nos permitirá mejorar y hacer más robusto nuestro sistema de medición de emisividad.

Debido a la relevancia de los resultados de la comparación, éstos se presentarán en uno de los foros internacionales de mayor prestigio: el Simposio sobre Temperatura y Mediciones Térmicas en la Industria y la Ciencia (TEMPMEKO 2013) que se celebrará en Portugal.



Comparación de resultados al medir una muestra en México y Alemania

Mediciones confiables de temperatura arriba de 1 000 $^{\circ}\text{C}$

Investigadores: Daniel Cárdenas García y José Efraín Hernández López

En procesos productivos de alta temperatura como sucede en las industrias siderúrgica, de vidrio, de cerámica y aeronáutica, entre otras, la medición de la temperatura debe ser confiable, por la afectación económica que resulta de fallas operativas en estos procesos.

En la Escala Internacional de Temperatura de 1990, EIT-90, se establece que para la medición de temperatura por arriba de 962 $^{\circ}\text{C}$ se utilice un termómetro de radiación monocromático y la ecuación de radiación de Planck.

El termómetro de radiación se calibra en alguna de las referencias establecidas por la EIT-90. Las temperaturas de referencia son las de equilibrio térmico de las fases

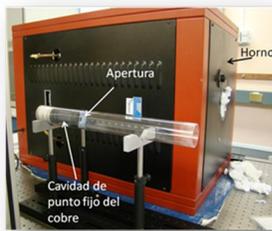
sólida y líquida (punto de solidificación) de cualquiera de estos tres metales puros: plata (961.78 $^{\circ}\text{C}$), oro (1064.18 $^{\circ}\text{C}$) o cobre (1084.62 $^{\circ}\text{C}$). La EIT-90 señala que no se requiere calibrar en los tres puntos, pues es posible obtener resultados equivalentes si se calibra en un solo punto: en principio, un termómetro de radiación calibrado en cualquiera de estos puntos mediría los valores de temperatura asignados a los otros dos, dentro de la incertidumbre experimental.

Sin embargo, investigaciones posteriores a la publicación de la EIT-90, sobre la equivalencia en los puntos de referencia, indican que las discrepancias entre los valores medidos y los definidos por la

Escala son mayores que lo esperado. Este hecho muestra una fuente de incertidumbre en la realización de la Escala: su no unicidad (la medición en un punto fijo de temperatura no coincide con mediciones apartir de otro punto fijo). La solución a este problema es tema de investigación de los grupos de trabajo del Comité Consultor de Termometría (CCT) de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y de varios institutos nacionales de metrología. Por otro lado, se sabe que cuando se calibra un termómetro de referencia en un punto fijo de temperatura y se usa para medir temperaturas más altas (extrapolación), la incertidumbre de la medición aumenta cuadráticamente con el valor de temperatura.

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición



Cavidad de punto fijo de temperatura de cobre para uso con termómetros de radiación monocromática

Los problemas de no unicidad de la Escala y el incremento cuadrático de la incertidumbre de medición de la temperatura por la extrapolación han impulsado en los institutos nacionales de metrología, la investigación sobre las tres referencias de alta temperatura definidas por la EIT-90.

El patrón nacional de temperatura (CNM-PNE-2) desarrollado y mantenido en CENAM tiene como referencia de alta temperatura un termómetro de radiación

monocromático, calibrado a la temperatura de solidificación de la plata (961.78 °C). Este patrón nacional da soporte metroológico a la caracterización de fuentes radiantes, termómetros de radiación y cámaras termográficas que, a su vez, dan trazabilidad a múltiples medidores industriales.

Ampliación de la capacidad de medición del patrón nacional de humedad en gases

Investigadores: Jesús Davila Pacheco y Leonel Lira Cortés

En los últimos años las mediciones de humedad en gas en México se han incrementado. Esto se refleja en el aumento de laboratorios de calibración y la demanda de mejores capacidades de medición en las industrias farmacéuticas, automotriz y fabricación de componentes eléctricos, entre otras. El Patrón Nacional de Humedad, actualmente declarado en un alcance medición de 10 % de humedad relativa (HR) a 95 % HR, da trazabilidad a las mediciones de humedad en México y a las de algunos países de Latinoamérica.

Para atender necesidades de medición a bajos valores de humedad relativa y mejorar las capacidades de medición del Patrón Nacional de Humedad (CNM-PNE-8), se construyó un sistema de generación de humedad que opera con el método de dos presiones y dos temperaturas. Con este sistema se genera humedad en aire en el intervalo de 5 %HR a 60 % HR, con incertidumbres de 0.4 %HR a 1 % HR.

Del modelo físico para un generador de humedad de dos presiones y dos temperaturas [27], se calcularon los

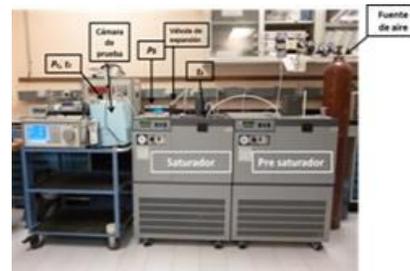
valores de presión y de temperatura para generar una humedad relativa menor que el 5 % a temperatura ambiente (t_c) de 22 °C y presión atmosférica (P_c) de 81 kPa. Con estos valores se diseñó y construyó una cámara de saturación.

El sistema está formado principalmente por un sistema de saturación de vapor de agua y una cámara de prueba.

El sistema de saturación de vapor de agua se mantiene a temperatura controlada en un baño líquido, en esta etapa se mide la temperatura (t_s) y presión en el saturador (P_s). El aire saturado pasa por una válvula de expansión donde la presión de la muestra de aire saturado se reduce adiabáticamente a un valor cercano a presión atmosférica.

Finalmente la muestra se lleva a una cámara de prueba donde se mide la temperatura y presión. Con los valores de presión y temperatura en el saturador y en la cámara de prueba se calculan el valor de humedad relativa y la temperatura de punto de rocío.

Para validar el sistema se compararon los valores generados con el sistema construido contra los medidos con un medidor de punto de rocío. El estudio termodinámico del sistema está en desarrollo para continuar con el diseño de otro sistema con el que se pueda medir una humedad relativa del 2%.



Sistema de generación de humedad por dos presiones, dos temperaturas

Conductividad térmica de materiales aislantes: comparación internacional del patrón nacional de conductividad térmica de materiales sólidos aislantes

Investigadores: Saul García, Leonel Lira y Óscar González

El CENAM estableció y mantiene el patrón nacional de conductividad térmica (CNM-PNE-16), que es un método primario de medición que consiste de un instrumento de placa caliente con guarda, un método de medición, caracterizaciones y estudios que permiten escribir una declaración completa de la incertidumbre de la conductividad en términos de unidades de base del SI.

Como resultado de las investigaciones sobre los flujos de calor; en el borde de la muestra, en el espacio anular de la placa caliente y efectivo sobre la muestra, permitieron establecer sus alcances para materiales sólidos aislantes hasta de 47 mm de espesor con una incertidumbre relativa de 0.8% a 2%.



Preparación del Patrón para la prueba a la temperatura de 10

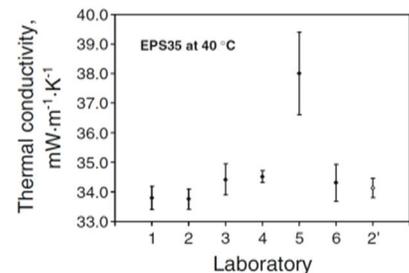
Se participó en una comparación internacional de medición de conductividad térmica en materiales aislantes organizada por el Grupo WG-9 de Propiedades Termofísicas del Comité Consultor de Termometría (CCT) de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) para conocer la compatibilidad de las medidas de conductividad térmica de sólidos aislante del CENAM con las de otros laboratorios y así obtener el reconocimiento internacional de la capacidad de medición y calibración del CENAM.

Participaron 6 laboratorios, de los cuales sólo cuatro, entre ellos el CENAM, cubrieron todas las pruebas que se realizaron a tres diferentes materiales las mediciones se iniciaron en el 2007 y se finalizaron en 2010.

La comparación consistió en la medición de la conductividad térmica de tres muestras: una de lana mineral MW y dos de poliestireno expandido EPS en un intervalo de temperatura de 10 a 40 °C; el protocolo de medición fue de acuerdo según la norma ISO 8302

Se presentan los resultados de la comparación de mediciones de la conductividad térmica del poliestireno expandido a 40 °C; laboratorios participantes: NIST-EUA(1), LNE-

Francia(2 y 2'), NPL- Inglaterra (3), VNIIM-Rusia (4), NIM-China (5), CENAM-México (6).



Este trabajo se inició como un estudio piloto, porque no había antecedentes de este tipo de comparaciones, pero debido a los excelentes resultados fueron aceptados por el CCT como comparación oficial, dentro del marco del acuerdo de reconocimiento mutuo (MRA) y, además, se publicaron en 2012 en la revista International Journal of Thermophysics [28].

Medición de conductividad térmica de materiales de construcción

Investigadores: Saul García, Leonel Lira y Óscar González

La industria de la construcción requiere conocer el valor de la conductividad

térmica de muros, techos, sistemas de iluminación, ventanas, entre otros

componentes de las edificaciones para incursionar en programas de apoyo al

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

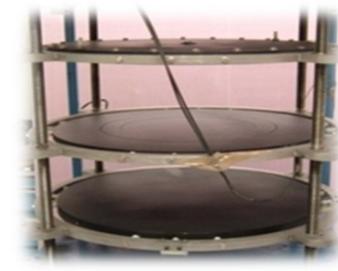
diseño bioclimático, el desarrollo económico sustentable y para el cumplimiento de normas nacionales de eficiencia energética.

El CENAM estableció y mantiene el patrón nacional de conductividad térmica (CNM-PNE-16), para medición de sólidos aislantes de hasta 47 mm de espesor y tiene una incertidumbre de medición relativa de 0.8% a 2 %. Sin embargo, este patrón no es el adecuado para medir muestras como los que se emplean en la industria de la construcción – ladrillos, bloques de arena-cemento, adobe, etc.–, cuyos espesores son generalmente mayores a 47 mm.

Para resolver el problema, se amplió el alcance de las investigaciones realizadas para el establecimiento del Patrón Nacional, para diseñar un sistema de referencia de conductividad térmica para materiales de construcción, capaz de medir muestras

con espesores de hasta 200 mm, con diámetro de 600 mm y con una incertidumbre relativa del 4 %.

Además de medir los materiales de construcción, se pueden producir materiales de referencia que sirven para calibrar equipos medición de conductividad térmica y de flujo de calor; además, se puede apoyar en la caracterización de esos equipos de medición disponibles en laboratorios secundarios y en la capacitación técnica del personal técnico de los mismos.



Aparato de placa caliente con guarda para medir la conductividad térmica de materiales de construcción

Los resultados de esta investigación se presentaron en el Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica (ENME) 2012 [29] y se van a presentar en el Symposium on Temperature on Thermal Measurements in Industry and Science; Tempmeko 2013.

Materia ultra fría para relojes atómicos

Investigadores: Eduardo de Carlos López, Sergio López y Mauricio López

La medición de tiempo tiene un impacto muy importante en la economía toda vez que se trata de la medición que se realiza con mayor frecuencia en una vasta variedad de aplicaciones. Por otro, se trata de la medición de mayor exactitud ya que la realización experimental de la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades (SI), el segundo, tiene una incertidumbre de partes en 10^{16} , la menor entre las 7 unidades base del SI. Este hecho imprime una dinámica muy particular a la investigación y desarrollo alrededor de relojes atómicos ya que existe un amplio número de aplicaciones que motivan contar con mejores sistemas de medición de tiempo.

El CENAM realiza investigación aplicada a sistemas de medición que

materializan la definición de la unidad de tiempo del SI, el segundo, con un nivel de incertidumbre de medición que supera a la de tecnologías comerciales. Los artefactos, por medio de los cuales se materializa la unidad de tiempo del SI, son conocidos como relojes atómicos. Existe una variedad de relojes atómicos, sin embargo los que alcanzan el mayor nivel de exactitud utilizan átomos ultra fríos de Cesio-133.

La temperatura alcanzada en este tipo de relojes atómicos es cercana a -273 grados celsius. En términos precisos, la temperatura de dicha materia ultra fría es menor que una millonésima de kelvin sobre el cero absoluto. El CENAM está desarrollando un reloj atómico de materia ultra fría de Cesio-133, que opera a una temperatura de 600 nano

Kelvin (kelvin) sobre el cero absoluto [30], con el cual es posible materializar la definición del segundo con incertidumbres de partes en 10^{16} .



Reloj atómico de materia ultra fría del CENAM

La investigación y desarrollo que se realiza en el CENAM para la

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

manipulación de átomos con luz, habrá de permitir al CENAM materializar la unidad de tiempo del SI a través del reloj atómico de materia ultra fría con lo cual se aumentará la capacidad para medir el desempeño de los mejores relojes atómicos disponibles comercialmente. Dicha capacidad de medición habrá de beneficiar a la industria que cuenta con relojes atómicos, los sectores de las telecomunicaciones y energía eléctrica (CFE) se encuentran entre los que recibirán dicho beneficio. La investigación asociada al desarrollo del reloj atómico de materia ultra fría aporta también beneficios importantes para otros sectores del país, siendo uno de ellos el sector académico.

La comunidad científica del país se beneficia también con los recursos humanos y materiales que el CENAM ha desarrollado para el enfriamiento de materia con luz y manipulación de estados cuánticos ya que existen intereses compartidos sobre física atómica e información cuántica. Con estos sistemas de medición de tiempo, el CENAM sirve más eficazmente a la sociedad a fin de estar en posición de brindar el soporte científico y tecnológico que el país necesita en materia de medición de tiempo.



Montaje del tubo de vuelo del reloj de materia ultra fría del CENAM

Desarrollo del Patrón Nacional de Peine de Frecuencias Ópticas

Investigadores: Sergio Lopez, Eduardo de Carlos López, Mauricio López, Héctor Castillo Matadamas, José Adín Minguela¹, Mariana Alvarado², Pedro Alberto Resendiz²

¹ División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Guanajuato

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Querétaro

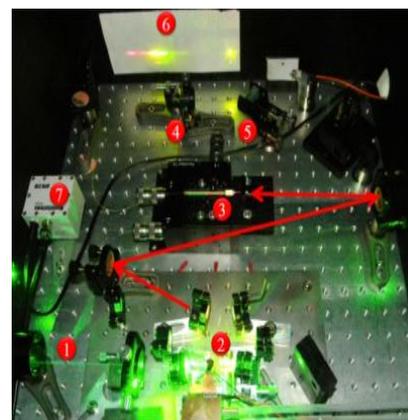
El sector productivo que ha experimentado la mayor revolución tecnológica en las últimas décadas es, sin duda alguna, el de las telecomunicaciones. Servicios de telecomunicaciones instantáneas y globales a precios muy accesibles, y en no pocas ocasiones sin costo, permiten que las sociedades se encuentren altamente interconectadas, favoreciendo una mayor competitividad económica. Para transportar mayores volúmenes de información por un mismo canal, las redes de telecomunicación tienden a utilizar frecuencias cada vez más altas, siendo el límite práctico las frecuencias ópticas.

El desarrollo y la caracterización del desempeño de los diversos componentes que intervienen en redes de comunicación requieren del control preciso de las frecuencias de

transmisión, desde las radio frecuencias hasta las frecuencias ópticas.

El Centro Nacional de Metrología realiza investigación y desarrollo tecnológico en el área de frecuencias ópticas [31,32] a efecto de satisfacer las necesidades de medición del país en este importante sector de la economía. Si bien, la definición de la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades (SI), el segundo, se encuentra en la región de las microondas (9.192 GHz), a fin de enlazar las frecuencias ópticas con la definición del Hz es necesario realizar el escalamiento hacia frecuencias altas en 5 órdenes de magnitud. Dicho escalamiento presenta retos científicos y tecnológicos muy interesantes, ya que la unidad de tiempo es la unidad del SI que se realiza experimentalmente con una incertidumbre de 1×10^{-16} y se

requiere que dicho el escalamiento preserve los altísimos niveles de exactitud en la medición de frecuencia.



Configuración experimental del peine de frecuencias ópticas. 1.- Haz de bombeo, 2.- Cavidad de láser de Ti:Zafiro, 3.-Fibra de cristal fotónico, 4.- Lente colimadora, 5.- Rejilla de Bragg, 6.-Pantalla, 7.- fotodiodo de avalancha

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

Trenes de pulsos de luz ultracortos, con frecuencia de repetición de 1 GHz y tiempos de duración de 15×10^{-15} segundos, permiten generar simultáneamente hasta un millón de líneas de muy alta pureza espectral, cuya frecuencia puede ser determinada hasta con 15 dígitos significativos y cuya estabilidad temporal puede ser de hasta 1×10^{16} para tiempos de promediación de un minuto [32]. Dicho

sistema es muy útil para medir frecuencias ópticas utilizando directamente relojes atómicos de Cesio-133.

Lo anterior ofrece la posibilidad de investigar y desarrollar fuentes de luz que presenten pureza espectral y estabilidad suficientemente altas a fin de incorporarlas en las redes de fibra óptica, con la perspectiva de

incrementar el volumen en el transporte de información dado el altísimo control que puede tenerse en la frecuencias portadoras.

Escalas de tiempo de aplicación crítica

Investigadores: Eduardo de Carlos López, Nélida Díaz, Sergio López, Mauricio López

La importancia económica y social que tiene la medición de tiempo difícilmente puede ser sobre estimada, ya que ésta es la magnitud física más medida. Conservadoramente, en México se realizan más de mil millones de mediciones de tiempo diariamente. Por otro lado, la medición de tiempo representa la medición de mayor exactitud, y es posible hacer medición de tiempo con hasta 17 cifras significativas. La disminución progresiva de la incertidumbre en la medición de tiempo y de intervalos de tiempo, tiene un impacto positivo en el avance de la ciencia y tecnología y, en consecuencia, en el bienestar de la población en general.

La Dirección de Metrología de Tiempo y Frecuencia del Centro Nacional de

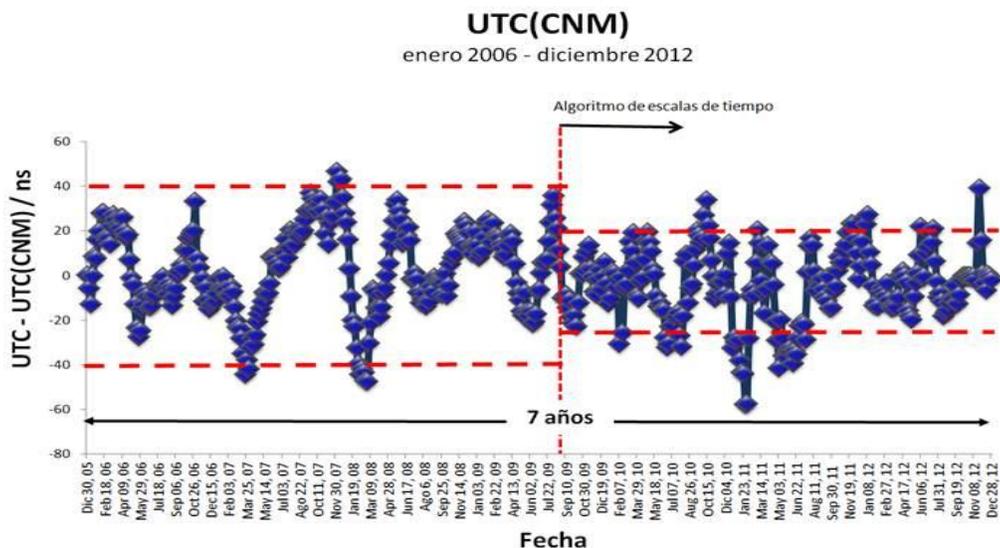
Metrología (CENAM) ha desarrollado la capacidad de materializar la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades (SI), el segundo, con muy alto nivel de exactitud. Dicha realización se mantiene de manera continua y permanente a fin de satisfacer las necesidades de medición de tiempo de los diversos sectores del país, desde necesidades más rutinarias (para conocer la hora del día, por ejemplo), hasta las aplicaciones más demandantes (para sincronizar relojes atómicos en redes de comunicación, entre otras aplicaciones).

La Hora Oficial de los Estados Unidos Mexicanos es generada y diseminada desde los laboratorios del CENAM. Esta se establece a partir de la operación de un

conjunto de relojes atómicos de cesio de alto desempeño. El CENAM realiza una investigación orientada a incrementar la confiabilidad metrológica de relojes atómicos en base a la utilización de algoritmos que garanticen los mayores niveles de exactitud, estabilidad y confiabilidad en la Hora Oficial [33].

La Hora Oficial del país tiene su origen en la escala de Tiempo Universal Coordinado del CENAM, referida como UTC(CNM), misma que se mantiene en comparación internacional permanente a fin de garantizar la equivalencia con escalas de tiempo similares alrededor del mundo [34].

Resultados de la comparación internacional permanente de la escala de tiempo del CENAM UTC(CNM) entre los años 2010 a 2012.



INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

Así mismo, el CENAM realiza investigación sobre nuevos métodos de transferencia de tiempo a fin de transferir la exactitud de sus escalas de tiempo a sitios remotos para fines de medición y calibración de relojes atómicos de muy alto nivel de exactitud sin necesidad de desplazar éstos últimos a los laboratorios del CENAM. Esto representa un beneficio de impacto muy grande para la industria que opera relojes atómicos, ya que éstos pueden ser calibrados por el CENAM sin interrumpir su operación en campo [35]. Adicionalmente, para aplicaciones

altamente demandantes, como en el sector de las telecomunicaciones o en el transporte de energía eléctrica, el CENAM ha desarrollado la capacidad de estabilizar de manera remota, osciladores de alto desempeño (típicamente relojes atómicos de Rubio o Cesio) a su escala de tiempo UTC(CNM), mediante el protocolo (NTP) a través de internet [35]

Con esta acción las características metrológicas de la escala UTC(CNM), son transmitidas a sitios geográficamente remotos. Así, los

relojes atómicos en redes de telecomunicaciones pueden alcanzar un desempeño metrológico similar al Patrón Nacional de Tiempo, por lo que pueden servir para poner en operación capacidades de telecomunicaciones de mayor ancho de banda ancha. La escala de tiempo UTC(CNM) y la Hora Oficial de los Estados Unidos Mexicanos están también al alcance de los ciudadanos y de las empresas de todo tamaño, a través de internet. El CENAM mantiene el servicio de sincronía remota, periódica y gratuita por medio del protocolo Network Time Protocol.

Referencias bibliográficas

- [1] Mariano Botello Pérez, Israel García Ruíz, Development of a Direct Comparison System for Radiofrequency Power Calibration Transfer from 10 MHz to 18 GHz, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2012 . , Washington DC, USA.
- [2] Mariano Botello Pérez, Israel García Ruiz, Dania Covarrubias Martinez, Sistema de referencia para la calibración de detectores de potencia por comparación directa, Simposio de Metrología 2012 , Querétaro, México.
- [3] Susana Padilla Corral, Israel García Ruiz, Ampliación del alcance en frecuencia del patrón nacional de coeficiente de reflexión y transmisión hasta 30 GHz, Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.
- [4] S. Padilla-Corral, I. Garcia-Ruiz, "Estimación de la Incertidumbre de medición de un analizador vectorial de redes." Simposio de Metrologia 2010. October 2010, Queretaro, Mexico. Available at <http://www.cenam.mx/simposio2010/info/pjueves/sm2010-jp04d.pdf>
- [5] Mariano Botello Pérez, Victoria Molina López, Israel García Ruiz. "Realización del Patrón Nacional de Factor de Antena". Simposio de Metrología 2010. Querétaro, Oro. México, del 27 al 29 de octubre de 2010. Disponible en: <http://www.cenam.mx/simposio2010/info/pjueves/sm2010-jp08d.pdf>.
- [6] Israel García Ruiz, Aseguramiento de las mediciones en laboratorios de pruebas de EMC y telecomunicaciones, Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.
- [7] Jesús Huerta Chua, Development of a Measurement Reference System for the calibration of instruments used in conducted emissions testing, Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.
- [8] V. Molina-López, M. Botello-Pérez, I. García-Ruiz, "Establishment of the Open Area Antenna Calibration Site at CENAM", CPEM 2008 Proceedings; pp. 510-511, Broomfield, Colorado, June, (2008).
- [9] V. Molina-Lopez, M. Botello-Perez, I. Garcia-Ruiz, "Validation of the Open-Area Antenna Calibration Site at CENAM", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 4, April 2009, pp. 1126-1134. Identificador 10.1109/TIM.2008.2008473.
- [10] Randolph E. Elmquist, Tian Shen, George R. Jones Jr., Felipe Hernandez-Marquez, Mariano A. Real, and David B. Newell, "Graphene production for electrical metrology", Elektronika (LII), nr 6/2011.
- [11] Carlos David Avilés Castro, Jesús Medina Mejía, Enrique Navarrete García, Dionisio Hernández Villaseñor, Desarrollo de un patrón de efecto Josephson programable en el CENAM para aplicaciones en tensión eléctrica continua y alterna; estado de avance del proyecto, Simposio de Metrología 2012 , Querétaro, México.
- [12] Carlos David Avilés Castro, Enrique Navarrete García, Dionisio Hernández Villaseñor, Improvements of the 10 V CENAM Josephson Voltage Standard to Reach a Standard Uncertainty at 1 nV Level, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2012 , Washington DC, USA.
- [13] Carlos David Avilés Castro, Enrique Navarrete García, Dionisio Hernández Villaseñor, Stéphane Solve, Régis Chayramy, Direct Comparison of Josephson Voltage Standards at 10 V between BIPM and CENAM, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2012, Washington DC, USA.
- [14] Carlos David Avilés Castro, Enrique Navarrete García, Dionisio Hernández Villaseñor, Comparación de patrones de tensión eléctrica continua basados en el efecto Josephson en el nivel de 10 V entre el BIPM y el CENAM, Simposio de Metrología 2012 . , Querétaro, México.
- [15] Jaime E. Chávez, Mario Alatorre, , Marco Antonio Escobar, Sistema de referencia para la medición de propiedades magnéticas de aceros eléctricos, por el método Epstein, Simposio de Metrología 2012 . , Querétaro, México.
- [16] David Avilés, Dionisio Hernández, Enrique Navarrete, Desarrollo de un divisor resistivo para calibración de voltímetros y nanovoltímetros en los intervalos de mV, Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2007, Querétaro, México. Centro Nacional de Metrología (CENAM).
- [17] Marco Antonio Rodríguez, Dionisio Hernández, Validación del método de calibración para multímetros de 8 ½ dígitos en tensión eléctrica continua en el intervalo de medición de 1 mV a 100 mV usando un divisor resistivo, Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.
- [18] Ishii, J., Fukuzaki, T., Kojima, T., Ono, A., "Calibration of Infrared Ear Thermometers" in Tempmeko 2001 Proceedings: 8th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Vol. 2, edited by B. Fellmuth, J. Seidel, G. Scholz, PTB & VDI/VDE-GMA, Berlin, 2002, pp. 729-734

INVESTIGACIÓN APLICADA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN METROLOGÍA

Establecimiento de Patrones Nacionales y Sistemas de Referencia de Medición

- [19] Replacement of mercury thermometers and sphygmomanometers in health care: technical guidance/ edited by Jo Anna M Shimeck, et al. ISBN 978 92 4 354818 0, © OMS 2011
- [20] Fraden, J., "Medical infrared thermometry: review of modern techniques," in *Temperature; Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 6, edited by J.F. Schooly, NY: American Institute of Physics, 1992, pp. 825-830.
- [21] Daniel Cárdenas García, Edgar Méndez Lango, Blackbody for metrological control of otic thermometers, 9th International Temperature Symposium (ITS-9), Anaheim, California.
- [22] Daniel Cardenas García, Edgar Méndez Lango, Método para estimar la corrección en temperatura debida a la emisividad espectral de un calibrador plano calibrado radiométricamente, Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.
- [23] Enrique Martines L., Leonel Lira C., Analysis of Luikov's model in the process of heat and moisture transfer inside of a slab of ceramic, Thermophysics 2012, Bratislava, Slovaquia.
- [24] Martines Lopez E., Lira Cortes L., Evaluación de la incertidumbre de algunos factores de influencia en la determinación del contenido de humedad en granos, Simposio de Metrología 2008, Querétaro México, 2008.
- [25] ISO 711-1985, Cereals and cereal products - Determination of moisture content (Basic reference method), 1985.
- [26] C. Monte y J. Hollandt, *Metrologia* No. 47 (2010), pp. S172-S181.
- [27] Two Pressure, two temperature Humidity Generator, Recommended Intrinsic / Derived Standards Practice, RISP-5, January 2002.
- [28] B. Hay, R. Zarr, C. Stacey, L. Lira-Cortes, U.Hammerschmidt, N. Sokolov, J. Zhang, J.-R. Filtz, N. Fleurence, Analysis of Thermal-Conductivity Measurement Data from International Comparison of National Laboratories, *International Journal of Thermophysics*, June 2012.
- [29] Saúl García Duarte, Oscar González Rodríguez, Metodología para la medición de la conductividad térmica de materiales de construcción, Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica (ENME) 2012, CENAM, Querétaro.
- [30] M. G. Espinosa, E. de Carlos, J. M. López, S. López, L. A. Lizama, New method for temperature measurement of Cold Atom in Cs Fountain Clock, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2012, Washington DC, USA.
- [31] J. A. Minguela Gallardo, Sergio López López, J. Mauricio López Romero, Eduardo de Carlos López, Avances en el desarrollo de un peine de frecuencias para aplicaciones en metrología, Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México
- [32] Josué Adin Minguela G., "Desarrollo de un Láser Pulsado de Ti:Za para Aplicaciones en Metrología", Tesis de Maestría en Física, Dirección de Metrología de Tiempo y Frecuencia, CENAM, y División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Guanajuato
- [33] J.M. López-Romero and N. Díaz-Muñoz, "Progress in the generation of the UTC(CNM) in terms of a virtual clock", *Metrologia* 45 (2008), pp S59-S65.
- [34] Circular T of the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)
- [35] F. Jimenez Tapia, J. Mauricio López Romero, "Sincronización de la hora oficial con servidores NTP Cronos del CENAM", Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.

DIRECCIÓN GENERAL DE METROLOGÍA ELÉCTRICA

Dr. René Carranza López Padilla
Director General del Área de Metrología Eléctrica
rene.carranza@cenam.mx

Asistente Dirección
Micheline Thomas
mthomas@cenam.mx

Dr. Marco Antonio Escobar Valderrama
Director de Mediciones Electromagnéticas
mescobar@cenam.mx

Dr. José Mauricio López Romero
Director de Tiempo y Frecuencia
mauricio.lopez@cenam.mx

Dr. Israel García Ruiz
Director de Radio frecuencias
igarcia@cenam.mx

Dr. Edgar Méndez Lango
Director de Termometría
emendez@cenam.mx

Preparación editorial: Micheline Thomas
Marzo 2013

Centro Nacional de Metrología
Km 4.5 Carretera a los Cués, El Marqués, Querétaro,
C.P. 76246, México
Tel.: (442) 211-0500 al 04
www.cenam.mx