DE LA METROLOGÍA

ammac.mx

Metrología: Precisión para la Competitividad Global

¿Sabías que gracias a los contadores de agua inteligentes podemos mejorar la gestión de nuestros recursos hídricos?

El uso de transductores y controladores como referencia en la calibración de manómetros

La importancia de la calibración de manómetros en la distribución y venta de gas natural

La Estrategia de Transformación Digital del CENAM: las medidas en la infraestructura de la calidad digital del Estado mexicano

La Estrategia CIPM 2030+: Metrología para un mundo en transformación

La GUM y sus limitaciones

La estadística en la Metrología

Aplicación de las técnicas Bootstrap en Metrología

Volumen 24. Año 2026. Nº 1

AMMAC

AMMAC

Carta del presidente



La Asociación Mexicana de Metrología, AC, AMMAC, fue constituida el 12 de julio de 1988 por un grupo de distinguidos Ingenieros y especialistas en diversas disciplinas de la metrología, con la visión de fortalecer la difusión del conocimiento en la ciencia de las mediciones y promover la investigación científica aplicada en México. Desde su origen, AMMAC ha sido un referente técnico en la consolidación de la infraestructura metrológica nacional.

Recientemente, en cumplimiento de nuestros estatutos y con la participación de nuestros asociados, fue electo el nuevo Consejo Directivo de la Asociación Mexicana de Metrología, AC, el cual tengo el honor de presidir y que tendrá la responsabilidad de conducir los trabajos de la organización en esta nueva etapa de fortalecimiento institucional y proyección estratégica. Me acompañan en esta gestión la M.C. María de los Dolores Cerón Toledano como Vicepresidenta; Ing. María de la Concepción Herrera Hernández como Secretaria; Mtro. Arturo César Sánchez Salcedo como Tesorero; así como la Mtra. María Cecilia Delgado Briseño como Vocal, comprometidos a encontrar nuevas e innovadoras formas de participación que aporten valor a sus asociados.

Ante los retos actuales y el crecimiento moderado de la economía en nuestro País, sin duda la Metrología se vuelve un factor crítico para la competitividad de las empresas mexicanas y su relación con los mercados internacionales.

AMMAC desempeña un papel articulador dentro del Sistema de Infraestructura de la Calidad, trabajando de manera coordinada con aliados estratégicos como la Secretaría de Economía, el CENAM, la Dirección General de Normas (DGN), la PROFECO, los Organismos de Evaluación de la Conformidad, la Industria, el Comercio y las Instituciones académicas. Esta colaboración fortalece la alineación entre políticas públicas, desarrollo tecnológico, innovación y transformación digital en sectores claves para el país.

La Metrología no es únicamente una disciplina técnica; es un pilar del desarrollo económico y social. Su impacto se refleja en la certeza de las transacciones comerciales, en la seguridad de los productos y servicios que consumen los ciudadanos, en la confiabilidad de los sistemas eléctricos y energéticos, en la exactitud de los equipos médicos y en la competitividad de nuestras exportaciones, cumpliendo con la normatividad establecida en la Ley de Infraestructura de la Calidad. Sin mediciones confiables, no hay calidad; sin calidad, no hay competitividad.

Agradecemos profundamente la confianza depositada en este nuevo Consejo Directivo por parte de nuestros asociados y aliados estratégicos. Reafirmamos nuestro compromiso de fortalecer la metrología legal e industrial, la normalización, la evaluación de la conformidad y la vigilancia del mercado, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos legítimos de interés público establecidos en la Ley de Infraestructura de la Calidad y al desarrollo sostenible de México.

“Metrología: Construyendo la confianza en la elaboración de políticas” BIPM

— Ing. Carlos Enrique Lares Ponce, Presidente del Consejo Directivo

Tabla de contenidos

1) ¿Sabías que gracias a los contadores de agua inteligentes podemos mejorar la gestión de nuestros recursos hídricos? — pág. 6

2) El uso de transductores y controladores como referencia en la calibración de manómetros — pág. 10

3) La importancia de la calibración de manómetros en la distribución y venta de gas natural — pág. 22

4) La Estrategia de Transformación Digital del CENAM: las medidas en la infraestructura de la calidad digital del Estado mexicano — pág. 26

5) La Estrategia CIPM 2030+: Metrología para un mundo en transformación — pág. 30

6) La GUM y sus limitaciones — pág. 34

7) La estadística en la Metrología — pág. 40

8) Aplicación de las técnicas Bootstrap en Metrología — pág. 46

Editada:

Asociación Mexicana de Metrología
A.C Ixcateopan No. 157 B Col. Letrán
Valle. C.P. 03650. Alcaldía Benito
Juárez, Ciudad de México.
5645668640
www.ammac.mx
info@ammac.mx

Presidente:
Ing. Carlos Enrique Lares Ponce

Vicepresidenta
M. en C. María de los Dolores Cerón
Toledano

Secretaria:
Ing. Rosa María Herrera Hernández

Tesorero:
Mtro. Arturo César Sánchez Salcedo

Vocal:
Ing. María Cecilia Delgado Briseño

Diseño:
M. en C. Ilse Noguez Cerón

Créditos de imágenes: Getty Images

Sobre AMMAC

La Asociación Mexicana de Metrología, A. C. se constituyó el 12 de julio de 1988 para integrar una comunidad de profesionales que se dedican a las mediciones, en todas sus aplicaciones, con la finalidad de difundir el conocimiento en nuestro país y divulgar los avances en la investigación y el desarrollo de nuevos métodos, y procedimientos de medición, nuevas regulaciones y nuevas tecnologías en todos los sectores del quehacer nacional.

Actividades y Servicios

EVENTOS Y CAPACITACIÓN
- Cursos sobre metrología y sus aplicaciones
- Talleres Teórico - Práctico
- Congreso Nacional e Internacional de Metrología
- Encuentros Nacionales de Metrología
- Conferencias y Seminarios

PUBLICACIONES
- Revista “De la Metrología”
- Boletín “Metro visión”

ASISTENCIA TÉCNICA
- Desarrollo de procedimientos y métodos de medición
- Desarrollo de sistemas de gestión de las mediciones
- Recomendaciones para la selección, uso, mantenimiento, calibración y verificación de instrumentos de medición.
- Diagnostico y recomendaciones para la adecuada operación de los organismos de evaluación de la conformidad.
- Metrología en normalización y desarrollo de procedimiento de evaluación de la conformidad (PEC)
- Vinculación con proveedores de servicios de evaluación de la conformidad

¿Sabías que gracias a los contadores de agua inteligentes podemos mejorar la gestión de nuestros recursos hídricos?

Por: Dr. Víctor Martín López
Canal de Isabel II, Centro Español de Metrología



Una solución innovadora para la gestión hídrica mediante IoT

En 2016, el 3GPP (3rd Generation Partnership Project: Proyecto Asociación de Tercera Generación) publicó el estándar Narrow Band-IoT (NB-IoT), marcando un hito en las comunicaciones para dispositivos conectados. Poco después, Canal de Isabel II inició pruebas con esta tecnología, validándola para su aplicación en la telelectura de contadores en la Comunidad de Madrid. Con ello, se convirtió en pionera a nivel nacional e internacional en la implementación de tecnologías IoT en el sector hídrico, haciendo realidad la digitalización del consumo de agua.

¿Por qué NB-IoT? Principales ventajas

La elección de NB-IoT se sustentó en razones estratégicas y técnicas:

- **Estándar abierto,** que garantiza libre acceso a licitaciones.
- **Continuidad y evolución aseguradas,** al estar integrado en el espectro 5G.
- **Portabilidad remota de SIM,** permitiendo cambiar de operador sin intervención física, algo crucial para contratos de 5 años frente a contadores con vida útil de 12 años.
- **Uso de infraestructura existente,** reduciendo costes de despliegue, mantenimiento y operación.
- **Alta protección y adaptación normativa**, especialmente en ciberseguridad.
- **Cobertura geográfica completa**, alcanzando todos los municipios de la región.
- **Excelente penetración de señal,** incluso en sótanos o ubicaciones interiores.
- **Eficiencia energética,** con baterías que permiten más de 12 años de comunicación, alineadas con la vida útil metrológica del contador.

Modelo de gestión y despliegue

Las empresas abastecedoras de agua más importantes establecidas en el país, adoptaron un modelo donde el aprovisionamiento de contadores metrológicamente comprobados y optimizados y el servicio de conectividad se contratan a terceros, manteniendo el control sobre el desempeño del sistema de telelectura.

En el Canal de Isabel II en el momento de la edición de este artículo, se están sustituyendo los contadores tradicionales por dispositivos electrónicos con NB-IoT, ya sea integrados (700.000 unidades) o mediante concentradores en baterías de contadores (900 000 unidades). El plan prevé alcanzar el 100% de telelectura —1,6 millones de contadores — para finales de 2026.

La inversión inicial estimada fue de 200 millones de euros, aunque se han logrado ahorros significativos gracias a licitaciones en cascada. Actualmente, cerca de un millón de contadores ya transmiten datos, con una disponibilidad del 99%, lo que supone un hito tecnológico.



Impacto en la gestión del agua

Optimización del modelo hidráulico
La telelectura permite evolucionar hacia un gemelo digital de la red en tiempo real, mejorando la predicción de demanda y anticipando escenarios de escasez hídrica.

Detección de fugas y reducción del ANR (Agua No Registrada)
El cálculo horario del balance hídrico facilita la detección temprana de fugas, evitando producción y derivación ineficiente, aumentando la garantía de suministro.

Prevención de fraudes
El análisis de patrones de consumo permite identificar irregularidades, como consumos negativos que indican instalación incorrecta del contador.

Relación con los clientes: transparencia y ahorro

- **Información detallada:** acceso a datos horarios y consejos personalizados a través de la oficina virtual.
- **Alertas por fugas:** desde 2023, se notifican consumos anómalos en horas, evitando pérdidas significativas. Hasta la fecha, se han alertado 75 000 clientes, ahorrando más de 15 hm^3 (equivalente a 5 000 piscinas olímpicas).
- **Alarmas personalizadas:** umbrales de consumo para autocontrol y atención a personas dependientes.

Conclusión:

La telelectura de contadores es una herramienta estratégica que mejora la gestión del recurso hídrico y fomenta la concienciación ciudadana. Las implantaciones de estos proyectos de digitalización en el ámbito de la telelectura de contadores de agua posicionan a las empresas abastecedoras de agua como referente y les dotan de recursos para una mejor gestión del recurso hídrico y aporta un valor añadido para los clientes con un alto impacto. Este proyecto posiciona a Canal de Isabel II como referente internacional en la aplicación de IoT en el sector, abriendo la puerta a nuevas soluciones tecnológicas y consolidando la innovación como motor de sostenibilidad.



¿Sabías qué?

Para saber cuánta agua hay en el planeta, la metrología usa la gravedad.

Lo que parece una observación satelital es, en realidad, una cadena de mediciones trazables que convierten variaciones ínfimas de gravedad en datos globales sobre el agua del planeta.

El uso de transductores y controladores como referencia en la calibración de manómetros

Por: Dr. Jorge C. Torres Guzmán
Consultor independiente
tlauica58@gmail.com
442 431 2122



Resumen: En este artículo se exploran los beneficios y procedimientos relacionados con el uso de transductores y controladores de presión como referencias en la calibración de manómetros. Se analizará su precisión, estabilidad a largo plazo, trazabilidad y el impacto que tienen en la confiabilidad de las mediciones en entornos industriales de alta presión.

Palabras clave: Presión, calibración, controladores, transductores.

1. Introducción

En el ámbito de las mediciones de presión, la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos son fundamentales para garantizar el rendimiento y la seguridad de los sistemas industriales. Los manómetros desempeñan un papel crucial en estos procesos, funcionando para monitorear y controlar las variaciones de presión dentro de sistemas complejos.

La calibración de manómetros es esencial para garantizar la seguridad y precisión en una variedad de aplicaciones industriales. Los transductores y controladores de presión, como dispositivos de referencia, han ganado popularidad debido a su capacidad para proporcionar lecturas altamente precisas y trazables.

Este artículo explora las bases técnicas y comerciales de los transductores y controladores de presión de alta exactitud, así como su relevancia en aplicaciones de presión, haciendo especial énfasis en su uso para la calibración de manómetros.

2. Bases técnicas del uso de transductores y controladores

El uso de transductores y controladores como referencia en la calibración de manómetros se fundamenta en la precisión, estabilidad y trazabilidad que ofrecen estos dispositivos, lo que permite realizar mediciones fiables en un intervalo de presiones alto. A continuación, se explican en detalle los principios de funcionamiento, las características técnicas relevantes y los factores para tener en cuenta en su uso.

2.1 Principio de Funcionamiento de los Transductores de Presión.

Los transductores de presión son dispositivos que convierten una presión aplicada en una señal eléctrica que puede ser interpretada y registrada. Su principio de funcionamiento se basa en uno de los siguientes mecanismos que se presentan como ejemplo:

- **Transductores piezorresistivos**

Utilizan un material piezorresistivo que cambia su resistencia eléctrica cuando se deforma bajo presión. Este cambio en la resistencia se mide y se convierte en una señal eléctrica proporcional a la presión aplicada. Son comunes en aplicaciones de alta presión debido a su robustez y capacidad de operar en intervalos de hasta 1 000 MPa.

- **Transductores capacitivos**

Miden la variación de capacitancia entre dos placas cuando se deforma un diafragma por la presión aplicada. Este cambio en la capacitancia es proporcional a la presión y se convierte en una señal eléctrica. Los transductores capacitivos destacan por su alta sensibilidad y precisión en intervalos de presión moderada (media).

- **Transductores de película fina:**

Utilizan una fina película de metal o material semiconductor depositado sobre un substrato que se deforma bajo presión, lo que genera un cambio en las propiedades eléctricas que es medido con precisión. Estos son comunes en aplicaciones donde se requiere alta durabilidad y resistencia a condiciones extremas.



2.2 Principio de Funcionamiento de los Controladores de Presión.

Los controladores de presión, también conocidos como reguladores de presión de precisión, son dispositivos capaces de generar y mantener una presión constante en un sistema, lo que los convierte en herramientas clave para la calibración de manómetros. Su principio de funcionamiento se basa en un circuito de retroalimentación donde un sensor de presión mide continuamente la presión generada y un controlador ajusta la presión para mantenerla en la presión deseada (con un más menos que depende de la calidad del controlador).

Los controladores modernos incluyen algoritmos de control avanzados que permiten compensar variaciones ambientales y de carga, manteniendo la presión de referencia estable durante periodos prolongados. Esto es crucial para obtener mediciones trazables y precisas en entornos de alta presión, donde pequeñas variaciones pueden afectar la calidad de la calibración.

2.3 Características Técnicas de los Transductores y Controladores de Presión.

Al seleccionar y utilizar transductores y controladores para calibrar manómetros, es fundamental tener en cuenta una serie de características técnicas que determinan su rendimiento y precisión:

- **Intervalo de operación:** Los transductores y controladores utilizados en presión deben cubrir intervalos que van desde los pascales hasta miles de MPa (o bar). Los dispositivos deben ser seleccionados en función del intervalo operativo específico del manómetro a calibrar, garantizando que trabajen dentro de su zona de mejor rendimiento (normalmente del 30% al 90% de su intervalo máximo).

- **Exactitud y precisión:** La precisión de un transductor o controlador se refiere a su capacidad para proporcionar un valor de presión cercano al valor verdadero. Esto incluye errores de linealidad, histéresis y repetibilidad. En calibración de presión, los dispositivos deben tener un error de exactitud dentro del 0.001% al 0.05% de la escala completa para cumplir con los requisitos industriales más exigentes.

- **Estabilidad a largo plazo:** Para garantizar la trazabilidad de las mediciones a lo largo del tiempo, los transductores y controladores deben mantener su estabilidad durante periodos prolongados. La deriva a largo plazo debe ser mínima (por ejemplo, < 0.1% por año) para reducir la frecuencia de calibración (o lapsos de confirmación metrológica, ver [1]) y asegurar que las mediciones sigan siendo confiables.

- **Repetibilidad:** Esta es la capacidad del dispositivo de proporcionar la misma lectura bajo las mismas condiciones en mediciones consecutivas. Los transductores y controladores de alta calidad deben tener una alta repetibilidad, ya que cualquier desviación afecta la confiabilidad de las calibraciones realizadas.

- **Linealidad:** Se refiere a la capacidad del dispositivo para producir una salida proporcional a la presión aplicada en todo su intervalo de operación. La falta de linealidad puede introducir errores que dificultan la calibración precisa del manómetro.

- **Tiempo de respuesta:** Los controladores de presión deben ser capaces de generar la presión deseada rápidamente y sin oscilaciones, especialmente en sistemas donde la presión varía frecuentemente. Un tiempo de respuesta lento puede afectar la eficiencia del proceso de calibración.

2.4 Factores Ambientales y Condiciones Operativas

El desempeño de los transductores y controladores puede verse afectado por diversas condiciones ambientales, por lo que es importante considerar:

- **Temperatura**

La mayoría de los transductores y controladores están diseñados para operar dentro de un intervalo de temperaturas específicas (por ejemplo, de -10 °C hasta 50 °C). La temperatura puede influir en la señal de salida del transductor, por lo que se deben aplicar correcciones o usar dispositivos con compensación térmica.

- **Condiciones de humedad**

En entornos con alta humedad, es posible que algunos transductores se degraden más rápidamente, afectando su precisión. El uso de dispositivos sellados o con protección contra la humedad es recomendable.

- **Choques y vibraciones**

En aplicaciones industriales donde hay vibraciones o golpes mecánicos, los transductores de presión deben ser resistentes a estos factores para evitar lecturas erróneas o daños en su estructura, en algunos casos se puede adicionar elementos especiales de amortiguamiento.

2.5 Trazabilidad y Certificado de Calibración

Una característica esencial de los transductores y controladores es la posibilidad de ser calibrados y trazables a patrones primarios nacionales o internacionales, basados en el Sistema Internacional de unidades (SI, [2]). La trazabilidad asegura que los valores de presión medidos por el transductor puedan relacionarse con un patrón reconocido a nivel mundial, lo que garantiza que los resultados obtenidos sean confiables y comparables.

Los transductores y controladores deben ser calibrados periódicamente en laboratorios acreditados o en laboratorios nacionales (de acuerdo con su clase de exactitud) que sigan normas internacionales, como ISO 17025 [3] en calidad y EURAMET, (2020) Calibration Guide No. 17 [4]. La calibración regular y la obtención de certificados de calibración válidos son indispensables para mantener la calidad y trazabilidad de las mediciones.



3. Procedimientos de calibración utilizando traductores y controladores

La calibración de manómetros utilizando transductores y controladores de presión como referencia sigue procedimientos normalizados que garantizan la precisión, la repetibilidad y la trazabilidad de las mediciones. Aquí se describen los pasos esenciales que deben seguirse, las normativas aplicables, los factores que deben tenerse en cuenta durante la calibración y las mejores prácticas para asegurar resultados óptimos.

3.1 Preparación del Proceso de Calibración

La preparación adecuada es fundamental para obtener resultados precisos y confiables. El proceso de calibración comienza con una serie de pasos preliminares:

- **Selección del equipo de referencia**

Los transductores y controladores seleccionados para la calibración deben contar con certificado de calibración y ser trazables a patrones reconocidos. El intervalo de operación del equipo de referencia debe abarcar el intervalo de presión del manómetro a calibrar, manteniéndose en el intervalo operativo del transductor o controlador.

- **Verificación de las condiciones ambientales**

La calibración debe realizarse en un ambiente controlado, ya que la temperatura, la humedad y otros factores ambientales pueden afectar tanto la respuesta de los manómetros como la precisión del equipo de referencia. Normalmente, la temperatura del laboratorio debe mantenerse a los 20 °C ± 2 °C, y las correcciones de temperatura deben aplicarse si fuera necesario.

- **Preparación del manómetro**

Antes de la calibración, el manómetro debe ser inspeccionado para verificar su estado físico y de funcionamiento. Es importante asegurarse de que no haya signos de daño o desgaste, en el caso de los analógicos que la aguja se mueva suavemente y que no haya obstrucciones en los conductos. El manómetro debe purgarse adecuadamente para eliminar cualquier burbuja de aire o impureza que pueda afectar la medición.

3.2 Conexión y Configuración del Sistema de Calibración

Una vez que los equipos están preparados, es necesario configurar el sistema de calibración de manera correcta. Esto incluye:

- **Montaje del manómetro en el banco de calibración**

El manómetro a calibrar se conecta al sistema de presión, asegurándose de que todas las conexiones estén firmes y sin fugas. Se utiliza un sistema de conexión estándar que sea compatible tanto con el manómetro como con el equipo de referencia.

- **Integración del transductor o controlador de presión**

El transductor de presión se conecta en paralelo o en serie con el manómetro a calibrar, dependiendo del diseño del sistema. Es importante asegurarse de que el transductor esté correctamente alineado y configurado para medir el mismo intervalo de presión que se aplicará al manómetro. De preferencia colocarlo a la misma altura que el manómetro a calibrar.

- **Configuración del controlador de presión**

El controlador se utiliza para generar y estabilizar la presión deseada durante la calibración. Se programa el intervalo de presión en el controlador, comenzando con valores bajos y aumentando gradualmente hasta alcanzar el valor máximo de operación del manómetro. El controlador debe ajustarse para mantener la presión de manera estable durante el tiempo necesario para tomar las lecturas.

3.3 Procedimiento de Calibración Paso a Paso

Una vez que todo el equipo está instalado y configurado, se procede a la calibración:

i. **Aplicación de presión máxima:** Se aplica la presión máxima que el manómetro puede medir. En este punto, es crucial asegurarse de que el manómetro no sobrepase su límite nominal, ya que esto podría dañarlo o causar mediciones incorrectas. Se realizan 3 aplicaciones de presión máxima y luego a cero para ejercitar el sistema.

ii. **Aplicación de presiones de referencia:** Se genera una presión inicial baja utilizando el controlador. La presión aplicada se mide tanto en el transductor (o controlador) de referencia como en el manómetro que se está calibrando. Es importante esperar unos momentos para que las lecturas se estabilicen antes de registrar los valores.

iii. **Registro de lecturas:** Se toman las lecturas del manómetro a calibrar y se comparan con las lecturas del transductor de referencia. Esta comparación debe realizarse en al menos cinco puntos dentro del intervalo de operación del manómetro (por ejemplo, al 0%, 25%, 50%, 75% y 100% de su escala). Se debe registrar la lectura del manómetro, la presión aplicada por el transductor y las condiciones ambientales.

iv. **Ajustes intermedios:** Si se detectan desviaciones significativas en las lecturas del manómetro, algunos sistemas permiten ajustar el manómetro antes de realizar la calibración, de lo contrario comunicarse con el responsable del equipo. Las desviaciones normales serán corregidas e incluidas en el certificado de calibración.

v. **Ciclo de retorno:** Después de alcanzar el valor máximo de presión, se debe realizar el ciclo de retorno, donde se disminuye gradualmente la presión y se toman lecturas en los mismos puntos de referencia que se utilizaron durante el aumento de presión. Esto ayuda a identificar la histéresis del manómetro, es decir, cuanto varían las lecturas dependiendo de si la presión está aumentando o disminuyendo.

v. **Repetición del ciclo:** Se recomienda realizar al menos tres ciclos completos de aumento y uno con disminución de presión. Esto garantiza que las lecturas sean consistentes y que cualquier variación pueda ser identificada y corregida.



3.4 Cálculo de Errores y Correcciones.
Los datos obtenidos deben analizarse para calcular los errores del manómetro en comparación con el equipo de referencia. Estos errores incluyen:

- **Error de lectura:** · Se calcula la desviación de las lecturas del manómetro en comparación con los valores de referencia. Una vez realizadas las correcciones correspondientes a las lecturas del patrón (de acuerdo con su certificado).

- **Error de histéresis:** Se compara la diferencia entre las lecturas obtenidas en el ciclo para el ascenso de presión y las obtenidas en el mismo ciclo en el descenso para cada punto de referencia.

- **Error de resolución:** Se toma la resolución del instrumento, de acuerdo con el tipo de manómetro, digital o analógico

- **Error de repetibilidad:** Se analizan las variaciones en las lecturas tomadas en los ciclos de calibración en ascenso

Una vez identificados los errores, con el error de lectura se obtienen las correcciones y con las de histéresis, resolución y repetibilidad se estima la incertidumbre del instrumento (incluyendo la correspondiente al manómetro de referencia).

3.5 Documentación y Certificado de Calibración.
Una vez finalizada la calibración, es importante documentar todos los resultados. El informe de calibración debe incluir como mínimo (ver [3]):

- Los datos del manómetro y el equipo de referencia utilizado, incluyendo su número de serie y los certificados de calibración del patrón o instrumento de referencia.

- Los valores de presión aplicados, las lecturas del manómetro, los errores identificados y la incertidumbre de la medición para cada punto del intervalo del instrumento.

- Las condiciones ambientales durante la calibración.

- La firma del técnico encargado de la calibración.

4. Ventajas y limitaciones del uso de transductores y controladores como uso referencia en la calibración de manómetros

El uso de transductores y controladores como referencia en la calibración de manómetros ha revolucionado el campo de la metrología, ofreciendo numerosos beneficios en términos de precisión y confiabilidad (p. e. [5]). Su implementación también presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas antes de su adopción. A continuación, se detallan las principales ventajas y limitaciones asociadas con el uso de transductores y controladores como referencia en este tipo de calibraciones.

4.1 Ventajas del Uso de Transductores y Controladores como Referencia.

4.1.1 Alta precisión y exactitud.

Una de las principales ventajas de los transductores y controladores de presión es su capacidad para proporcionar mediciones altamente precisas. Los transductores, especialmente los de tipo piezorresistivo y capacitivo, tienen la capacidad de generar señales proporcionales a la presión aplicada con un margen de error muy pequeño (en algunos casos, dentro del 0.01% de la escala completa).

Exactitud constante: Los controladores de presión, por su parte, son capaces de generar y mantener una presión exacta y estable durante todo el proceso de calibración, asegurando que los manómetros sean evaluados bajo condiciones constantes y precisas.

Repetibilidad: Los transductores y controladores también destacan por su excelente repetibilidad. Esto significa que, bajo las mismas condiciones, son capaces de generar resultados consistentes en mediciones sucesivas, algo esencial para garantizar la fiabilidad en procesos de calibración.

4.1.2 Amplio intervalo de operación.

Los transductores y controladores de presión están disponibles en una amplia variedad de intervalos operativos, desde presiones bajas hasta presiones extremadamente altas (más de 1.000 MPa). Esto los convierte en una herramienta versátil y adecuada para la calibración de manómetros en una amplia gama de aplicaciones industriales.

Adaptabilidad a diversas aplicaciones: Su versatilidad permite que puedan ser utilizados en diversas aplicaciones industriales, incluyendo la calibración de manómetros para sistemas de presión en sectores como el petróleo y gas, la energía, la aviación y la manufactura pesada.

4.1.3 Mejora en la trazabilidad.

Los transductores y controladores modernos son dispositivos calibrados en laboratorios acreditados y trazables a estándares internacionales, lo que facilita la certificación de los resultados obtenidos durante la calibración. La trazabilidad es esencial para garantizar que los resultados de las mediciones sean confiables y consistentes con los estándares globales.

Certificación internacional: La trazabilidad a estándares internacionales (como ISO 17025) asegura que las mediciones realizadas con transductores y controladores puedan ser aceptadas y validadas en cualquier parte del mundo

4.1.4 Estabilidad a largo plazo.

Otra ventaja significativa es la estabilidad a largo plazo que ofrecen muchos transductores de alta calidad. La baja deriva de estos dispositivos reduce la frecuencia de recalibración, lo que se traduce en un ahorro en tiempo y recursos para las empresas. En condiciones normales de operación, los transductores de alta calidad pueden mantener su exactitud durante largos periodos, lo que contribuye a la eficiencia del proceso de calibración.

Reducción de mantenimiento: Gracias a su estabilidad, se reduce la necesidad de intervenciones de mantenimiento frecuentes, lo que minimiza los costos operativos a largo plazo.

4.1.5 Fácil integración en sistemas automatizados.

Los transductores y controladores de presión se pueden integrar fácilmente en sistemas de automatización, lo que facilita la digitalización de los procesos de calibración. Esto permite obtener datos en tiempo real, realizar análisis de tendencias y mejorar la eficiencia en el proceso de calibración, minimizando la intervención manual.

Monitorización y análisis de datos en tiempo real: Gracias a la posibilidad de conectarse a sistemas informáticos, se pueden registrar y analizar datos de forma automática, lo que mejora la precisión del seguimiento y la auditoría de los procesos de calibración.

4.2 Limitaciones del Uso de Transductores y Controladores como Referencia

A pesar de los beneficios mencionados, también existen ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta al utilizar transductores y controladores como referencia para la calibración de manómetros.

4.2.1 Costo inicial elevado.
Una de las principales barreras para la adopción de transductores y controladores de presión es el costo inicial de adquisición. Los dispositivos de alta precisión, especialmente los que cubren intervalos de presión muy altos, pueden ser significativamente más costosos que los métodos tradicionales de calibración.

Inversión inicial: La implementación de un sistema de calibración que utilice transductores y controladores requiere una inversión considerable en términos de adquisición de equipos. Esto puede no ser viable para algunas pequeñas o medianas empresas, especialmente si no realizan calibraciones con frecuencia.

4.2.2 Mantenimiento especializado.
Aunque los transductores y controladores de alta calidad son duraderos y estables a largo plazo, también requieren mantenimiento especializado para asegurar que sigan funcionando correctamente. Esto puede implicar recalibraciones periódicas en laboratorios acreditados, lo que puede ser costoso y llevar tiempo.

Calibración periódica: A pesar de su estabilidad, los transductores y controladores deben ser calibrados periódicamente para asegurar que mantienen su exactitud y trazabilidad. La frecuencia de la calibración dependerá del entorno de uso y de las normativas aplicables, pero, en cualquier caso, el tiempo fuera de servicio y los costos asociados deben ser considerados.

4.2.3 Sensibilidad a condiciones ambientales.
Los transductores y controladores de presión son sensibles a las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, que pueden afectar su desempeño si no se toman las precauciones adecuadas. En entornos industriales difíciles, como los que presentan grandes variaciones térmicas o altas concentraciones de polvo y humedad, el rendimiento de estos dispositivos puede verse comprometido.

Correcciones de temperatura: Los transductores deben compensar las variaciones de temperatura para mantener la precisión, y los controladores de presión pueden requerir ajustes si las condiciones ambientales no son estables durante el lapso de medición de cada punto.

Protección ambiental: En muchos casos, se requieren dispositivos con sellado adicional o protección contra condiciones adversas, lo que aumenta los costos y la complejidad de la instalación

4.2.4 Requiere formación técnica avanzada.
El uso eficaz y adecuado de transductores y controladores en procesos de calibración requiere de personal capacitado con conocimientos técnicos especializados, tanto en el equipo como en metrología de presión. Esto incluye la capacidad para interpretar correctamente los resultados (desviaciones, errores, incertidumbres, tendencias, etc.), realizar ajustes en el sistema de calibración y garantizar el mantenimiento adecuado de los equipos.

Capacitación y especialización: Las empresas que utilicen estos dispositivos deben invertir en la capacitación de su personal, lo cual puede incrementar los costos operativos y logísticos.

4.2.5 Dependencia de la calidad del equipo.
La calidad del transductor o controlador de presión es crítica para garantizar resultados precisos. Si se utilizan equipos de baja calidad o si los dispositivos no se mantienen adecuadamente, los errores de medición pueden comprometer la integridad de todo el proceso de calibración.

Selección rigurosa: Es fundamental que los transductores y controladores sean seleccionados cuidadosamente para cumplir con los requisitos específicos de cada aplicación. Los dispositivos de baja calidad pueden afectar negativamente la precisión de las mediciones y, en consecuencia, la seguridad y eficiencia de los sistemas que dependen de ellos.

4.3 Consideraciones Finales.
En conclusión, los transductores y controladores de presión ofrecen una serie de ventajas significativas para la calibración de manómetros, incluyendo una alta precisión, estabilidad y facilidad de integración en sistemas automatizados. Sin embargo, también presentan desafíos como su alto costo inicial, la necesidad de un mantenimiento especializado y la sensibilidad a las condiciones ambientales. Al tomar la decisión de implementar este tipo de tecnología, es importante realizar un análisis detallado de las necesidades específicas de la empresa, la frecuencia de calibración requerida y la disponibilidad de recursos técnicos y financieros para asegurar que se logre un equilibrio adecuado entre costo y beneficio.



5. Recomendaciones.

Con base en los análisis realizados, se sugieren las siguientes recomendaciones para optimizar el uso de transductores y controladores en la calibración de manómetros:

a)Mantenimiento periódico: Implementar rutinas de verificación y recalibración de los transductores y controladores para garantizar que su precisión se mantenga en niveles óptimos.
b)Selección adecuada de los equipos: Al elegir transductores y controladores, es crucial seleccionar dispositivos con intervalos adecuados y con certificados de calibración trazables a estándares internacionales.
c)Formación técnica: Capacitar al personal encargado de la calibración en el manejo y uso adecuado de los transductores y controladores, asegurando el cumplimiento de los procedimientos y las mejores prácticas.
d)Monitoreo de condiciones ambientales: Considerar las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, que pueden afectar el rendimiento de los dispositivos de referencia, ajustando las mediciones o realizando correcciones si es necesario.
e)Evaluación del costo-beneficio: Antes de la adquisición de equipos nuevos, realizar una evaluación del costo-beneficio considerando la precisión y la durabilidad del equipo, asegurando que la inversión justifique la mejora en las mediciones.

5.1 Precisión y Trazabilidad como Pilar Fundamental

Una de las principales conclusiones que se desprende de este análisis es que la implementación de transductores y controladores de presión como referencia aporta niveles superiores de precisión en las mediciones en comparación con métodos tradicionales. Esta alta exactitud es clave en aplicaciones donde las tolerancias de error deben ser mínimas, como en la industria de petróleo y gas, manufactura de componentes críticos y el sector aeroespacial, donde cualquier desajuste puede tener consecuencias graves tanto en la seguridad como en el rendimiento del sistema.

Además, la trazabilidad de las mediciones, garantizada por la certificación y calibración periódica de los transductores y controladores en laboratorios acreditados, asegura que los resultados de las calibraciones sean válidos y consistentes a nivel internacional. Este aspecto es esencial para cumplir con las normativas internacionales y satisfacer las exigencias de auditoría en procesos industriales globales.

5.2 Versatilidad y Amplio Intervalo Operativo.

El uso de estos dispositivos permite cubrir un amplio intervalo de presiones, desde muy bajas hasta extremadamente altas, lo que los convierte en herramientas versátiles capaces de adaptarse a diversas necesidades industriales. Esta versatilidad es particularmente valiosa en sectores donde se trabaja con múltiples sistemas de presión y donde es imprescindible contar con equipos que puedan manejar una amplia variedad de escenarios de calibración.

Esta flexibilidad también mejora la eficiencia operativa, ya que reduce la necesidad de disponer de múltiples equipos de referencia para cubrir diferentes intervalos de presión, simplificando el proceso de calibración y reduciendo costos asociados a la adquisición y mantenimiento de varios instrumentos.





5.3 Integración en Sistemas Automatizados y Eficiencia Operativa.

Una de las ventajas más notables de los transductores y controladores modernos es su capacidad para integrarse en sistemas automatizados, lo que mejora significativamente la eficiencia de los procesos de calibración. La posibilidad de monitorear las mediciones en tiempo real y realizar análisis automáticos reduce la intervención manual, minimiza los errores humanos y permite una mayor agilidad en la obtención de resultados precisos.

Esto, a su vez, optimiza los tiempos de calibración, lo que es especialmente beneficioso para empresas que realizan calibraciones frecuentes o en sistemas críticos donde el tiempo de inactividad debe minimizarse. Además, la capacidad de registrar datos de forma digital facilita la creación de historiales y análisis de tendencias, lo que puede ser valioso para predecir futuras necesidades de calibración y mejorar la planificación de mantenimiento.

5.4 Limitaciones a Considerar: Costo y Requerimientos Técnicos.

A pesar de los múltiples beneficios, es importante tener en cuenta que la implementación de estos sistemas también presenta algunas limitaciones. El costo inicial de adquisición de transductores y controladores de alta precisión puede ser considerable, especialmente para pequeñas y medianas empresas que quizás no justifiquen la inversión si la frecuencia de calibración es baja o si no requieren un nivel de precisión tan alto.

Además, la operación efectiva de estos dispositivos requiere personal capacitado y especializado, lo que puede incrementar los costos operativos en términos de formación y mantenimiento técnico. El personal debe ser capaz de interpretar correctamente las lecturas, realizar ajustes y garantizar el correcto funcionamiento del sistema de calibración.

5.5 Desafíos Ambientales y Estabilidad a Largo Plazo.

Otro factor por considerar es la sensibilidad de los transductores y controladores a las condiciones ambientales, como temperatura y humedad. Aunque los dispositivos modernos incluyen compensaciones térmicas, sigue siendo necesario operar en entornos controlados para garantizar la precisión de las mediciones. Esto plantea desafíos adicionales cuando las calibraciones se realizan en entornos industriales hostiles.

Por otro lado, la estabilidad a largo plazo de estos dispositivos es una ventaja significativa, ya que reduce la necesidad de recalibraciones frecuentes, lo que a su vez minimiza el tiempo de inactividad de los equipos y los costos operativos. Sin embargo, es crucial implementar un programa de mantenimiento y recalibración regular para asegurar que el equipo mantenga su exactitud a lo largo del tiempo.

5.6 Recomendaciones para su Implementación.

Teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones descritas, es recomendable que las empresas que busquen mejorar sus procesos de calibración con transductores y controladores de presión realicen un análisis de costo-beneficio basado en su volumen de calibraciones, la importancia de la precisión en sus operaciones y la disponibilidad de recursos técnicos. La inversión inicial en estos dispositivos puede verse rápidamente compensada por la mejora en la precisión, la reducción de errores y la optimización de los tiempos de calibración.

Para empresas con sistemas críticos que requieren mediciones precisas y trazables, el uso de estos equipos es una opción óptima. Sin embargo, se debe prestar atención a la calidad del equipo adquirido, así como a las necesidades de mantenimiento y recalibración periódica para mantener la exactitud y fiabilidad de las mediciones.

CONCLUSIONES

En este apartado se resumen los puntos clave tratados en el artículo, enfatizando la relevancia de los transductores y controladores como herramientas confiables en la calibración de manómetros. Se destacarán las mejoras en la precisión y trazabilidad, así como la necesidad de continuar investigando y desarrollando tecnologías que mejoren estos procesos.

La utilización de transductores y controladores de presión como referencia en la calibración de manómetros representa un avance significativo en términos de precisión, trazabilidad y eficiencia dentro del campo de la metrología. A lo largo de este artículo, se han analizado en detalle los fundamentos técnicos, los procedimientos de calibración, las ventajas y las limitaciones de estos instrumentos, lo que permite obtener una visión completa de su aplicación en el entorno industrial.

En conclusión, el uso de transductores y controladores como referencia en la calibración de manómetros representa una evolución en el campo de la metrología industrial, ofreciendo una combinación de precisión, eficiencia y trazabilidad que es difícil de igualar con métodos más tradicionales. Sin embargo, su adopción debe sopesarse cuidadosamente contra los costos iniciales y los requisitos técnicos que implica su implementación. Para aquellas empresas que exigen altos estándares de calidad en sus procesos de calibración, estos dispositivos representan una inversión estratégica a largo plazo que puede mejorar tanto la seguridad como la eficiencia operativa.

REFERENCIAS.

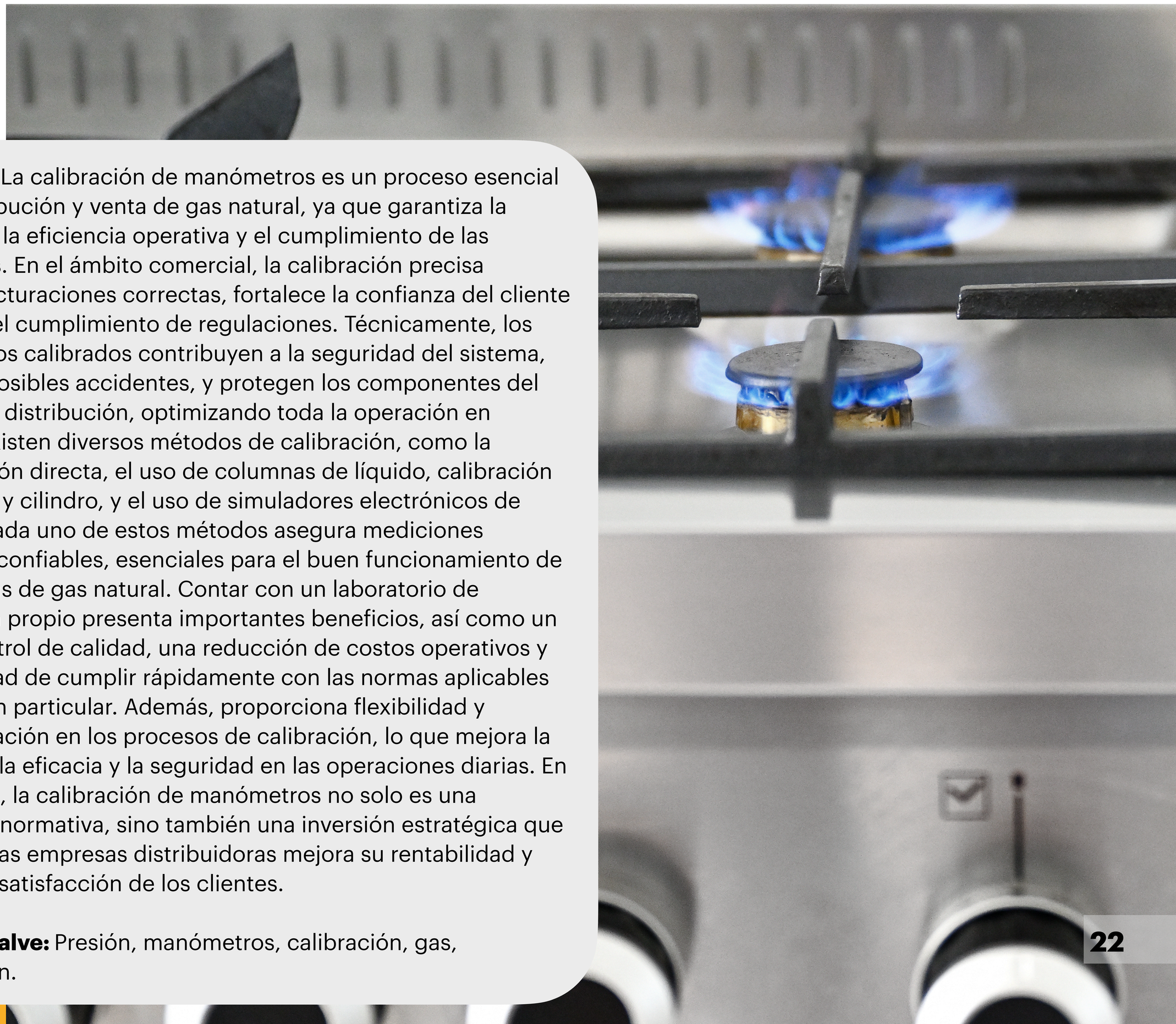
[1] Organización Internacional de Normalización. Sistemas de gestión de las mediciones. ISO 10012:2003(es).
[2] Oficina Internacional de Pesas y Medidas – BIPM. El Sistema Internacional de Unidades (SI). 8ª Edición (2006).
[3] Norma ISO/IEC 17025 - Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración: Sitio web de ISO. Tercera edición (2017).
[4] EURAMET. Guidelines on the calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers. EURAMET Calibration Guide No. 17 version 4.1 (09/2022).
[5] Anfield Sensor Inc. Pressure Transducers – Types, Applications, and How They Work. Web page: July 24, 2023.



La importancia de la calibración de manómetros en la distribución y venta de gas natural

Por: Dr. Ricardo Tristán Dávila
Laboratorio de Naturgy Servicios, Industrias del Oriente No.3655, Col. Jardines de San Rafael, Guadalupe, N. L
+52 81 1788 8787 rtristan@naturgy.com

Por: Dr. Jorge C. Torres Guzmán
Por: Dr. Jorge C. Torres Guzmán
Consultor independiente
tlauica58@gmail.com
442 431 2122



Resumen: La calibración de manómetros es un proceso esencial en la distribución y venta de gas natural, ya que garantiza la seguridad, la eficiencia operativa y el cumplimiento de las normativas. En el ámbito comercial, la calibración precisa asegura facturaciones correctas, fortalece la confianza del cliente y permite el cumplimiento de regulaciones. Técnicamente, los manómetros calibrados contribuyen a la seguridad del sistema, evitando posibles accidentes, y protegen los componentes del sistema de distribución, optimizando toda la operación en general. Existen diversos métodos de calibración, como la comparación directa, el uso de columnas de líquido, calibración con pistón y cilindro, y el uso de simuladores electrónicos de presión. Cada uno de estos métodos asegura mediciones precisas y confiables, esenciales para el buen funcionamiento de los sistemas de gas natural. Contar con un laboratorio de calibración propio presenta importantes beneficios, así como un mayor control de calidad, una reducción de costos operativos y la capacidad de cumplir rápidamente con las normas aplicables al sector en particular. Además, proporciona flexibilidad y personalización en los procesos de calibración, lo que mejora la eficiencia, la eficacia y la seguridad en las operaciones diarias. En conclusión, la calibración de manómetros no solo es una necesidad normativa, sino también una inversión estratégica que protege a las empresas distribuidoras mejora su rentabilidad y asegura la satisfacción de los clientes.

Palabras calve: Presión, manómetros, calibración, gas, distribución.

Introducción

La presión es una magnitud que cubre casi 20 décadas de medición in iniciando desde ultra alto vacío (10-9 Pa) hasta ultra alta presión (1010 Pa) y se utiliza en variados procesos tanto industriales como científicos (ver Figura 1). En la industria del gas natural se utiliza presión media (entre 1 kPa y hasta 10 MPa); la precisión es fundamental para garantizar la seguridad, la eficiencia y la rentabilidad en cada etapa del proceso de distribución y venta.

Los manómetros, instrumentos usados para medir la presión en sistemas de gas, son esenciales para asegurar condiciones operativas adecuadas tanto para la entrega segura del gas como para el cumplimiento de normas aplicables. Para que estos instrumentos funcionen correctamente, es crucial realizar calibraciones periódicas y trazables. Ver por ejemplo normas [1, 2, 3] y artículos relacionados [4, 5, 6, 7, 8].

Este artículo explora la importancia de la calibración de los manómetros utilizados en la distribución y en la comercialización de gas natural, destacando los métodos de calibración, los beneficios comerciales y técnicos, y las ventajas de tener un laboratorio de calibración propio en una empresa de distribución y venta de gas.

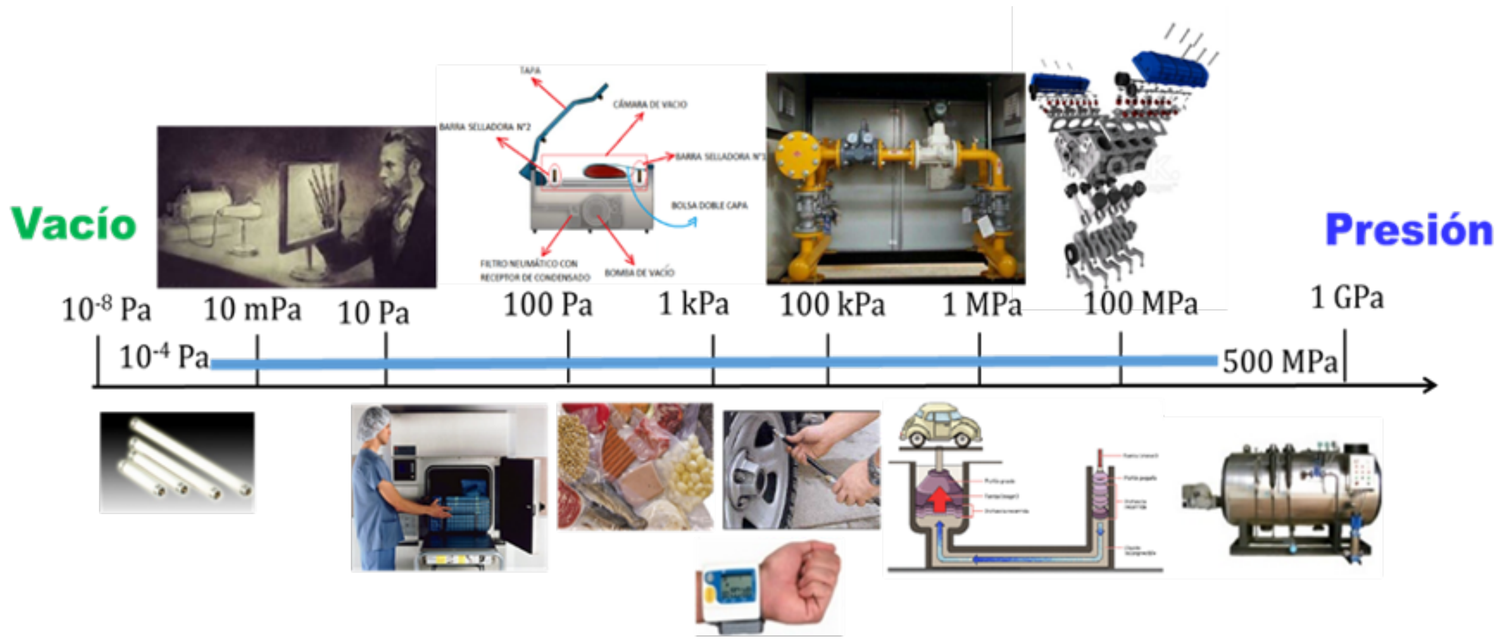


Figura 1. Aplicaciones de metrología de presión y capacidades en México del Centro Nacional de Metrología, CENAM, de México.

2. Bases comerciales

La calibración de manómetros tiene un impacto directo en la eficiencia operativa y en la optimización de costos en la venta de gas natural. Desde el punto de vista comercial, mantener los manómetros calibrados ofrece los siguientes beneficios:

A. Exactitud en la facturación: Un manómetro mal calibrado puede generar lecturas imprecisas, afectando la facturación de los clientes y el cálculo de la cantidad exacta de gas suministrado. Esto puede provocar sobrecostos o pérdidas financieras, afectando en unos casos al cliente en otros a la empresa distribuidora, pero en ambos casos se cuestiona la operación confiable del distribuidor.

B. Confianza del cliente: En la distribución de gas, la confianza del cliente es crucial. Equipos correctamente calibrados aseguran que las mediciones sean precisas y que la facturación sea justa y transparente, lo que fortalece las relaciones comerciales y la reputación de la empresa.

C. Cumplimiento normativo: Las regulaciones gubernamentales exigen el uso de instrumentos de medición correctamente calibrados para asegurar la seguridad y la precisión. El incumplimiento de estas normativas puede resultar en multas, sanciones e incluso la suspensión de las operaciones.

3. Bases Técnicas

Desde un punto de vista técnico, la calibración de manómetros es esencial para garantizar la seguridad y el rendimiento eficiente del sistema de distribución:

i. Seguridad: Un manómetro fuera de calibración puede no detectar una sobrepresión peligrosa en el sistema de gas, aumentando el riesgo de accidentes graves, como explosiones o fugas. La calibración asegura que las lecturas reflejen con precisión las condiciones reales del sistema.

iii. Protección del equipo: Las variaciones de presión no detectadas o mal medidas pueden dañar los componentes del sistema, como tuberías y válvulas, generando reparaciones costosas o interrupciones en el servicio. También pueden afectar a los instrumentos de medición ocasionando mediciones inadecuadas, requerimiento de ajuste o reparaciones que finalmente necesitarán una nueva calibración del instrumento.

iv. Eficiencia operativa: La calibración garantiza que el sistema funcione dentro de los parámetros adecuados, optimizando el flujo de gas y mejorando tanto la entrega como el consumo energético.

4. Métodos de Calibración de Manómetros

Existen varios métodos de calibración que garantizan que los manómetros funcionen correctamente. Los más comunes incluyen:

a. Comparación directa: Este método consiste en comparar el manómetro que se va a calibrar con uno de referencia que ha sido calibrado previamente y cuya precisión es conocida (con trazabilidad a patrones nacionales).

El manómetro de referencia debe tener una incertidumbre de medición menor que el dispositivo bajo prueba. ¿Qué tan menor? Eso depende de la norma que se utilice. Ver un ejemplo en la figura 2.

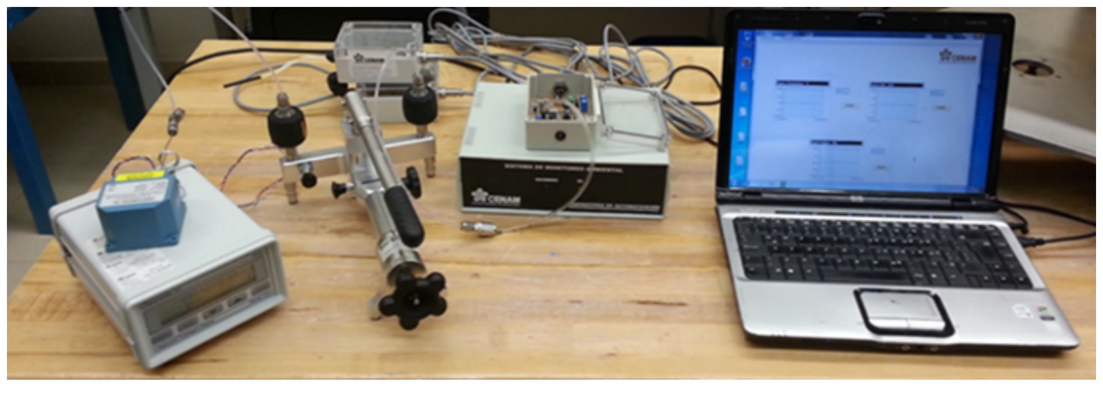


Figura 2. Calibración de manómetro por comparación directa.

b. Calibración con balanza de presión: La balanza de presión utiliza masas y un conjunto de pistón y cilindro para generar una presión controlada, ver figura 4. Este método es muy preciso y se utiliza en laboratorios de calibración de alta exactitud.

Sin embargo, pueden utilizarse dos tipos de balanzas de presión, masas en presión (balanzas industriales) o calibración del área efectiva del pistón cilindro (balanzas de alta exactitud).

c. Calibración balanza de presión: La balanza de presión utiliza masas y un conjunto de pistón y cilindro para generar una presión controlada, ver figura 4. Este método es muy preciso y se utiliza en laboratorios de calibración de alta exactitud. Sin embargo, pueden utilizarse dos tipos de balanzas de presión, masas en presión (balanzas industriales) o calibración del área efectiva del pistón cilindro (balanzas de alta exactitud).

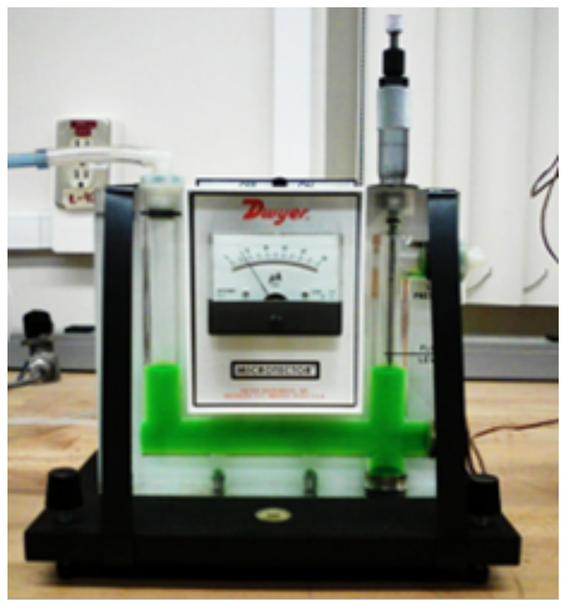


Figura 3. Columna de líquido.



Figura 4. Balanza de presión de alta exactitud con ensamble pistón cilindro y masas

d. Controladores de presión: Los controladores de presión permiten generar presiones controladas de forma rápida y precisa, especialmente útil para la calibración de manómetros digitales en diferentes intervalos de presión, tanto positiva como negativa y barométrica. Ver figura 5.



Figura 5. Ejemplo de calibración de presión barométrica con controlador de presión.

5. Beneficios de contar con un laboratorio de Calibración

Para un distribuidor de gas natural, contar con un laboratorio de calibración propio ofrece ventajas considerables, tanto desde una perspectiva comercial como técnica y a la vez permite ahorros económicos y de tiempos de operación:

I. Control de calidad y rapidez: Tener un laboratorio propio permite realizar calibraciones internas sin depender de terceros, lo que acelera el proceso de verificación o calibración y garantiza que los manómetros estén siempre en condiciones óptimas de funcionamiento (exactitud e incertidumbre conocidas). Esto es crucial para evitar paro de operación innecesariamente en la distribución de gas.

II. Reducción de costos: Al realizar calibraciones internamente, se reducen significativamente los costos relacionados con el envío de equipos a laboratorios externos y el tiempo de inactividad asociado a ello. Además, un laboratorio propio permite programar calibraciones regulares sin afectar las operaciones diarias, así como llevar a cabo verificaciones intermedias o preventivas cuando sea conveniente.

III. Cumplimiento normativo inmediato: Los laboratorios de calibración internos permiten asegurar que los manómetros siempre cumplan con las normativas vigentes, facilitando auditorías y certificaciones. Esto minimiza el riesgo de sanciones o penalizaciones por incumplimiento.

IV. Flexibilidad y personalización: Un laboratorio propio ofrece la flexibilidad de calibrar diferentes tipos de manómetros según las necesidades específicas de la empresa. Además, se pueden implementar procedimientos personalizados que se adapten mejor a los requisitos operativos del distribuidor.

Conclusiones

La calibración de manómetros es un proceso indispensable para la distribución segura y eficiente de gas natural. A nivel comercial, garantiza la precisión en la facturación y el cumplimiento de normativas tanto técnicas como regulatorias, mientras que en el aspecto técnico asegura la seguridad y el buen funcionamiento del sistema.

Contar con un laboratorio de calibración propio amplifica estos beneficios, permitiendo a los distribuidores mejorar su control de calidad, reducir costos y cumplir con los estándares de la industria de manera más eficiente. La inversión en instalaciones y equipamiento de calibración, por lo tanto, no solo protege a la empresa, sino que también refuerza la confianza de los clientes y asegura operaciones fluidas y rentables.



REFERENCIAS

[1] Organización Internacional de Metrología Legal. (2019). Normativa de calibración para instrumentos de medición de presión (OIML R 85). https://www.oiml.org
[2] Asociación de Distribuidores de Gas Natural. (2020). Recomendaciones técnicas para la calibración de equipos de medición en la industria del gas (Technical Bulletin). https://www.adgn.org
[3] Instituto Nacional de Normalización. (2021). Norma de control de presión en la distribución de gas natural (NCH 2351). https://www.inn.cl
[4] Torres Guzmán, J. C., Moreno, P., Olvera Arana, P. (2004, junio). Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la medición de presión con manómetros. CENAM/ema. Querétaro, México.
[5] Torres Guzmán, J. C., Corro Fuentes, O., Mendiola Ortiz, F., Muñoz Roldán, F., Obregón, D., Santander Romero, L. (2008, abril). Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en los servicios de calibración de manómetros, transductores y transmisores de presión de elemento elástico. CENAM/ema. Querétaro, México.
[6] Torres Guzmán, J. C., Olvera Arana, P. (2005, diciembre). Manómetros secundarios (1era ed.). CENAM. Querétaro, México.
[7] Manríquez, E., Torres Guzmán, J. C., Aranzolo Suárez, J. (2016, septiembre). Comparativo de las normas más utilizadas en la calibración de balanzas de presión. Simposio de Metrología 2016.
[8] López, J. M., Torres Guzmán, J. C., Aranzolo Suárez, J. (2016, septiembre). Comparativo de las normas más utilizadas en la calibración de manómetros en presión relativa. Simposio de Metrología 2016.

La Estrategia de Transformación Digital del CENAM: las medidas en la infraestructura de la calidad digital del Estado mexicano

Por: M. en C. Arquímedes Ruiz Orozco
Director del Centro Nacional de Metrología

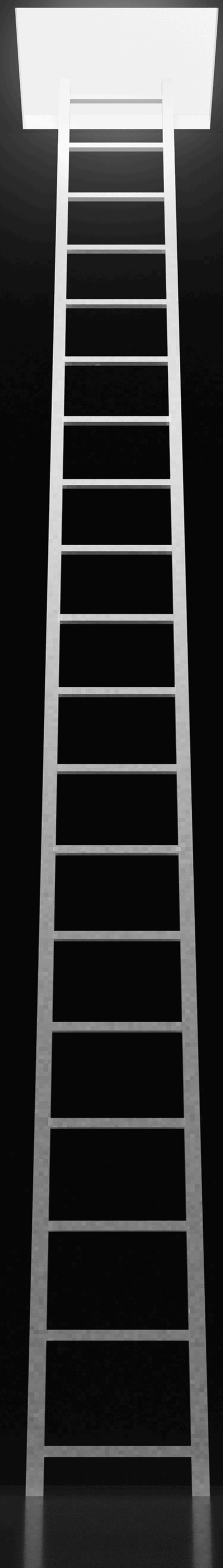


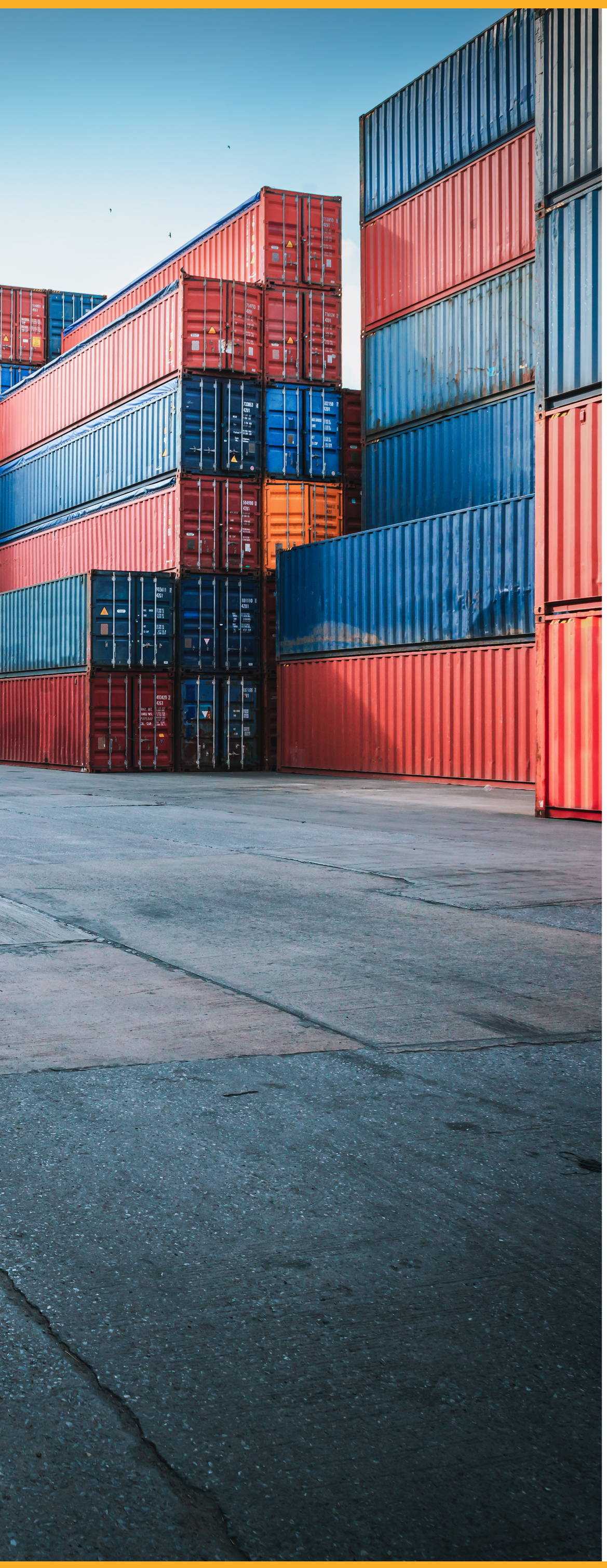
La transformación digital del Gobierno Federal incorpora la tecnología digital a los procesos gubernamentales para modernizar la forma en que el Estado planea, regula, decide y presta servicios a usuarios y a la sociedad. En este esfuerzo, los usuarios de los servicios públicos, la industria y los reguladores requieren confiar en los contenidos de la información, en los datos, tener seguridad y certeza en los valores, y disponer de mediciones confiables para la toma de decisiones, apoyar a incrementar a la productividad y a mejorar la competitividad de la industria nacional.

La Secretaría de Economía, coordina al Centro Nacional de Metrología (CENAM) como el Instituto Nacional de Metrología de México por su impacto técnico, económico y comercial en el país. El CENAM a su vez, fortalece la base técnico-científica en materia de medidas que sustentan el desarrollo económico, el comercio justo y la inserción del país en los mercados internacionales. El CENAM ha definido, diseñado e implementado una Estrategia de Transformación Digital (ETD) que sitúa a la metrología como un componente central que fortalece a la Infraestructura de la Calidad en el proceso de modernización de las dependencias y sectores.

La Infraestructura de la Calidad, a nivel internacional, se encuentra conformada por la metrología, la normalización y estandarización, la acreditación, la evaluación de la conformidad y la vigilancia del mercado. En México, esta infraestructura constituye uno de los pilares más relevantes para el bienestar social y el desarrollo económico, ya que de ella depende la calidad de vida de la población, en aspectos de salud pública, la calidad e inocuidad de los alimentos, el control y la protección del medio ambiente, la equidad en las transacciones comerciales nacional e internacional.

En un entorno cada vez más digital, la Infraestructura de la Calidad evoluciona hacia esquemas interconectados, interoperables y sustentados en información confiable y disponible en tiempo real. La Estrategia de Transformación Digital del CENAM parte de una convicción fundamental: una Infraestructura de la Calidad digitalizada y una transformación digital sólida del Gobierno Federal. La modernización de los servicios públicos, la mejora regulatoria y la simplificación administrativa se soportan en mediciones confiables, datos trazables y procesos técnicos que operan de manera integrada en el entorno digital.





¿Cómo se logra esto en el CENAM?; En nuestro país, el CENAM es responsable de Desarrollar, establecer, conservar los patrones nacionales de medida, los sistemas de medición de referencia y de los materiales de referencia certificados, que fungen como la columna vertebral técnica de esta infraestructura. Su estrategia digital impulsa y apropia a la digitalización bajo los principios de Digitalización de la Información FAIR (Encontrables-Localizables-Identificables, Accesibles, Interoperables y Reutilizables por sus siglas en inglés), la automatización de los procesos de medición y calibración, así como la integración de servicios metrológicos digitales. Al mismo tiempo, alinea a la metrología nacional con la Infraestructura de Calidad Digital a nivel internacional, fortaleciendo la interoperabilidad, la uniformidad y la cooperación global.

En la siguiente figura se conceptualiza los 8 engranes de la ETD del CENAM:



En la figura anterior, un ejemplo del engrane en la Automatización del Proceso de Medición es el desarrollo del Certificado de Calibración Digital. El Certificado de Calibración de los instrumentos de medida es un activo digital estructurado, interoperable y trazable, y se visualiza completar la integración de manera directa a los sistemas regulatorios, plataformas de evaluación de la conformidad y procesos industriales y a instrumentos de medida. El certificado digital garantiza la validez de los valores de las medidas y permite su uso para verificar y comprobar de manera automática y confiable en tiempo real, la reutilización y el ajuste de datos y valores y el análisis de información metrológica en entornos digitales

El certificado de calibración digital materializa varios de los objetivos de la Estrategia de Transformación Digital del CENAM.

Contribuye a la digitalización de la información bajo principios FAIR, fortalece la ciberseguridad al asegurar la integridad y autenticidad de los datos, facilita la incorporación de los valores medidos para la automatización de procesos y habilita nuevos esquemas de uso de información de las medidas en la metrología legal digital. Al ser interoperable, su uso, se consolida como un puente natural entre la metrología, la normalización, la evaluación de la conformidad, la acreditación y la regulación técnica, reduciendo tiempos, costos y riesgos de error.



Este tipo de desarrollos permite que la transformación digital se sustente en mediciones confiables y comparables, condición indispensable para la toma de decisiones basada en evidencia. De esta forma, la metrología digital se consolida como un habilitador estratégico de la acción gubernamental y de la competitividad económica, diferenciando su función técnica tradicional.

La digitalización de la información metrológica permite esquemas más ágiles de la operación y gestión de información en la evaluación de la conformidad. La metrología legal digital establece las bases tecnológicas para procesos de normalización, aprobación de modelo e inspección de instrumentos de medición sujetos a control metrológico legal, haciéndolos más eficientes y transparentes. La ciberseguridad metrológica protege la integridad de los datos que sustentan decisiones regulatorias y comerciales, con el soporte de la Red Nacional de Tiempo del CENAM garantiza trazabilidad temporal y soberanía tecnológica en infraestructuras críticas. A ello se suma el uso de inteligencia artificial en Metrología (IAM) aplicada a las mediciones, que amplía las capacidades de análisis predictivo, calibración avanzada y control de calidad de proceso y productos.

Al integrar metrología, datos, automatización, inteligencia artificial y ciberseguridad —y al materializar estos principios en desarrollos como el certificado de calibración digital—, el CENAM fortalece sus capacidades institucionales y proporciona al Gobierno Federal bases técnicas sólidas, confiables y soberanas para su transformación digital.

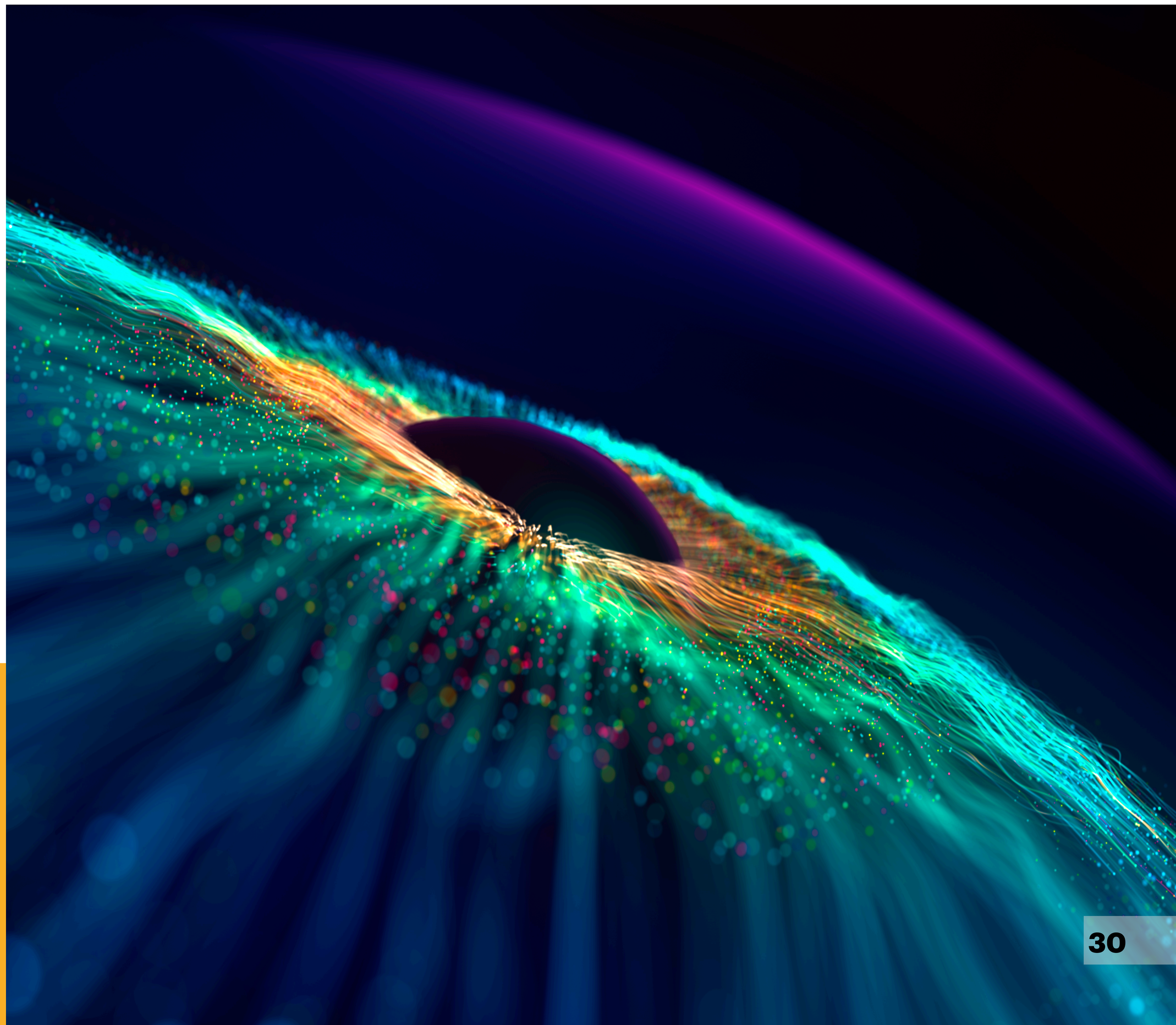
La implementación de la ETD del CENAM representa un paso decisivo hacia la modernización integral de la Infraestructura de la Calidad en México, y se mantendrá con enfoque sistémico para producir impactos significativos de manera positiva, cumplir con el reto de consolidar los procesos con una mayor eficiencia y confiabilidad a las ofertas técnicas.
Así, la digitalización del Estado mexicano se apoya en una Infraestructura de la Calidad moderna e interoperable, orientada al desarrollo económico, la innovación y el bienestar social, asegurando que, en el entorno digital, lo que se mide, se regula y se ofrece a la sociedad esté bien hecho desde su fundamento técnico.

Mayor Información

servtec@cenam.mx
www.cenam.mx

La Estrategia CIPM 2030+: Metrología para un mundo en transformación

Por: M. en C. Ezequiel E. Noguez Sáenz
Sistemas Integrales de Calibración y Aseguramiento Metrológico (SICAMET)
Juan Aldama Sur 1135. Col. Universidad. Toluca, Estado de México.
enoguez@sicamet.net



Introducción

La metrología —la ciencia de la medición— constituye la base invisible que sostiene el comercio internacional, la innovación tecnológica y la confianza social en ámbitos tan diversos como la salud, la energía o la seguridad alimentaria. El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), junto con el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), ha lanzado la Estrategia 2030+, un plan que busca anticipar y responder a los desafíos científicos, tecnológicos y sociales de las próximas décadas.

Antecedentes

Desde la Convención del Metro (1875), el sistema de unidades evolucionó de patrones físicos (como el prototipo internacional del kilogramo) hacia definiciones basadas en constantes universales. La reforma de 2018–2019 redefinió las siete unidades básicas del SI en términos de constantes fundamentales (Planck, Avogadro, velocidad de la luz, etc.), consolidando un sistema verdaderamente universal y "a prueba de futuro". Este cambio abrió la puerta a nuevas realizaciones de las unidades, más precisas y flexibles, y marcó el inicio de una etapa en la que la metrología se conecta directamente con la revolución digital y los retos globales.

Cinco ejes estratégicos

La Estrategia 2030+ se articula en torno a cinco líneas de acción:

1. Responder a necesidades emergentes de la metrología: anticipar demandas derivadas de la salud, el clima, la energía y la digitalización.

2. Abordar desafíos científicos clave: consolidar la realización práctica del SI y redefinir la unidad de tiempo (el segundo).

3. Profundizar la colaboración internacional: integrar la metrología en agendas globales de sostenibilidad, comercio y salud.

4. Revisar la membresía del sistema: ampliar la participación hacia los 83 Estados miembros de la ONU que aún no forman parte.

5. Modernizar la gobernanza y operaciones: fortalecer transparencia, reglas de procedimiento y estructuras de gestión.

Los siete *'Grand Challenges'*

El CIPM identifica siete grandes retos que requieren coordinación internacional y enfoques multidisciplinarios:



Cambio climático y medio ambiente: mediciones confiables para monitoreo y políticas de mitigación.

Seguridad alimentaria: trazabilidad y control de contaminantes para garantizar inocuidad.



Nueva metrología: trazabilidad mediante sensores distribuidos, estándares intrínsecos y big data.





Salud y ciencias de la vida: soporte crítico para diagnósticos, terapias y control de pandemias.

Transformación digital: infraestructura global para datos confiables, certificados digitales y validación de IA.







Energía: apoyo a la transición energética y al equilibrio entre seguridad, costo y emisiones.

Manufactura avanzada (Industria 4.0): trazabilidad en procesos digitales e interconectados.

Desafíos científicos clave

- Redefinición del segundo: la unidad de tiempo será revisada con base en tecnologías cuánticas más precisas.
- Realización práctica del SI: aprovechar constantes universales para reducir incertidumbres en escalas micro y nano.
- Metrología de sistemas: caracterización de redes de sensores heterogéneos y gestión de grandes volúmenes de datos.

Gobernanza y universalidad

El sistema actual incluye a más de 100 países que representan el 98% del PIB mundial. Sin embargo, la estrategia busca universalizar la participación, integrando a los Estados que aún no forman parte. Además, se avanza hacia una gobernanza más moderna, con códigos de conducta y estatutos que serán presentados en la 28ª CGPM (2026).

Hitos futuros

- 2022 (27ª CGPM): resoluciones preliminares.
- 2025: celebración de los 150 años de la Convención del Metro y presentación de la estrategia final.
- 2026 (28ª CGPM): publicación oficial de la CIPM Strategy 2030+.

Conclusión

La Estrategia CIPM 2030+ no es solo un plan técnico: es una visión global que conecta la metrología con los grandes retos de la humanidad. Desde garantizar alimentos seguros hasta medir con precisión el impacto del cambio climático, la metrología se posiciona como un pilar esencial para la sostenibilidad, la innovación y la confianza social.

REFERENCIAS

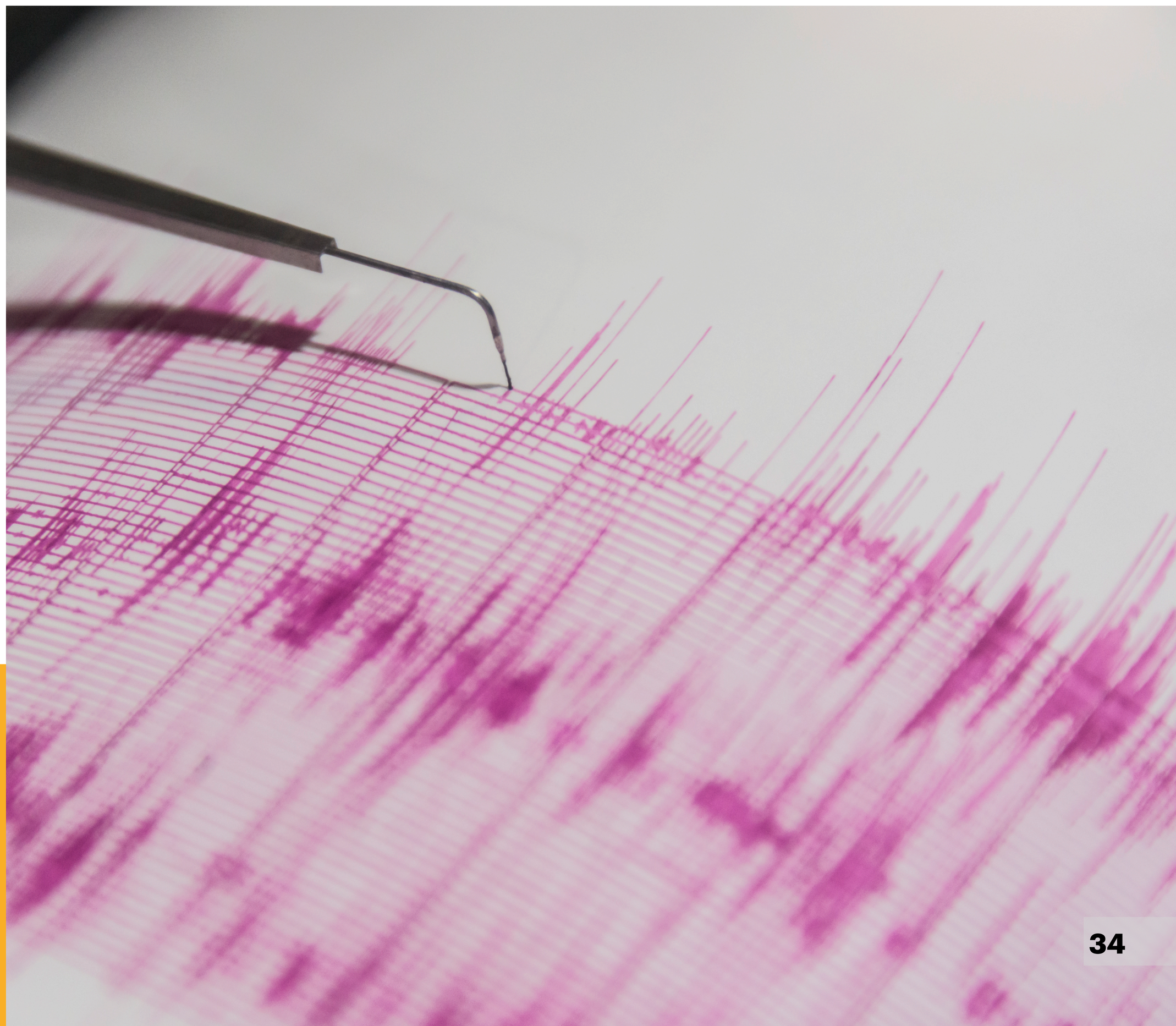
BIPM. (2022). Report on the actions taken by the CIPM towards a “CIPM Strategy 2030+”. Bureau International des Poids et Mesures. https://www.bipm.org/en/search?p_p_id=search_portlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_resource_id=%2Fdownload%2Fpublication&p_p_cacheability=cacheLevelPage&_search_portlet_dlFileId=75780294&_search_portlet_priv_r_p_javax.portlet.action=s

Kaarls, R. (2007). Evolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the Role of the BIPM. Bureau International des Poids et Mesures. https://www.bipm.org/en/impact-studies-international

National Physical Laboratory. (2025). The Future of Metrology: NPL’s Perspective. NPL. https://www.npl.co.uk/getattachment/2fd546d4-5f96-4881-b7fb-a222644375d1/The-Future-of-Metrology-NPL%E2%80%99s-perspective-Nov-2025.pdf

La GUM y sus limitaciones

Por: Dr. Jesús Carlos Sánchez Ochoa
ESIQIE-IPN, Zacatenco, CDMX.



INTRODUCCIÓN

La Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medida, mejor conocida como la GUM, se publicó en 1993 bajo los auspicios de 7 organizaciones internacionales: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), International Electrotechnical Commission (IEC), International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC), International Organization for Standardization (ISO), International Unions of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) and Physics (IUPAP) y the International Organization of Legal Metrology (OIML). En 1995 se vuelve a imprimir con ligeras correcciones. En 1997 las organizaciones arriba mencionadas crean el Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM / WG 1) y la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) forma parte de este conjunto de organizaciones desde 1998. Con el objetivo de promover la GUM, ésta se vuelve a imprimir en el 2008 con el mismo título, contenido y en forma gratuita como JCGM 100:2008 [1]. Es importante señalar que el Comité Conjunto de Guías de Metrología aprueba dos suplementos que extienden y generalizan la aplicabilidad de la GUM: Suplemento 1, JCGM 101:2008 [2] y el Suplemento 2, JCGM 102:2011 [3]. En este trabajo se utiliza un modelo matemático sencillo, $Y = X^2$ y se calculan la media, la desviación estándar e intervalos de cobertura de Y de acuerdo con la GUM y el Método Analítico del Suplemento 1, y se comparan los resultados en tablas y gráficamente.

La GUM

¿Qué nos dice la GUM? En general, el mesurando Y no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras N magnitudes, X1, X2,..., XN, por medio de una relación funcional f: Y=f(x1, x2,..., xN). Ley de Propagación de la Incertidumbre, para magnitudes de entrada no correlacionadas está dada por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{x_i}\right]^2 u^2(x_i)$$

donde f es la función dada por la ecuación anterior y u(xi) es la incertidumbre de cada una de las funciones de entrada. A la derivada de f con respecto a xi, se le conoce como coeficiente de sensibilidad. Cualquier función f(x), se puede representar mediante una serie de Taylor, y la ley de propagación de incertidumbres es una aproximación a primer orden. Se propone un ejemplo muy sencillo: $Y = X^2$ donde X es una Función de Densidad de Probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) rectangular g_X con limites a y b [0 ≤ a ≤ b], y la media y desviación estándar están dadas por:

$$\mu_X(x) = \frac{b+a}{2} \quad \textbf{1)} \qquad u(x) = \frac{b-a}{\sqrt{12}} \quad \textbf{2)}$$

De acuerdo con la GUM [1], la variable de salida Y, tiene una media:

$$\mu_Y(y) = [\mu_X(x)]^2 = \left[\frac{b+a}{2}\right]^2 \quad \textbf{3)}$$

Y una desviación estándar $u(y)$ dada por la ley de propagación de incertidumbres. Donde el coeficiente de sensibilidad es:

$$\frac{df\ (x)}{dx} = \frac{d(x^2)}{dx} = 2x$$

Evaluado en la media de X, $\mu_X(x)$. Así la incertidumbre de la variable de salida Y está dada por: $u(y) = 2\mu_X(x)u(x)$ **4)**

El intervalo de cobertura 95%, que se usa para la incertidumbre estándar, se obtiene fácilmente en Excel, asumiendo que la variable de salida es una gaussiana:

- Límite izquierdo:

$$\text{=DISTR.NORM.INV}\left[0.025,\ \left(\frac{b+a}{2}\right)^2,\ 2*\left(\frac{b+a}{2}\right)\left(\frac{b-a}{\sqrt{12}}\right)\right] \quad \textbf{5)}$$

- Límite derecho:

$$\text{=DISTR.NORM.INV}\left[0.975,\ \left(\frac{b+a}{2}\right)^2,\ 2*\left(\frac{b+a}{2}\right)\left(\frac{b-a}{\sqrt{12}}\right)\right] \quad \textbf{6)}$$

En este ejemplo, de acuerdo con la GUM [1], la variable de salida , siempre va a tener una distribución gaussiana. A continuación, en la Tabla 1 aparece el ejemplo con diferentes valores de a y b.

Tabla 1. Cálculo de la incertidumbre de acuerdo con la GUM por el modelo $Y = X^2$, donde X es una PDF rectangular y la Y es una PDF gaussiana. Las columnas 1 y 2 son los valores de a y b, $\mu_X(x)$ ec. (1), $u(x)$ ec. (2), $\mu_Y(y)$ ec. (3), $u(y)$ec. (4) y los intervalos de cobertura a 95% del límite izquierdo ec. (5) y derecho ec. (6).

a	b	$\mu_X(x)$	$u(x)$	$\mu_Y(y)$	$u(y)$	Intervalo de cobertura	
						Izquierdo	Derecho
0	4	2	1.155	4	4.619	-5.053	13.053
1	3	2	0.577	4	2.309	-0.526	8.526
1.5	2.5	2	0.289	4	1.155	1.237	6.263
1.9	2.1	2	0.058	4	0.231	3.547	4.453
1.99	2.01	2	0.0058	4	0.023	3.955	4.045

Las columnas 1 y 2 nos muestran diferentes valores a y b de pero con una misma media $\mu_X(x) = 2$. En la GUM se emplea la distribución uniforme o rectangular para evaluaciones de incertidumbre tipo B [1]. Las figuras 1 y 2 muestran la función de salida, la media, y los intervalos de cobertura de la GUM en rojo.

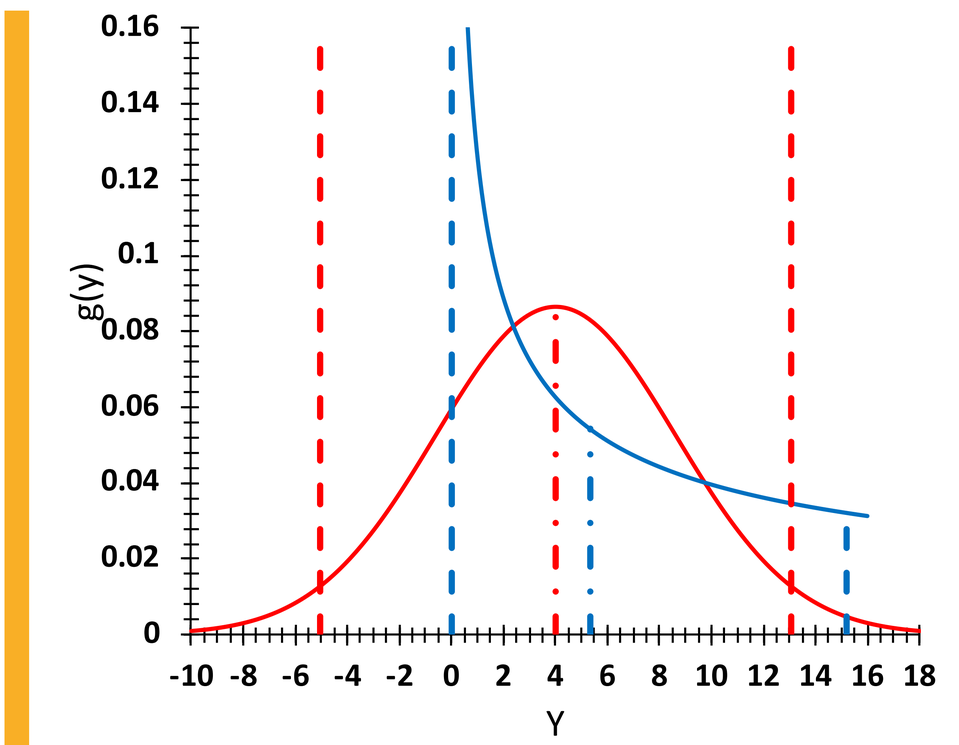


Fig. 1, Modelo $Y = X^2$ con X en el intervalo [1.5,2.5], en rojo la GUM con la media y el intervalo de cobertura simétrico con valores en la Tabla 1, y en azul el Método Analítico con la media y el intervalo de cobertura asimétrico, dados en la Tabla 2.

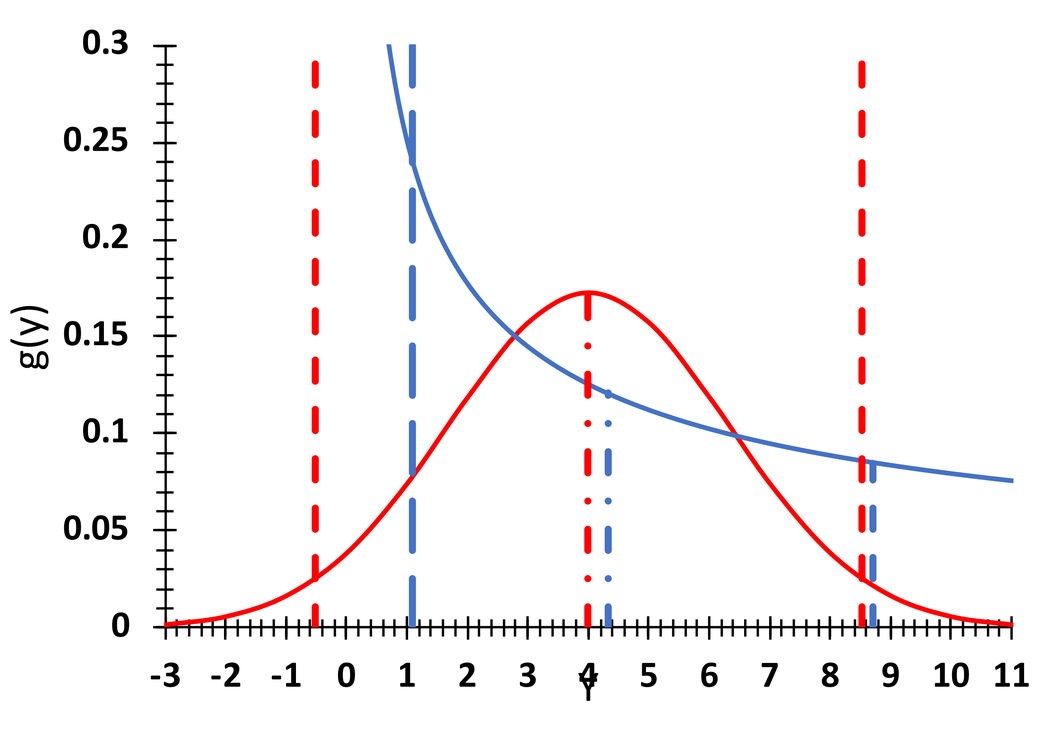
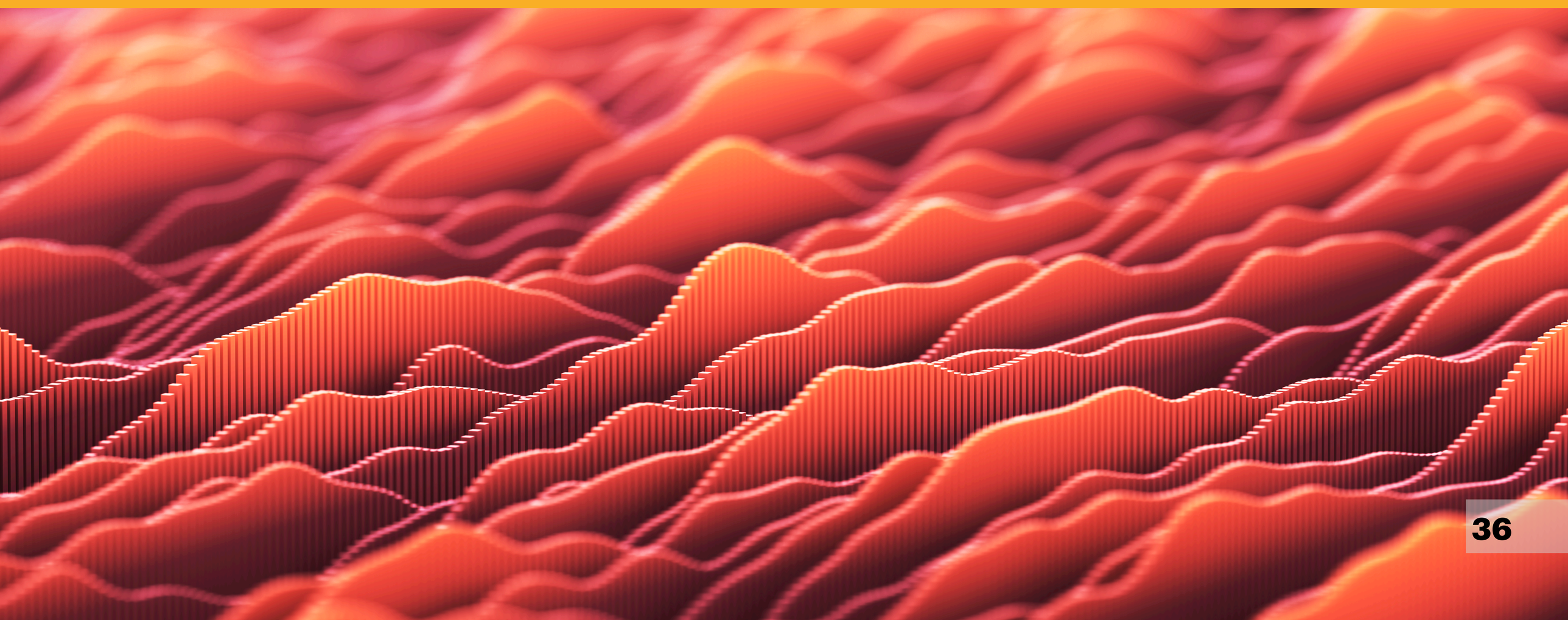


Fig. 2, Modelo $Y = X^2$ con X en el intervalo [1,3], en rojo la GUM con la media y el intervalo de cobertura simétrico con valores en Tabla 1, y en azul el Método Analítico con la media y el intervalo de cobertura asimétrico, dados en la Tabla 2.



Método Analítico [2,4]

Se continua con el ejemplo muy sencillo para ilustrar la limitación de la GUM en lo que se refiere a sus intervalos de cobertura. Se enuncia el teorema de cambio de variable y que se trata más formalmente en el Suplemento 1 de la GUM [2].

Teorema: Sea X una variable aleatoria continua con función de densidad de probabilidad $g_X(x)$. Sea $Y = f(x)$ donde f es una función estrictamente monótona y diferenciable, con una función inversa f^{-1} que también es monótona y diferenciable. Si la función de densidad de probabilidad Y se denota como $g_Y(y)$, entonces $g_Y(y)$ está dada por:

$$g_Y(y) = g_X[f^{-1}(y)]\left|\frac{df^{-1}(y)}{dy}\right| \quad \text{donde} \quad \left|\frac{df^{-1}(y)}{dy}\right| \quad \text{es el valor absoluto de} \quad \frac{df^{-1}(y)}{dy}$$

El ejemplo propuesto es la función: $Y = X^2$, donde X es una PDF rectangular gx con limites a y b [0 ≤ a ≤ b], donde la media y desviación estándar están dadas por las ecuaciones (1) y (2) mencionadas anteriormente para una distribución rectangular.

$$\mu_X(x) = \frac{b+a}{2} \quad \textbf{1)} \qquad u(x) = \frac{b-a}{\sqrt{12}} \quad \textbf{2)}$$

Aplicando el teorema de cambio de variable, se tiene:

La inversa de f:

$$y = f(x) = x^2$$

$f^{-1}(y) = \sqrt{y}$ con el intervalo de $y \in [a^2, b^2]$

La derivada de f^{-1} es:

$$\frac{df^{-1}(y)}{dy} = \frac{d}{dy}\, y^{1/2} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{y}}\right)$$

Del enunciado sabemos que $g_X(x)$ esta dada por:

$$g_X(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{b-a}, & a \le x \le b \\ 0, & \text{en otras partes} \end{cases}$$

Así: $g_X[f^{-1}(y)] = \dfrac{1}{b-a}$

Por lo que finalmente tenemos la función de densidad de probabilidad $g_Y(y)$ dada por:

$$g_Y(y) \begin{cases} 0 & y < a^2 \\ \dfrac{1}{2(b-a)\sqrt{y}} & a^2 \le y \le b^2 \\ 0 & y > b^2 \end{cases} \quad \textbf{7)}$$



Su media $\mu(y)$ y desviación estándar u(y) se calculan de acuerdo con el algebra de funciones de densidad de probabilidad [4] y están dadas por:

$$\mu(y) = \frac{b^2 + ab + a^2}{3} \qquad \textbf{8)}$$

$$u(y) = \sqrt{\frac{(b-a)^2\,(4b^2 + 7ab + 4a^2)}{45}} \qquad \textbf{9)}$$

Función de distribución acumulativa G (CDF) de Y, nos permite calcular los intervalos de cobertura de acuerdo con el Método Analítico [4] y están dados por:

$$G(y) = \frac{\sqrt{y} - a}{b - a} \quad \text{donde} \quad a^2 \le y \le b^2$$

Para el límite izquierdo a 95%, y resolviendo la ecuación en Y tenemos:

$$G(y) = \frac{\sqrt{y} - a}{b - a} = 0.025 \qquad \textbf{10)}$$

Para el límite derecho:

$$G(y) = \frac{\sqrt{y} - a}{b - a} = 0.975 \qquad \textbf{11)}$$

Como puede observarse la GUM tiene una solución muy fácil de calcular a diferencia del Método Analítico.

A continuación, se dan valores a las constantes a y b para este ejemplo y los resultados con el Método Analítico aparecen en la Tabla 2. Las figuras 1 y 2 muestran la función de densidad de salida, la media, y los intervalos de cobertura obtenidos por el Método Analítico en azul.

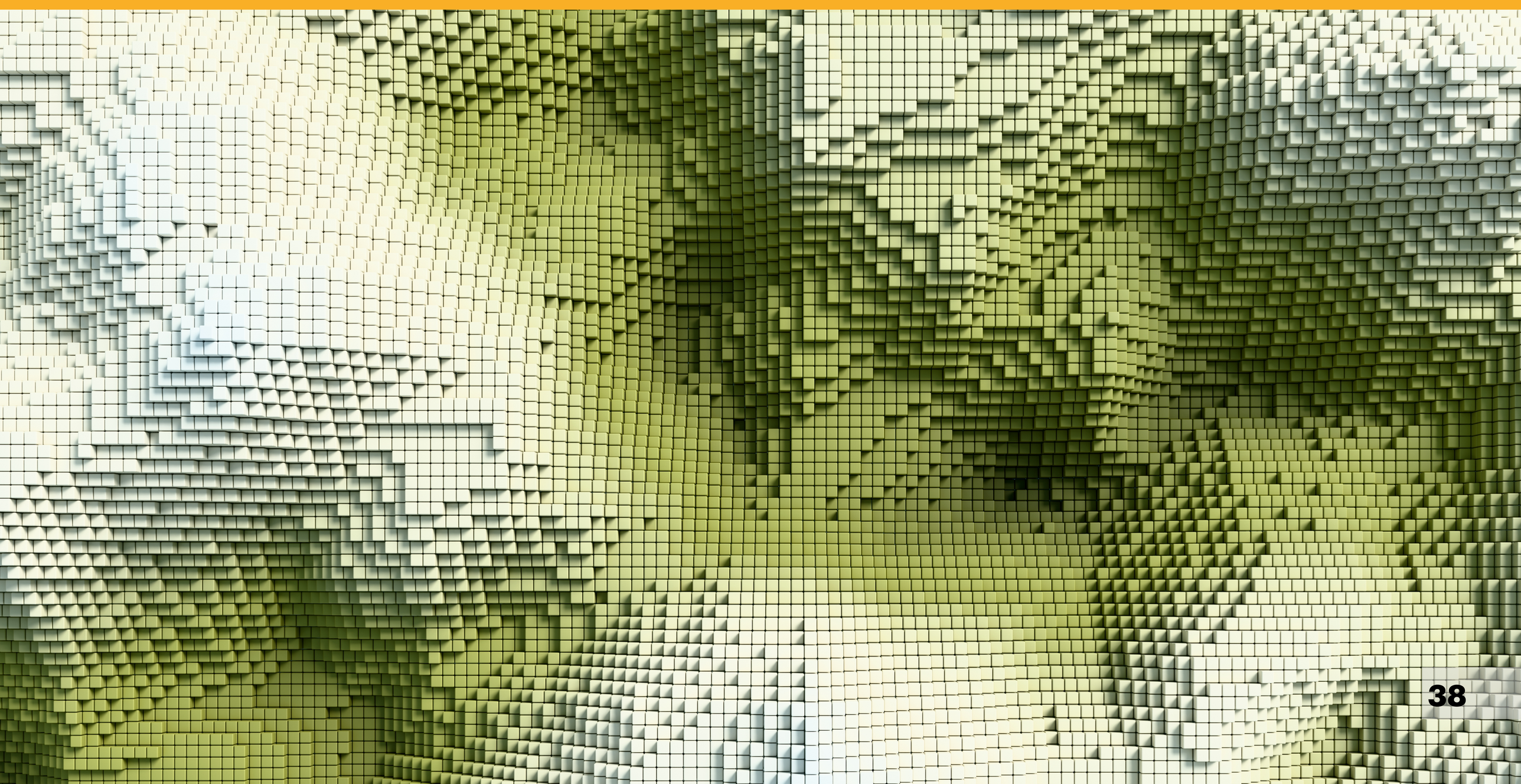


Tabla 2. Cálculo de la incertidumbre por el Método Analítico para el modelo $Y = X^2$, donde X es una PDF rectangular y la Y es una PDF por $g_Y(y)$. Las columnas 1 y 2 son los valores de a y b, $\mu_X(x)$, $u(x)$, son las mismas obtenidas en (1 y 2), $g_Y(y)$ ec. (7), $\mu_Y(y)$ ec. (8), $u(y)$ ec. (9) y los limites izquierdo (10) y el límite derecho (11).

a	b	$\mu_X(x)$	$u(x)$	$g(y)$	Intervalo	$\mu_Y(y)$	$u(y)$	Intervalo de cobertura	
								Izquierdo	Derecho
0	4	2	1.155	$\frac{1}{8\sqrt{y}}$	$0 \leq y \leq 16$	5.333	4.770	0.01	15.21
1	3	2	0.577	$\frac{1}{4\sqrt{y}}$	$1 \leq y \leq 9$	4.333	2.329	1.103	8.703
1.5	2.5	2	0.289	$\frac{1}{2\sqrt{y}}$	$2.25 \leq y \leq 6.25$	4.083	1.157	2.326	6.126
1.9	2.1	2	0.058	$\frac{2.5}{\sqrt{y}}$	$3.61 \leq y \leq 4.41$	4.0033	0.231	3.629	4.389
1.99	2.01	2	0.0058	$\frac{25}{\sqrt{y}}$	$3.96 \leq y \leq 4.04$	4.0003	0.0231	3.9621	4.0381

Concusiones

Como puede observarse, la GUM propone un cálculo de la incertidumbre que es muy fácil de obtener a diferencia del Método Analítico, sin embargo, los resultados no son exactos, ya que se trata de una aproximación a primer orden de Taylor y se nota la diferencia cuando se comparan con los valores del Método Analítico que si lo son. Esto también se nota en el intervalo de cobertura que, para un modelo no lineal, puede no coincidir con el calculado por la GUM, como se ve en el ejemplo propuesto.

Debido a esto, es que se propone el Suplemento 1, con un nivel de conocimiento en cálculo y probabilidad que es mayor que el necesario propuesto originalmente por la GUM y como tal puede presentar dificultades para algunos usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

[1] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML 2008 Evaluation of Measurement Data-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Geneva: International Organization for Standardization) Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008).
[2] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML 2008 Evaluation of Measurement Data-Supplement 1 to the Guide to Expression of Uncertainty in Measurement-Propagation of Distributions using a Monte Carlo Method (Geneva: International Organization for Standardization) Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 101:2008).
[3] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML 2011 Evaluation of Measurement Data-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Models with any Number of Output Quantities (Geneva: International Organization for Standardization) Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 102:2011).
[4] Uso de la ecuación propuesta por Tanaka et. al. para calcular la densidad del agua de 0 a 40°C y 1 atm y su incertidumbre mediante el uso de la Guía para la expresión de la incertidumbre en la Medición (GUM) y Monte Carlo. Tesis de Licenciatura, ESIQIE-IPN, presentada por BÁRBARA GONZÁLEZ PARRA, 2023.

La Estadística en la Metrología

Por: Dr. Eduardo Gutiérrez Peña
Departamento de Probabilidad y Estadística
IIMAS, UNAM
ORCID: 0000-0003-4706-5226



Resumen: La Probabilidad y la Estadística juegan un papel importante en la evaluación y la propagación de la incertidumbre en Metrología. Muchos de los problemas cotidianos de la Metrología se pueden resolver con técnicas relativamente simples de Probabilidad y Estadística, como aquellas descritas en la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM) [1]. Sin embargo, cada vez hay más problemas en los que esas técnicas pueden dar resultados poco adecuados y en los que es necesario considerar métodos estadísticos más sofisticados. En esta nota se presenta una reflexión sobre estos temas.

1. Introducción

El concepto de incertidumbre en Metrología tiene un sentido muy particular y restringido. En el Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología (VIM), por ejemplo, la incertidumbre de medida se define como “parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza”, mientras que la incertidumbre estándar se define como la “incertidumbre de medida expresada como una desviación típica” (también llamada desviación estándar) [2].

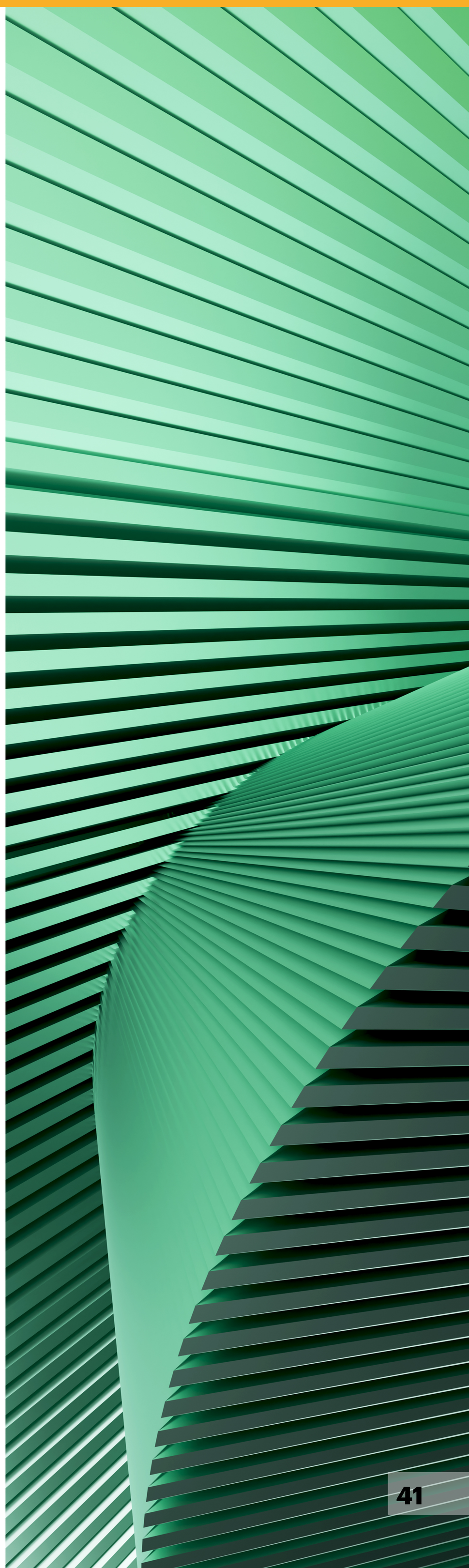
En general, sin embargo, la incertidumbre es mucho más que eso, tanto a nivel coloquial como en contextos científicos. De acuerdo con la Wikipedia [3], “La incertidumbre se refiere a situaciones epistémicas que implican información imperfecta o desconocida. Se aplica a las predicciones de eventos futuros, a las mediciones físicas que ya se han realizado o a lo desconocido. La incertidumbre surge en entornos parcialmente observables y/o estocásticos, así como debido a la ignorancia, la indolencia o ambas. Surge en cualquier número de campos, incluyendo los seguros, filosofía, física, estadística, economía, finanzas, psicología, sociología, ingeniería, metrología, meteorología, ecología y ciencias de la información.” Por otra parte, según el físico y matemático francés Pierre-Simon Laplace, “La probabilidad es el lenguaje de la incertidumbre”. En cierto sentido, se puede decir que la probabilidad es la “unidad” con la cual se mide la “magnitud” incertidumbre.

La Teoría de la Probabilidad proporciona una manera general de cuantificar la incertidumbre, independientemente del contexto, ya sea que se trate de “incertidumbre aleatoria” (intrínseca al fenómeno e independiente del observador) o de “incertidumbre epistémica” (debida a la falta de conocimiento del observador).

En Metrología, la incertidumbre aleatoria se asocia con la evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, definida en el VIM como la “evaluación de una componente de la incertidumbre de medida mediante un análisis estadístico de los valores medidos obtenidos bajo condiciones de medida definidas”. En otras palabras, “Una evaluación Tipo A de la incertidumbre estándar puede basarse en cualquier método estadístico válido para analizar datos. Los ejemplos incluyen el cálculo de la desviación estándar de la media de una serie de observaciones independientes...” [4].

Por su parte, la incertidumbre epistémica se asocia con la evaluación tipo B, definida en el VIM como la “evaluación de una componente de la incertidumbre de medida de manera distinta a una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida.” Dicho de otra forma, “Una evaluación Tipo B de la incertidumbre estándar usualmente se basa en juicios científicos que usan toda la información relevante disponible...” [5].

El cálculo de probabilidades depende de modelos matemáticos completamente especificados. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los modelos utilizados dependen de parámetros desconocidos cuyos valores deben inferirse. Las técnicas de Inferencia Estadística permiten resolver este problema. La Probabilidad y la Estadística tienen entonces mucho que contribuir a la cuantificación y propagación de la incertidumbre en todos los campos del conocimiento y, en particular, en la Metrología.



2. Probabilidad: evaluación y propagación de la incertidumbre

Para simplificar la exposición, aquí nos enfocaremos en el caso de una sola variable de entrada y una sola variable de salida. Los casos más generales son similares y se discuten en los suplementos de la GUM y otras fuentes relacionadas.

2.1. Regla de cambio de variable (Método analítico)

Evaluación: Denotemos por X a una variable aleatoria que describe el resultado de una medición. Supongamos que X tiene una distribución de probabilidad con función de densidad $g_X(x)$completamente especificada (es decir, que no depende de parámetros desconocidos).

Propagación: Supongamos ahora que nos interesa describir la incertidumbre de $Y = f(X)$ donde f es una función suave de X. De acuerdo con la regla de cambio de variable de la Teoría de la Probabilidad, esta incertidumbre queda descrita por la densidad $g_Y(y)$, la cual se calcula a partir de la de X de la siguiente manera:

$$g_Y(y) = g_X(f^{-1}(y)) \left|\frac{df^{-1}(y)}{dy}\right|$$

donde f^{-1} denota a la función inversa de f. La aplicación de este resultado es lo que se conoce como el "método analítico" para la propagación de la incertidumbre. Este método es, de hecho, el que se debería de usar en todos los casos. Sin embargo, en la práctica no siempre es posible hacerlo debido a que en ocasiones algunas de las expresiones necesarias no se pueden encontrar de manera cerrada. En esos casos es necesario recurrir a aproximaciones, ya sea analíticas o numéricas. En lo que resta de esta sección, discutiremos las dos aproximaciones más utilizadas.

2.2. Método Delta (Ley de propagación de la incertidumbre)

En la literatura estadística, el llamado Método Delta proporciona una manera de aproximar analíticamente la media y la varianza de una función no lineal de una variable aleatoria. Esta aproximación se basa en una expansión en serie de Taylor de dicha función y se puede resumir de la siguiente manera:

$$E(Y) = E(f(X)) \approx f(E(X))$$

$$Var(Y) = Var(f(X)) \approx f'(E(X))^2\ Var(X)$$

donde f' denota la primera derivada de la función f. Por su parte, en la literatura metrológica, la segunda expresión se escribe usualmente como:

$$u_c^2(Y) \approx c^2 u^2(X)$$

donde $u_c(Y)$ y $u(X)$ denotan la incertidumbre estándar de Y y X, respectivamente, y $c = f'(E(X))$ es llamado el *coeficiente de sensibilidad*. Cabe mencionar que, en la GUM, este resultado se denomina la *Ley de Propagación de la Incertidumbre* (LPI); un nombre que, en mi opinión, es algo ostentoso para una aproximación relativamente simple. Esta aproximación será adecuada en la medida en la que la función f sea aproximadamente lineal, y generalmente se utiliza en conjunto con el supuesto de que tanto la distribución de X como la de Y son aproximadamente normales; éste es un supuesto que puede justificarse si el número de mediciones es suficientemente grande.

2.3. Método de Montecarlo

El Método de Montecarlo se propuso originalmente para aproximar los valores de integrales definidas de la forma

$$I = \int_a^b h(x)dx$$

La idea detrás del método es simple:

(i) Reescribir la integral I como

$$\int_a^b \frac{h(x)}{g_X(x)} g_X(x)dx$$

es decir, como la esperanza matemática de la función de $h(x)/g_X(x)$ con respecto a una distribución de probabilidad $g_X(x)$.

(ii) Simular realizaciones (pseudo)aleatorias $x_1, x_2, \ldots, x_M$ de la distribución $g_X(x)$ y aproximar el valor de la integral I por medio de

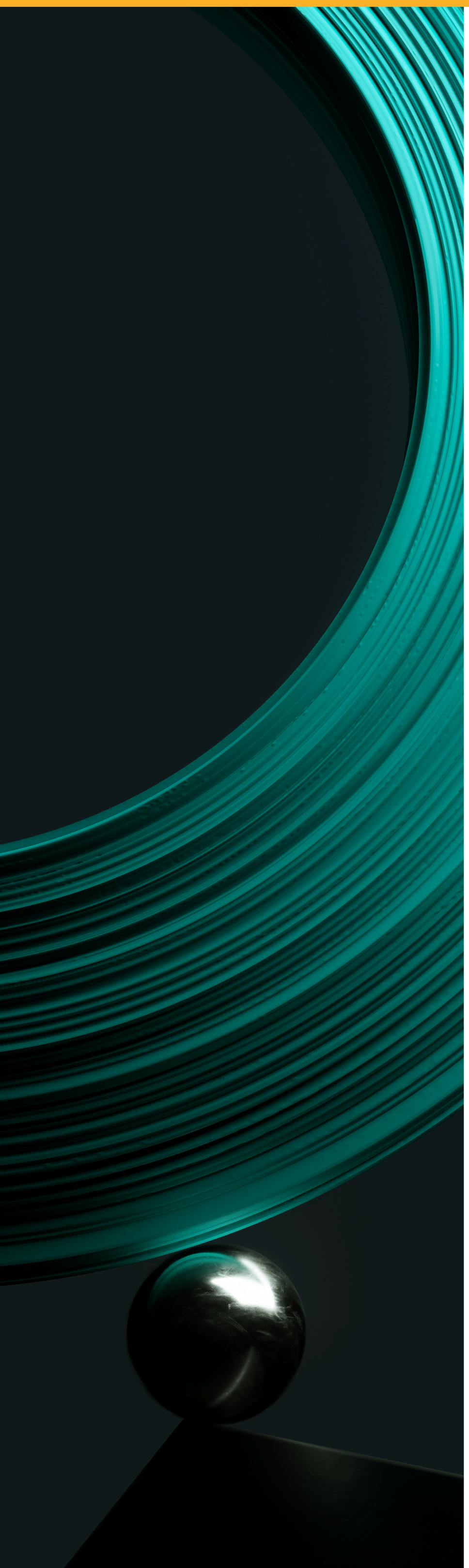
$$I \approx \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} \frac{h(x_k)}{g_X(x_k)}$$

De esta forma, por ejemplo,

$$E(Y) = E\ (f\ (X)) \approx \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} f\ (x_k)$$

y

$$Var(Y) = Var\ (f\ (X)) \approx \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} f\ (x_k)^2 - \left(\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} f\ (x_k)\right)^2$$



El Método de Montecarlo proporciona aproximaciones más exactas que la Ley de Propagación de la Incertidumbre. Su exactitud depende solamente del número de simulaciones (*M*, que puede ser tan grande como sea necesario) y no del número de mediciones (que usualmente es pequeño dado que requiere de recursos humanos y financieros).

Más aún, la Teoría de la Probabilidad garantiza que, si *M* es suficientemente grande, entonces $x_1, x_2, \ldots, x_M$ permite aproximar esencialmente cualquier característica de la distribución $g_X(x)$. Por otra parte, si $x_1, x_2, \ldots, x_M$ es una muestra aleatoria de realizaciones de $g_X(x)$, entonces $y_1 = f(x_1), y_2 = f(x_2), \ldots, y_M = f(x_m)$ es una muestra aleatoria de realizaciones de $g_Y(y)$.

Se tiene entonces que los métodos de simulación ofrecen una manera muy sencilla de propagar la incertidumbre: basta con simular realizaciones de la variable de entrada *(X)* y evaluar la función f en cada una de ellas para obtener realizaciones simuladas de la variable de salida *(Y)*, con las cuales se puede aproximar cualquier característica de la distribución $g_Y(y)$.

Es interesante notar que el Método de Montecarlo también hace uso de resultados de Probabilidad, pero en este caso con el propósito de proporcionar aproximaciones numéricas. Cabe mencionar que el Suplemento 1 de la GUM describe el uso del Método de Montecarlo para la propagación de la incertidumbre en Metrología.

3. Estadística: Dos enfoques

Como se mencionó en la introducción, si la distribución de la variable de entrada (X) y/o de la variable de salida (Y) depende de parámetros desconocidos, entonces es necesario recurrir a métodos de Inferencia Estadística para evaluar y propagar la incertidumbre de manera adecuada.

El enfoque tradicional de la Estadística se basa en la interpretación frecuentista de la Probabilidad, en la que la probabilidad de un evento se define como el límite de las frecuencias relativas del evento en una serie infinita de experimentos aleatorios. Este enfoque está relacionado con la incertidumbre aleatoria y, por lo tanto, con la evaluación tipo A de la incertidumbre.

A nivel operativo, el enfoque frecuentista de la Estadística es similar al Método de Montecarlo, pero las estimaciones se basan en mediciones reales en lugar de realizaciones simuladas.

Por su parte, el enfoque bayesiano de la estadística se basa en la interpretación subjetiva de la Probabilidad, en la que la probabilidad de un evento depende del grado de conocimiento que tiene la persona que la asigna. Este enfoque, por lo tanto, está relacionado con la incertidumbre epistémica y con la evaluación tipo B de la incertidumbre.

A nivel operativo, en el enfoque bayesiano es necesario describir la incertidumbre inicial sobre el valor desconocido de los parámetros a través de una distribución de probabilidad, para posteriormente incorporar la información contenida en las mediciones realizadas por medio de la Regla de Bayes, otro resultado bien conocido de la Teoría de la Probabilidad. En [6] se discuten estas ideas en un contexto metrológico.

4. La incertidumbre de medida como un resumen de una distribución de probabilidad

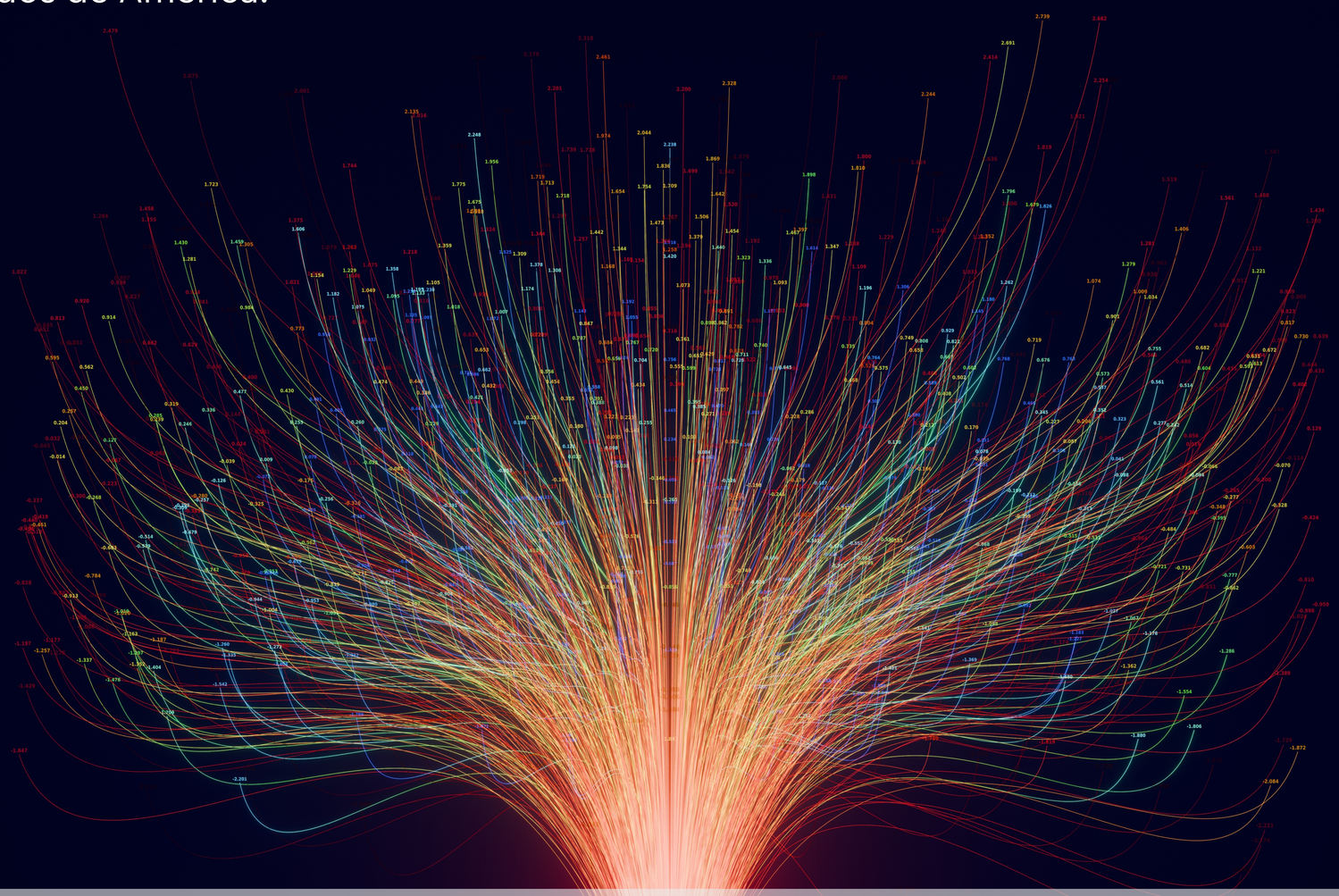
La incertidumbre estándar es, por mucho, la forma más común de expresar la incertidumbre en Metrología. Sin embargo, no es la única ni la mejor manera de hacerlo. Más generalmente, la incertidumbre de medida es sólo una forma de resumir la incertidumbre descrita por una distribución de probabilidad. Una manera alternativa es por medio de un intervalo de cobertura, el cual se define en el VIM como el "intervalo que contiene el conjunto de valores verdaderos de un mensurando con una probabilidad determinada, basada en la información disponible". En la GUM se describe un método simple para producir intervalos de cobertura aproximados a partir de las incertidumbres estándar y los llamados factores de cobertura. Desafortunadamente, dicho método deja mucho que desear.

Por lo que se refiere a la incertidumbre de medida, dependiendo de la forma de la distribución, una forma alternativa de "caracterizar la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando" es, por ejemplo, la desviación absoluta mediana (MAD, median absolute deviation). Esta cantidad es menos sensible a valores atípicos que la desviación estándar y puede dar una mejor descripción de la dispersión si la distribución que se utiliza no es normal.

En cuanto a los intervalos de cobertura, en general es mejor definirlos en términos de los cuantiles de la distribución utilizada; por ejemplo, se pueden usar los cuantiles de orden 2.5 % y 97.5 % para definir un intervalo de cobertura de 95 % de probabilidad. De esta manera, los intervalos no dependen de la incertidumbre estándar ni de otro tipo de incertidumbre de medida, además de que puede proporcionar una mejor descripción de la incertidumbre descrita por una distribución de probabilidad si ésta no es normal.

5. Discusión

En todas las áreas en las que la calidad de las mediciones es importante, se invierte mucho esfuerzo, tiempo y recursos económicos (por ejemplo, para infraestructura, instrumentos, patrones, capacitación, etc.) con el fin de conseguir las mejores mediciones posibles. Resulta irónico, entonces, que después de todo ese esfuerzo se utilice una aproximación relativamente burda, como la LPI, a la hora de propagar la incertidumbre. El Método de Montecarlo y otras técnicas estadísticas como las discutidas en [7] permiten aprovechar mejor el esfuerzo y las mediciones obtenidas, así como proporcionar mejores evaluaciones de la incertidumbre asociada a las variables de salida. Por último, cabe mencionar que, al igual que en otros campos del conocimiento, en Metrología hay un creciente interés en las técnicas bayesianas. Prueba de ello es el proyecto de Metrología Bayesiana [8] del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés, National Institute of Standards and Technology) de los Estados Unidos de América.



REFERENCIAS

[1 Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones (GUM). (1993, corregido de 1995). (Publicado por ISO en nombre del BIPM, CEI, FICC, OIML, IUPAC y la IUPPA.)

[2] Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). JCGM 200:2008. (Traducción al español del VIM-3ª. Marzo 2009.)

[3] Incertidumbre. https://es.wikipedia.org/wiki/Incertidumbre.

[4] The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. Uncertainty of Measurement Results. Evaluating uncertainty components: Type A. http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/typea.html. (En inglés.)

[5] The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. Uncertainty of Measurement Results. Evaluating uncertainty components: Type B. http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/typeb.html. (En inglés.)

[6] O'Hagan, A. (2014). Eliciting and using expert knowledge in metrology. Metrologia 51, S237-S244.

[7] Vardeman, S.B., Wendelberger, J.R., Burr, T., Hamada, M.S., Moore, L.M., Jobe, J.M., Morris, M.D & Huaiqing Wu, (2010). Elementary statistical methods and measurement error. The American Statistician, 64:1, 46-51.

[8] NIST - Bayesian metrology project. https://www.nist.gov/programs-projects/bayesian-metrology-project.

¿Sabías qué?

Cada año se generan más de 90 millones de toneladas de residuos textiles a nivel global.

Pero esa cifra no se “cuenta”: se estima. Combina pesajes, muestreos y modelos estadísticos. En metrología, incluso la escala del problema depende de cómo se mide.

Aplicación de las técnicas Bootstrap en Metrología

Por: Dr. Miguel Angel López Díaz
Facultad de Ciencias, UAEMEX.
mald@uaemex.mx



Resumen: En metrología, que es la ciencia de las mediciones, uno de los principales problemas es la estimación de la incertidumbre asociada a las mediciones cuando no se conoce la distribución exacta de los errores o si se tiene un conjunto limitado de mediciones. En esta situación, una de las técnicas estadísticas que con mayor frecuencia se emplea es Bootstrap. Esta técnica puede ayudar a calcular intervalos de confianza para las medidas o para la calibración de equipos, lo cual proporciona una estimación robusta de la incertidumbre de las mediciones.

Preliminares

El termino Bootstrap proviene de la expresión “pulling oneself up by one’s bootstrap” que puede traducirse como levantar uno mismo sus botas, y que en inglés hace referencia a hacer algo difícil sin ayuda externa.

El método Bootstrap tiene una historia fascinante que surge en el contexto del desarrollo de las técnicas estadísticas no paramétricas e impulsado por el auge de la computación en el siglo XX. Este método fue introducido por Bradley Efron en 1979. Efron, un profesor de la Universidad de Stanford desarrolló esta técnica como una solución innovadora para estimar la precisión de los estimadores estadísticos cuando se dispone de muestras pequeñas o cuando no se conoce la distribución de probabilidad teórica de los datos. Antes de la invención del Bootstrap, los métodos tradicionales (paramétricos) para la estimación de la varianza de un estadístico dependían de suposiciones fuertes sobre la distribución de los datos, como por ejemplo suponer normalidad. Sin embargo, en muchos casos prácticos, estos supuestos no se cumplían. Esto hace que los métodos paramétricos resulten inadecuados o poco precisos. Otra técnica empleada es el método de Jackknife, desarrollado en la década de 1950 por Maurice Quenouille y popularizado más tarde por John Tukey. El método Jackknife es una técnica que implica eliminar una observación de la muestra en cada iteración y recalcular el estadístico de interés. Sin embargo, este método tiene limitaciones cuando se trata de muestras pequeñas o cuando los datos no siguen una distribución normal.

Los supuestos de los métodos estadísticos paramétricos resultan fundamentales para construir intervalos de confianza y realizar pruebas de hipótesis. Sin embargo, en muchas situaciones prácticas, estos supuestos son demasiado restrictivas o inadecuadas, esto motivó el desarrollo de métodos más flexibles.
Bradley Efron propuso una solución a este problema. En su artículo pionero de 1979 titulado “Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife” [1], presenta el método Bootstrap como una alternativa innovadora para estimar la varianza de un estadístico sin la necesidad de realizar suposiciones paramétricas rigurosas.

En sus inicios el método Bootstrap fue visto con escepticismo debido a que requiere de trabajo intensivo de cómputo, que es necesario para obtener los estadísticos de cada muestra obtenida. A medida que aumentó el poder de cómputo, principalmente en la década de 1980, el método se hizo más accesible y práctico. El desarrollo de las computadoras personales popularizó el método, los resultados se obtenían de manera más rápida y eficiente.

A lo largo de la década de 1980 y 1990, el Bootstrap se formalizó y se extendió en muchas direcciones. En 1986, Efron y Tibshirani [2] publicaron un artículo que explica como este método puede ser empleado para realizar pruebas de hipótesis y construir intervalos de confianza. Este artículo sentó las bases teóricas del método y lo legitimó en la comunidad estadística. En 1993, estos mismos autores publicaron el libro “An introduction to the Bootstrap” [3], que sistematizó y popularizó es uso de la técnica entre una audiencia más amplia. El éxito del Bootstrap inspiró el desarrollo de otras variantes del método. Por ejemplo, el Percentile Bootstrap y el Bias-Corrected Boostrap, que fueron algunas extensiones para mejorar la precisión del método en diferentes contextos. También surgió el Bootstrap para datos dependientes, que se aplica a datos que no son independientes, como es usual en series de tiempo.

Bootstrap No Paramétrico

La idea central del Bootstrap es el remuestreo con reemplazo. A partir de una sola muestra se generan múltiples muestras de la muestra, cada una de las cuales es del mismo tamaño y seleccionada de manera aleatoria de la muestra original, con la posibilidad de que un mismo elemento pueda ser seleccionado en más de una sola ocasión. Las técnicas de remuestreo consisten en obtener remuestras a partir de la muestra original. Esto permite evaluar diferentes propiedades de los estimadores. En este sentido la técnica Bootstrap se puede considerar como un plan de remuestreo para facilitar el error del estadístico, ya sea en cuanto al sesgo o el error estándar en una predicción.

La forma en que la técnica de Bootstrap realiza el remuestreo puede resumirse en los siguientes pasos:

Paso 1. Seleccionar el estadístico de interés. El usuario seleccionar un estadístico de interés $\hat{\theta}$, que bien puede ser la media, mediana, correlación, etc.

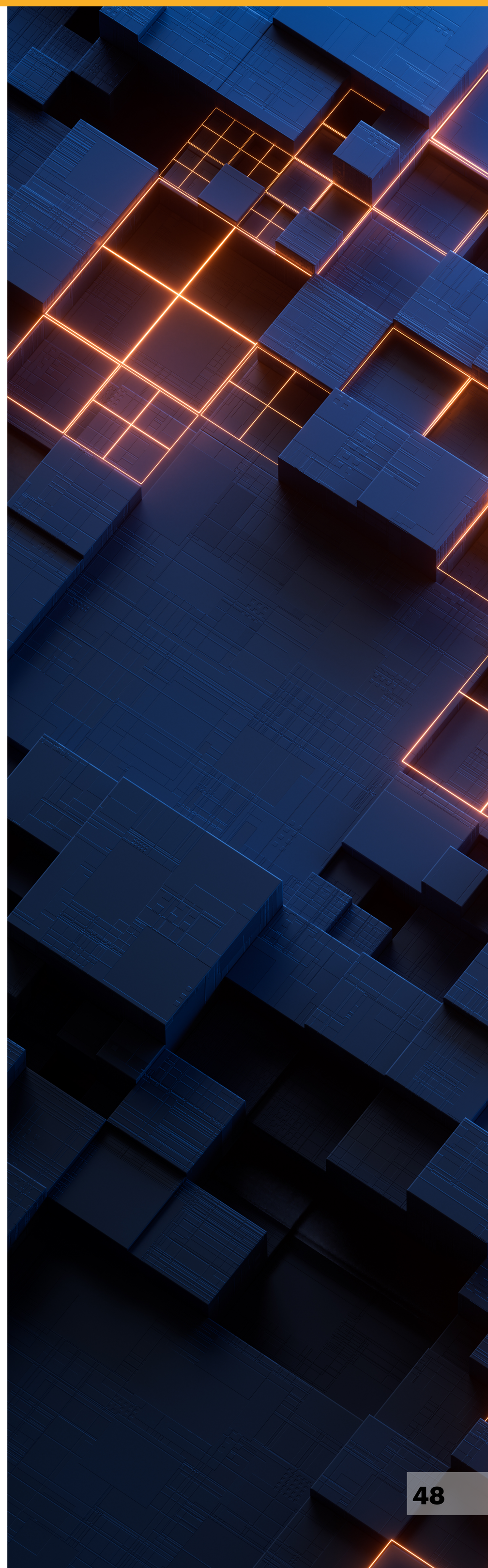
Paso 2. Obtener los datos. Se obtiene una muestra, que llamaremos muestra original, que consiste en la realización de n variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, operativamente puede considerarse como n realizaciones de una variable aleatoria. Representamos esta muestra original mediante $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$.

Paso 3. Generar las muestras Bootstrap. A partir de la muestra original, obtenida en el paso 2, se generan la remuestras Bootstrap, las cuales denotaremos por $\{x^*_{1,i}, x^*_{2,1}, \ldots, x^*_{n,i}\}$, donde el subíndice $i = 1,2,\ldots, B,$, y denota que los datos corresponden a la i-ésima muestra de Bootstrap. Cada remuestra o réplica consiste en una muestra de tamaño obtenida de la muestra original con reemplazo. Es decir, un mismo valor de la muestra original puede ser seleccionado en más de una ocasión, o bien no ser seleccionado. Por lo general se selecciona al menos $B = 1000$ remuestras, con el objetivo de tener una buena aproximación a la distribución del estadístico de interés $\hat{\theta}$.

Paso 4. Evaluar el estadístico de interés en cada remuestra. Para cada réplica o remuestra de Bootstrap, obtenida en el paso 3, se calcula el valor del estadístico de interés $\hat{\theta}$, que para diferenciarlos del calculado sobre los valores de la muestra original, lo denotaremos por $\hat{\theta}^{*i} = \hat{\theta}\ (x^*_{1,i}, x^*_{2,i}, \ldots x^*_{n,i})$

Paso 5. Estimación de la distribución empírica del estadístico de interés. Después de calcular el estadístico de interés en cada una de las remuestras de Bootstrap, es factible a partir de los valores $\{\hat{\theta}^{*1}, \hat{\theta}^{*2}, \ldots, \hat{\theta}^{*B}\}$ obtener una distribución empírica del estadístico de interés $\hat{\theta}$. A través de esta distribución se puede evaluar la variabilidad del estadístico sin necesidad de hacer supuestos adicionales sobre la distribución teórica que dio origen a la muestra original.

Ahora, queda más claro el empleo del nombre Bootstrap, pues la técnica refleja el hecho de que el método utiliza sus propios datos para estimar la variabilidad sin la necesidad de información adicional como lo hacen los métodos paramétricos.



Estimaciones Bootstrap del error estadístico.

En el paso 5 del método descrito anteriormente contamos con un gran número de estimaciones Bootstrap del estadístico de interés $\hat{\theta}$, es decir el conjunto de los valores $\{\hat{\theta}^{*1}, \hat{\theta}^{*2}, \ldots, \hat{\theta}^{*B}\}$a partir del cual obtenemos la estimación Bootstrap de la distribución del estadístico de interés, que usualmente se llama distribución muestral Bootstrap de la distribución muestral de $\hat{\theta}$

$$\hat{\theta}_{BOOT} = \sqrt{\frac{1}{B-1}} \sum_{i=1}^{B} (\hat{\theta}^{*i} - (\overline{\hat{\theta}^{*}})^2$$

donde $\overline{\hat{\theta}^{*}}$ corresponde a la estimación Bootstrap de la media muestral de la distribución Bootstrap, obtenida a través de la expresión

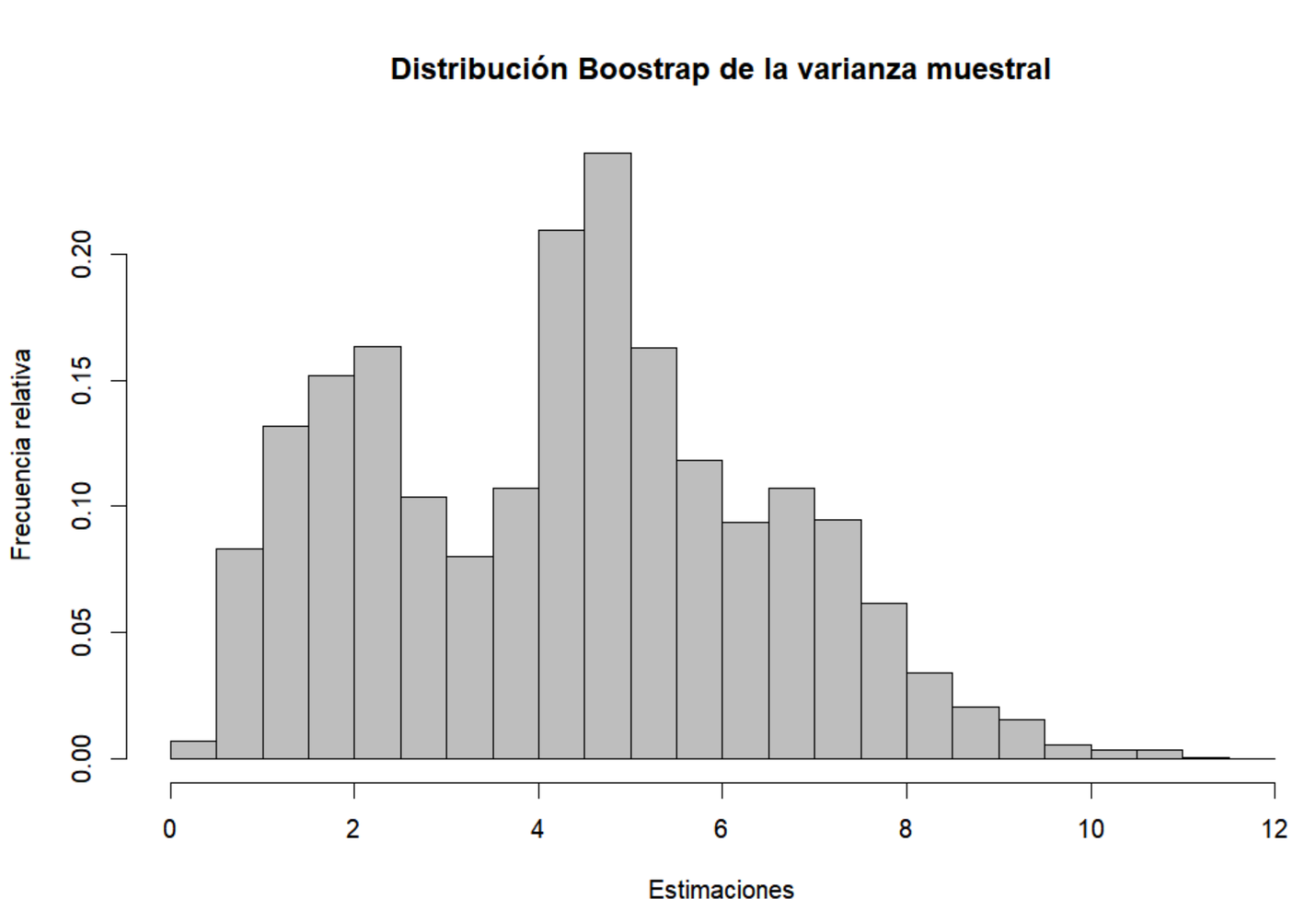
$$\overline{\hat{\theta}^{*}} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^{B} \hat{\theta}^{*i}$$

Intervalos de confianza Bootstrap.

Con la distribución muestral Bootstrap de la distribución muestral de $\hat{\theta}$ se pueden también construir intervalos de confianza del parámetro de interés. El método más común es usar los percentiles de la distribución muestral Bootstrap para definir un intervalo de confianza. Por ejemplo, para un intervalo de confianza del 95% se consideran los percentiles 2.5% y 97.5% de la distribución muestral. Alternativamente, cuando se sospecha que la estimación está sesgada, se puede recurrir le Bias-Corrected Boostrap para ajustar el intervalo.

Bootstrap Paramétrico.

En ocasiones, el investigador conoce la familia de distribuciones de probabilidad $F(\theta)$ que dio origen a los datos, excepto por el valor o vector de parámetros θ. En este caso se estima el valor del vector de parámetros θ a partir de la muestra, por ejemplo por máxima verosimilitud, denotando esta estimación por θ. En este caso el paso 3 del método Bootstrap No paramétrico se modifica de tal manera que las remuestras $\{x^*_{1,i}, x_2, 1^*, \ldots, x^*_{n,i}\}$ se obtienen a partir de la distribución $F(\hat{\theta})$. Ejemplo. Tomado de (Casella & Berge, 2002) [4]. Consideremos una muestra -1.81, 0.63, 2.22, 2.41, 2.95, 4.16, 4.24, 4.53, 5.09. Y que es de interés analizar el estadístico de la varianza muestra S^2. Con base en una colección de $B = 10000$ réplicas Bootstrap podemos estimar la distribución muestral del estadístico S^2, la cual se muestra en la figura siguiente:



A partir de las estimaciones realizadas en cada réplica obtenemos un valor promedio para S^2 de 4.2929 con un error estadístico de 2.1426. Utilizando el método de percentiles, se estima un intervalo del 95% de confianza para S^2 dado por (0.860, 8.471).

Si por otro lado, suponemos que la distribución es normal, entonces a partir de los datos se observa que $\bar{x} = 2.7133$ y $s^2 = 4.8206$. De este modo, el Bootstrap paramétrico tomará muestras de una distribución $N(2.7133,4.2848)$. Tomando la misma cantidad de réplicas que antes, obtenemos un valor promedio para S^2 de 4.2850 con un error estadístico de 2.1142. Bajo el supuesto de normalidad se sabe que el estadístico $\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2}$ tiene una distribución ji-cuadrado con $n-1$ grados de libertad, por lo que $Var(S^2) = 2\sigma^4/(n-1)$, la cual podemos estimar por máxima verosimilitud para obtener un error estadístico de 2.1424. En este caso, el método Bootstrap paramétrico realiza una mejor estimación.

Conclusión

Desde su invención, el Bootstrap ha sido aplicado en una gran variedad de disciplinas. En economía se utiliza para calcular intervalos de confianza en modelos econométricos. En biología para analizar datos de muestras pequeñas o con distribución no normal. En metrología, como hemos visto es clave para estimar la incertidumbre de las mediciones. También ha sido ampliamente aplicado e ingeniería para el análisis de fiabilidad. De manera más reciente, el método se aplica para realizar validación cruzada en métodos de aprendizaje automático y ciencia de datos.

La técnica Bootstrap es quizás una de las invenciones más influyentes de estadística moderna y su impacto ha perdurado gracias a su flexibilidad y aplicabilidad en una diversidad de problemas. A partir de una muestra pequeña de datos, se pueden realizar inferencias robustas sin depender de suposiciones paramétricas fuertes. Esto ha convertido el método en una herramienta esencial en metrología y más allá. Su simplicidad conceptual y el poder actual de cómputo consolida al Bootstrap en la historia de la estadística como una técnica revolucionara del siglo XX.



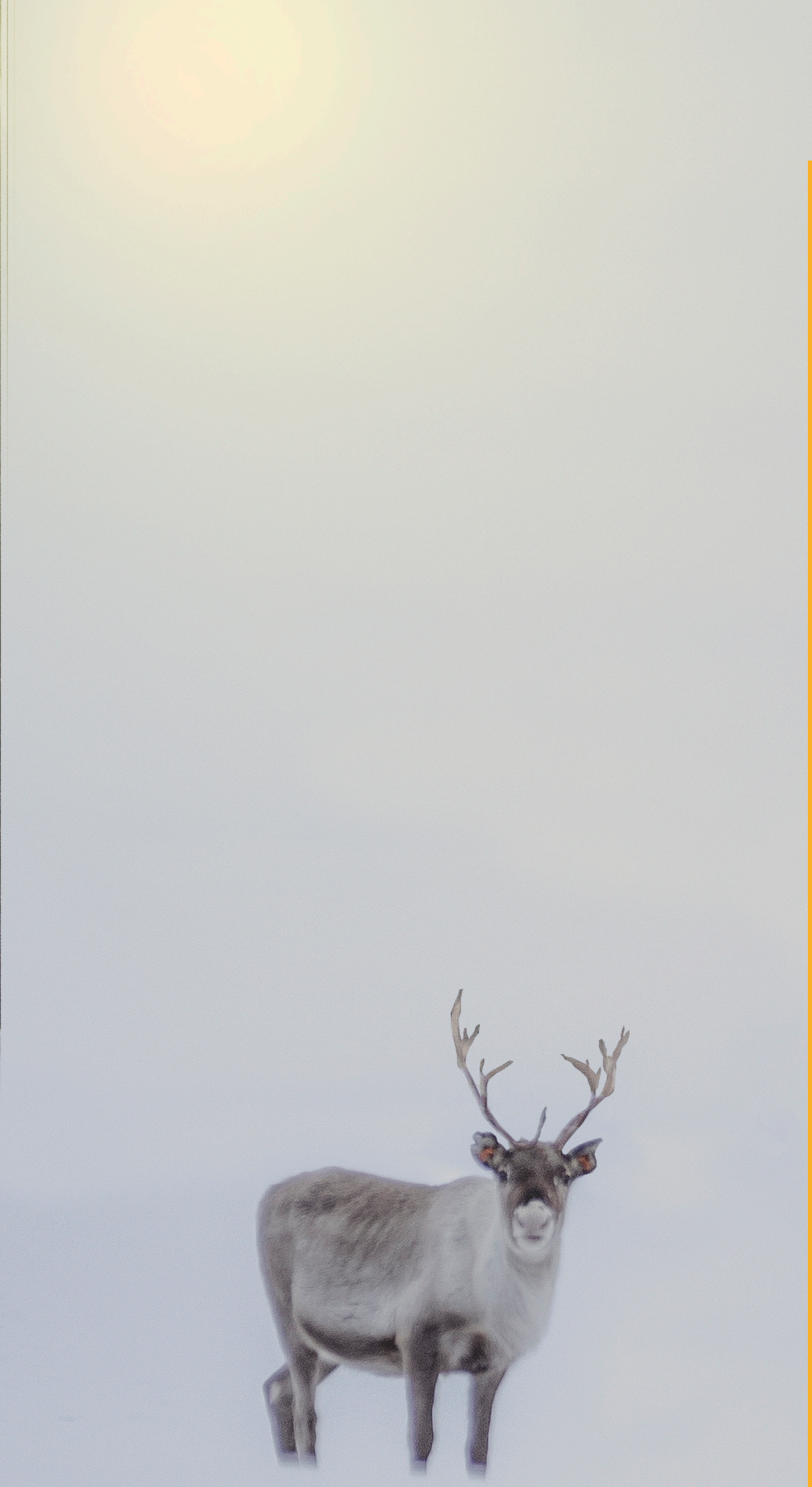
REFERENCIAS

[1] Efron, B. (1979). Bootstrap methods: Another look at the jackknife. The Annals of Statistics, 7(1), 1-26. https://doi.org/10.1214/aos/1176344552.

[2] Efron, B., & Tibshirani, R. (1986). Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. Statistical Science, 1(1), 54-75. https://doi.org/10.1214/ss/1177013815

[3] Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). An introduction to the bootstrap. Chapman & Hall/CRC.

[4] Casella, G., & Berger, R. L. (2002). Statistical inference (2nd ed.). Duxbury



Trivia

¿Conocías la unidad de medida 'Porunkusema' creada en Finlandia?

Fue inventada por los exploradores Sami. Indica una distancia de aprox. 7.5 kilómetros. ¿Qué mide?

A) La distancia que puede correr un reno antes de necesitar detenerse
B) La distancia que puede recorrer un reno sin detenerse a pastar
C) La distancia que puede recorrer un reno sin orinar

C) La distancia que puede recorrer un reno sin orinar

AMMAC