

# INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES: IMPACTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES

Ismael Castelazo Sinencio  
Centro Nacional de Metrología  
km 4,5 Carretera a los Cués, El Marqués, Querétaro  
Tel. +52-442-211-0580, Fax +42-442-211-0594,  
ismael.castelazo@cenam.mx

**Resumen:** La incorrecta interpretación de los resultados de las mediciones puede tener serias repercusiones económicas y sociales. Este hecho justifica la atención que la metrología presta a las técnicas de estimación de incertidumbre, la cual es el elemento fundamental para apreciar en forma adecuada la información que conlleva el resultado de una medición. En este trabajo se presentan los conceptos básicos de incertidumbre en términos no científicos, ilustrando su importancia con ejemplos de la industria, del sector salud y de la protección al ambiente.

## INTRODUCCIÓN

Las mediciones parecieran tener el don de la ubicuidad: están presentes en un laboratorio de análisis clínicos, en la estación de gasolina, en nuestro reloj de pulsera o en una planta termoeléctrica. Esta profusión de instrumentos en la vida cotidiana a veces impide, por nuestra familiaridad con ellos, tomar conciencia de su importancia y valorar en su justa dimensión el impacto económico y social que representan las millones de mediciones que se realizan diariamente.

Habiendo declarado la importancia de las mediciones, es justo precisar que su valor depende en gran medida de su correcta realización y de su adecuada interpretación, pues es claro que no existen mediciones perfectas. Todos los instrumentos tienen imperfecciones de fabricación (por pequeñas que ellas sean), están expuestos a perturbaciones externas durante una medición y son sujetos de empleo inadecuado por parte de los operadores.

Estas consideraciones parecen ser razonables cuando reflexionamos sobre ellas; sin embargo, la mayor parte de las personas no las tienen presentes en el momento de considerar la información que nos dan los resultados de las mediciones. Por ejemplo, en el caso de los análisis clínicos, tendemos a buscar una segunda opinión sólo en el caso de un resultado que indique una situación anómala. De lo contrario, tendemos a aceptar con mayor facilidad las buenas noticias. En un ambiente industrial podría esperarse que las mediciones se controlaran de una manera más sistemática. Sin embargo, es aún difícil encontrar empresas que mantengan todos

sus elementos de medición de una manera correcta, a través de un programa de aseguramiento de mediciones.

El propósito de este trabajo es motivar el interés de los lectores por conocer y aplicar correctamente el concepto de medición e, inevitablemente, su incertidumbre asociada. En las secciones siguientes se presentarán los conceptos básicos de medición e incertidumbre, evitando el uso de ecuaciones complejas o conceptos altamente técnicos. Al final, se presentan ejemplos reales en los que se ilustra el impacto que pueden las mediciones realizadas correctamente en varias aplicaciones.

## CONCEPTOS Y TÉRMINOS METROLÓGICOS

Una de las dificultades con las que se enfrenta un metrólogo al tratar de comunicar un concepto relacionado con las mediciones, es que el vocabulario técnico de la metrología, que tiene significados muy precisos, hace uso de palabras que en el lenguaje común no necesariamente se emplean con el mismo propósito. Palabras como *precisión*, *exactitud* y *error* son empleadas frecuentemente de manera inadecuada desde el punto de vista de la terminología reconocida internacionalmente. Aún en los medios técnicos existía una falta de consenso sobre el significado de los términos empleados en metrología hasta la publicación, en 1993, del "International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology" [1], publicado por la ISO a nombre de siete organizaciones internacionales y traducido por el CENAM al español en 1994 [2].

Con el fin de acotar el alcance de nuestra materia, es útil recordar las siguientes definiciones [2]:

**Medición:**

“Conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud.”

**Magnitud:**

“Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.”

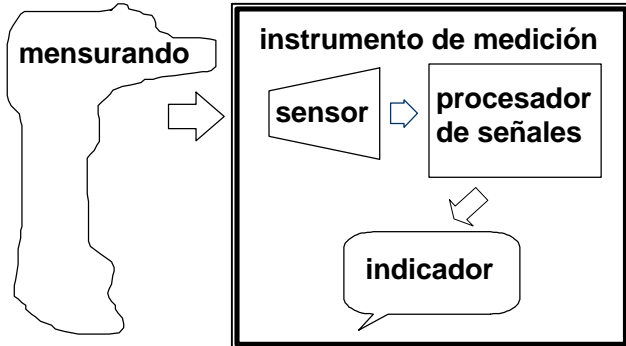
**Mensurando:**

“Magnitud particular sujeta a medición.”

En otras palabras, el ámbito de operación de la metrología se circunscribe a la determinación de atributos físicos o químicos de fenómenos naturales.

## EL PROCESO DE MEDICIÓN

Una medición generalmente sigue un proceso como el que se ilustra en la figura 1.



**Fig. 1** Proceso de medición

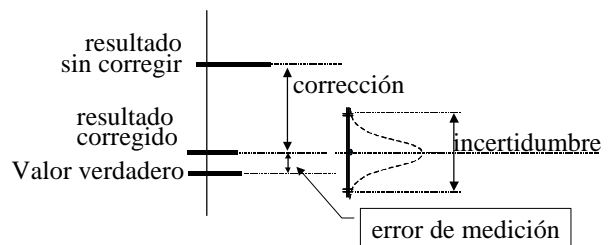
Por ejemplo, si el mensurando es el flujo de un gas a través de un tubo, el sensor puede ser una turbina que, al girar por efecto del paso del gas, produce una señal eléctrica, la cual es procesada y desplegada en un indicador digital. En cada uno de estos pasos es posible identificar fuentes de incertidumbre, por ejemplo:

- el sensor puede tener una respuesta no lineal que no se ha considerado en el procesamiento de la señal
- si el procesamiento de la señal se realiza de manera digital habrá errores de redondeo

- si el procesamiento se realiza de manera analógica (electrónica) los componentes del circuito tendrán parámetros diferentes con respecto a sus valores de diseño
- si el indicador es digital, el valor de la medición se verá truncado al número de dígitos disponibles
- si el indicador es analógico, la incertidumbre de la lectura dependerá de la resolución del instrumento y de la habilidad visual del operador

Sería difícil hacer una lista exhaustiva de los factores de influencia que se deben considerar en un proceso de medición. El metrologo debe hacer uso de su criterio para identificar los factores más significativos y combinarlos con técnicas estadísticas para obtener la mejor estimación de la incertidumbre total.

Existen una serie de conceptos asociados a la medición que se pueden entender más fácilmente con la ayuda de una ilustración como la que se presenta en la figura 2.



**Fig. 2** Términos comunes asociados a una medición

Una medición arroja el valor indicado como “resultado sin corregir.” De acuerdo a la discusión anterior, este valor corresponde a la lectura del indicador, la cual solo es una aproximación del valor verdadero (y desconocido) del mensurando. Es posible obtener una mejor estimación del valor del mensurando si analizamos los factores de influencia en la medición y tratamos de corregir el resultado con la información disponible. Por ejemplo, si se cuenta con un certificado de calibración, conocemos la diferencia de los valores que arroja nuestro instrumento contra los de un patrón de mayor exactitud. El valor de este patrón razonablemente se encuentra más cerca del valor verdadero por lo que es conveniente modificar el resultado de la medición con la diferencia indicada en el certificado y así

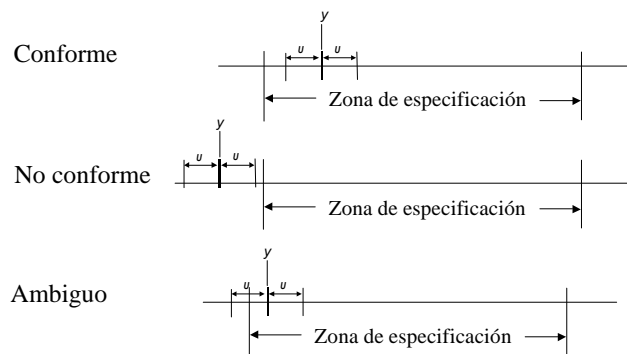
obtener el “resultado corregido”, el cual constituye nuestra mejor estimación del valor del mensurando. Aún así, casi en todos los casos permanecerá un error de medición remanente, el cual no es posible conocer pues desconocemos el valor verdadero del mensurando.

Adicionalmente, - y este tal vez es el paso más importante – es necesario estimar la incertidumbre de la medición. Recordemos su definición [2]:

**Incertidumbre de la medición**

“Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando.”

Como se muestra en la figura 2, el resultado de la medición tiene asociado un intervalo de valores en el cual, de acuerdo con la información disponible, podríamos suponer que se encuentra el valor verdadero. Sin esta estimación, la verificación del cumplimiento con estándares podría arrojar resultados incorrectos. Tomando en cuenta la importancia de incorporar el concepto de incertidumbre en la evaluación de la conformidad, la ISO ha propuesto una definición de conformidad que se muestra en la figura 3 [3]:



**Fig. 3** Incorporación de la incertidumbre en la verificación de la conformidad

Al resultado de la medición,  $y$ , se le asocia un intervalo  $\pm U$  que representa la estimación de su incertidumbre. La norma propone que cuando el intervalo  $y \pm U$  se encuentre completamente dentro de la especificación (figura 3, arriba), el cliente deberá aceptar que los productos del proveedor son conformes con la especificación. Así mismo, cuando este intervalo se encuentre completamente fuera de la especificación (figura 3, parte media) el cliente

tendrá derecho a rechazar los productos del proveedor. En el caso ambiguo (figura 3, abajo) la norma no puede establecer una solución general y las partes que decidan adoptar esta norma deberán definir reglas especiales.

El reconocimiento que le da la ISO a la estimación de incertidumbres refleja que en la actualidad no se considera aceptable evaluar la conformidad de productos o procesos cuando no se ha considerado adecuadamente la incertidumbre de las mediciones que se realizan en su verificación.

**ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN**

No existen fórmulas exactas para determinar la incertidumbre de la medición, razón por la cual se habla de “estimación de la incertidumbre” en lugar de “cálculo de incertidumbre,” pues es necesario emplear el criterio del metrologo para identificar y evaluar los factores de influencia.

La comunidad internacional ha establecido un consenso sobre la metodología preferida para cuantificar y combinar los factores de influencia, de tal manera que los resultados de las mediciones puedan ser reportados de una manera que sea interpretada uniformemente por todos los usuarios. Este consenso internacional se plasmó en el documento “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*,” (conocida como la “GUM”) publicado por la ISO, al igual que el vocabulario de metrología, a nombre de siete organizaciones internacionales [4]. Esta guía fue traducida al español por el CENAM [5] y esta versión ha sido tomada como base para el proyecto de norma mexicana PROY-NMX-CH-140-IMNC-2001 [6].

La GUM ha sido aceptada mundialmente por la comunidad metrológica por la manera formal y consistente en que sugiere simplificaciones aceptables a un muy complejo problema estadístico. En efecto, el tratamiento riguroso de la propagación de la distribución, a través de un modelo matemático del proceso de medición, es un reto aún para los profesionales de la estadística. La GUM simplifica el problema grandemente al sugerir aproximaciones lineales y presenta métodos sencillos para incorporar en términos estadísticos el conocimiento de parámetros de los que se tiene muy poca información.

No obstante este esfuerzo de simplificación, la GUM continúa siendo percibida como un documento de difícil lectura por el usuario casual, ya que hace uso de conceptos elementales de cálculo diferencial y estadística básica. De cualquier manera, no hay duda que esta metodología es la más adecuada para estimar la incertidumbre en la mayor parte de las mediciones y, dada su aceptación generalizada, es de vital importancia continuar los esfuerzos para difundir su conocimiento y aplicación.

## IMPACTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DE LAS MEDICIONES

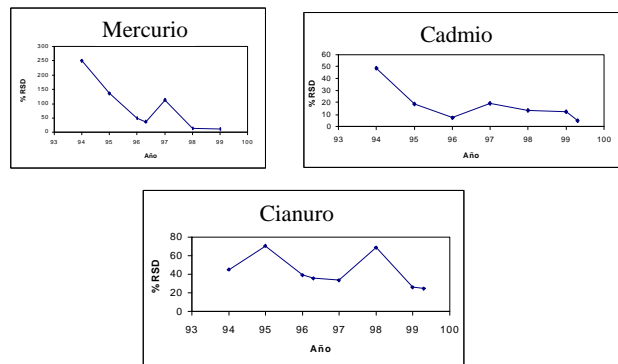
La discusión anterior nos indica que los procesos de medición son potencialmente complejos, que pueden estar sujetos a una gran cantidad de influencias externas que afectan sus resultados, que se requiere una preparación cuidadosa para realizar una buena medición y que es necesario un análisis y estimación de la incertidumbre asociada al resultado. Ante esta situación, existe una natural tendencia de buscar atajos, realizando mediciones menos cuidadosas de lo necesario y obviar la estimación de incertidumbres. En esta sección se presentan argumentos que confirman la urgencia de insistir en la correcta realización y presentación de los resultados de las mediciones pues, de lo contrario, se comprometen procesos que tienen serios impactos económicos y sociales.

### Medición de contaminantes en aguas residuales

Los gobiernos del Estado de México y del Distrito Federal mantienen una red de laboratorios aprobados para realizar las pruebas que marca la normatividad, con respecto a los niveles permisibles de metales pesados y otros contaminantes en aguas residuales de tipo industrial. Algunas de estas sustancias se encuentran de forma natural en el cuerpo humano y en los alimentos. Sin embargo, la ingestión de cantidades mayores puede ocasionar serios trastornos a la salud e incluso la muerte.

El CENAM ha colaborado con estos gobiernos desde 1994 para realizar pruebas de comparación entre los laboratorios de esta red, con el fin de asegurar su capacidad técnica. En la figura 4 se presenta la desviación estándar promedio de los resultados de las comparaciones desde 1994 hasta 2001 [7]. Esta dispersión presentaba una situación preocupante en la época de la primera comparación cuando los valores reportados para mediciones de mercurio diferían del valor certificado hasta en un 250%. La participación de estos laboratorios en

comparaciones subsecuentes les permitió identificar, en colaboración con el CENAM, las fuentes de incertidumbre que ocasionaban las principales desviaciones, logrando, en 2001, una desviación estándar de 12% para este analito. Aún cuando en algunos años la dispersión tuvo un aumento por la participación de nuevos laboratorios, la realización de estas comparaciones y su seguimiento con medidas correctivas han logrado mejorar la confiabilidad de esta red de laboratorios y, consecuentemente, contribuir a la protección de la salud humana en las entidades afectadas.



**Fig. 4** Resultados de las comparaciones entre laboratorios de análisis de aguas residuales

### Medición de flujo en la transferencia de custodia de hidrocarburos

Antes de llegar a las estaciones de gasolina u otros usuarios finales, los hidrocarburos pasan por diversas etapas en el proceso de explotación, refinación y distribución del petróleo. Cada una de estas etapas (incluyendo dos o tres pasos en la de distribución) requiere de una transferencia de custodia, ya sea dentro de las diversas empresas de Petróleos Mexicanos o entre empresas distribuidoras. En 2001, las ventas internas de hidrocarburos refinados<sup>1</sup> en el país tuvieron un valor de **171 346 millones de pesos** [8].

El CENAM, desde 1995, ha trabajado con PEMEX en programas de aseguramiento de sus mediciones de flujo de hidrocarburos que incluyen calibraciones, asesorías y cursos para su personal. No se han realizado estudios comparativos formales para cuantificar los beneficios que pudieran obtenerse de

<sup>1</sup> Incluye gas licuado, gasolinas, turbosina, diesel, combustible industrial, combustóleo, asfaltos y otros

una razonable disminución en la incertidumbre a lo largo de estos años. Sin embargo, vale la pena resaltar que por cada 0,1% de mejora en la incertidumbre se obtiene un mejor control de hidrocarburos por un valor de **171 millones de pesos** anuales, con lo cual se justifican con creces las acciones que han llevado a cabo PEMEX y CENAM en la mejora de estas mediciones.

### Impactos económicos reportados por el NIST

El *National Institute of Standards and Technology* (NIST), laboratorio nacional de metrología en Estados Unidos, solicita periódicamente a agencias independientes la realización de estudios de impacto económico de sus programas. En esta metodología los costos reales en los que incurre el NIST al llevar a cabo un programa, son comparados con estimados de los costos hipotéticos que tendrían que sufragar los usuarios en ausencia de él. El levantamiento de la información se lleva a cabo a través de encuestas a una muestra representativa de usuarios, en las que se les solicita su opinión sobre las acciones que realizaría su compañía en caso de no existir el programa del NIST.

En la tabla 1 [9], se presentan los resultados de estudios realizados para el NIST por agencias independientes, en los que se emplean dos tipos de indicadores: beneficio social y razón beneficio/costo. El beneficio social es la razón de los gastos en los que hubiera incurrido un sector en ausencia del programa del NIST, comparados con el costo para el NIST. La razón beneficio/costo es el valor presente de los beneficios entre los gastos, para las empresas del sector y el NIST, tomando como base el año 1990.

Proyecto	Beneficio social	Beneficio/costo
Resistividad	181%	37
Conductividad Térmica	63%	5
Interferencia electromagnética	266%	
Fibras ópticas	423%	
Medición de energía eléctrica	117%	
Irradiancia espectral	145%	13
Termocoples	32%	3
Productos radiofarmacéuticos	138%	97
Detectores ópticos	72%	3
Refrigerantes alternativos	433%	4

Proyecto	Beneficio social	Beneficio/costo
Mediciones de colesterol	154%	4.5
Potencia en láseres y fibras ópticas	43-136%	3-11
Patrón Josephson de tensión eléctrica	877%	5
MRC para azufre en combustibles fósiles	1 056%	113
Calibración de termopares	32%	3
Medición de colesterol	154%	4.5
Azufre en hidrocarburos	1066%	113

**Tabla 1.** Resultados de los estudios económicos realizados por el NIST

Estos resultados muestran, no solo la efectividad de los programas del NIST, sino también el potencial económico que tiene la realización correcta de las mediciones, como sucede en un país de alto desarrollo tecnológico.

### Estudios Reportados por el gobierno del Reino Unido

El Departamento de Comercio e Industria del Reino Unido (DTI, por sus siglas en inglés) tiene a su cargo la administración del Sistema Metroológico Nacional (SMN) de ese país, al que pertenecen cuatro laboratorios nacionales (NPL, NEL, LGC y NWML) y algunos contratistas que obtienen proyectos por licitación. En 1999, el DTI publicó un estudio realizado por un consultor independiente sobre los beneficios económicos que le aporta al RU este sistema metroológico [10]. Los resultados de este estudio se presentan en la tabla 2.

Proyecto	Beneficios	Costo
Contracción de combustibles	1080 M£*	75 M£
Diseminación de tiempo	90 M£	395 K£
Restauración ambiental	270 M£	100 K£
Ruido en fibras ópticas	-	380 K£
Mediciones clínicas	1000 M£**	Marginal
Medición en línea en Vauxhall***	1.8 M£	110 K£
Medición de descargas industriales	360 M£	200 K£
Medidores Vénturi para HC	10-100 M£	200 K £

\* Millones de libras esterlinas

\*\* Bajo impacto del SMN del RU

\*\*\* Proveedor extranjero

**Tabla 2.** Resultados de la evaluación del Sistema Metroológico Nacional del Reino Unido

Los resultados reportados para mediciones clínicas incluyen los beneficios que obtiene la sociedad al contar con mediciones confiables. Sin embargo, en el RU la mayor parte de los laboratorios clínicos tienen trazabilidad a los EE.UU. o a Francia por lo que la contribución del SMN es marginal. En el caso de Vauxhall, la razón beneficio / costo también es muy positiva pero se anota que el proveedor fue estadounidense. No obstante, el mensaje que podemos obtener de este estudio es el beneficio social que producen los programas metrológicos en este país, independientemente del origen del proveedor de las soluciones tecnológicas.

## CONCLUSIONES

En la primera parte de este artículo se presenta el proceso de medición y la importancia de la estimación de las incertidumbres asociadas a los resultados de las mediciones. Esta estimación es siempre importante pues las mediciones son herramientas en la toma de decisiones. Sin embargo, el esfuerzo asociado a una correcta estimación puede no ser despreciable en la medida que aumenta la complejidad del proceso y la exactitud requerida.

No obstante, la importancia económica y social de las mediciones justifican el esfuerzo que pudiera implicar su correcto tratamiento, como lo demuestran los ejemplos presentados en la parte complementaria. No hacerlo así conlleva un riesgo comparable con sus beneficios potenciales.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Rubén Lazos, Yoshito Mitani y Rocío Arvizu por sus comentarios y contribuciones con algunas de las figuras empleadas en este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, Second Edition, ISO, 1993
- [2] Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología, Publicación CNM-MMM-PT-001, CENAM, Septiembre, 1994
- [3] ISO/CD 14253-1
- [4] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, 1993, corrected and reprinted 1995
- [5] Guía BIPM/ISO para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones, Publicación CNM-MED-PT-0002, CENAM, 1994
- [6] Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones, Proyecto de norma mexicana PROY-NMX-CH-140-IMNC-2001, Comité Técnico Nacional de Normalización en Metrología (en revisión).
- [7] Arvizu-Torres, R, Perez-Castorena, A., Salas-Tellez, J.A. y Mitani-Nakanishi, Y, "Biological and environmental reference materials in CENAM", Frobenius J. Anal. Chem. 370. pp. 156-159, 2001
- [8] [www.pemex.gob.mx](http://www.pemex.gob.mx) 2002-04-27
- [9] [www.nist.gov](http://www.nist.gov) 2002-05-05
- [10] *Review of the Rationale for and Economic Benefit of the UK National Measurement System*, Department of Trade and Industry National Measurement System Policy Unit, 15 November 1999.