

# VI

## INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN

En el primer tema se introdujo el concepto de error. Ahora se introducirá otro concepto muy cercano a este. El *Diccionario de la lengua española* recoge la palabra *incertidumbre*, con los significados: Falta de certidumbre, falta de conocimiento seguro y claro de alguna cosa, y *duda*.

En cuestiones legales, la palabra *incertidumbre* puede inclinar la balanza hacia uno de los lados, o sea, ante la presencia de duda en un proceso judicial cabe la posibilidad de que el jurado declare a un reo inocente, siendo este beneficiado; pero, por ejemplo, en el comercio, esa falta de conocimiento seguro y claro sobre el resultado de la medición es compartida, por lo general, entre el comprador y el vendedor.

La naturaleza estadística del proceso de medición implica que no tenga sentido físico una medición, si no se indica la incertidumbre. Por estas razones, al reportar un resultado, es obligatorio que sea dada alguna indicación cuantitativa de la calidad de este, para poder evaluar su confiabilidad.

Sin tal indicación, los resultados no pueden ser comparados con los valores de referencia indicados por una especificación o norma y ni siquiera con ellos mismos. La intención en este caso es efectuar un acercamiento a la realización de la evaluación de la incertidumbre de la medición y a la información que se debe brindar al reportarla, ya que con frecuencia se reporta el valor de la incertidumbre de la medición, pero no se incluye como se llegó a esta y, en esas condi-

ciones, la información es de muy poca utilidad (1).

La Estadística se puede considerar como la ciencia de tomar decisiones en presencia de la incertidumbre y existen elementos que proporcionan herramientas útiles para la evaluación de esta, entre estas las que se pueden citar:

### Distribución de frecuencias

Cuando se confecciona una tabla que muestra cómo se distribuyen los diferentes datos y estos se presentan mediante una representación gráfica de los números, se tiene una distribución de frecuencia o histograma, el cual se presenta en la figura 32 (2).

### La media

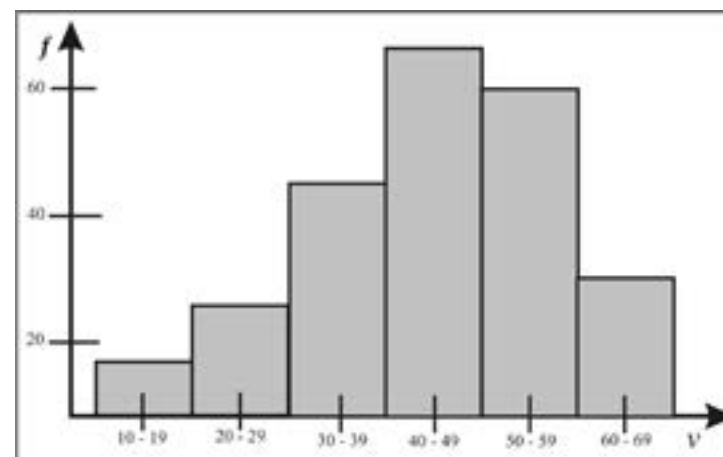


Fig. 32 Histograma. Representación gráfica de los datos.

Por la media de  $N$  números se entiende su suma dividida entre  $N$ , siendo así como en realidad se define, y su expresión matemática es:

### Medidas de variación

$$\text{Media} = \bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N}$$

Son las que permiten evaluar la aproximación de un estimado o la validez de este como resultado final. Se emplean para caracterizar la dispersión de los datos alrededor de su media.

Un caso de eso es la desviación típica de la muestra  $S$ , en la que se define la variación de los valores  $x_i$  en términos de desviaciones con respecto al valor medio. Solamente es de interés el tamaño de estas desviaciones, por lo que se puede calcular la desviación típica como:

### Distribuciones teóricas

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

Las distribuciones teóricas son aquellas que se pueden esperar sobre la base de la experiencia pasada o en consideraciones teóricas. De acuerdo con los valores que pueden asumir las variables, estas pueden ser discretas o continuas. Una distribución continua es la curva normal, la cual, en muchos aspectos, la piedra angular de la teoría de la estadística (Fig. 33). Esta es una distribución continua de frecuencia de rango infinito. Su importancia y su gráfica asociada se deben a la enorme frecuencia con que aparece en todo tipo de situaciones, por eso es un recurso de gran utilidad para evaluar la incertidumbre, ya que se puede considerar que los resultados de las mediciones corresponden a una distribución de este tipo.

La curva normal tiene forma de campana y se extiende, indefinidamente, en ambas direcciones, acercándose al eje horizontal sin alcanzarlo, no importa cuán lejos se llegue en cualquiera de las dos direcciones.

Una propiedad importante de la curva normal es que se determina, completamente, si se conoce su media ( $\mu$ ) y su desviación típica ( $\sigma$ ). Esto significa que, conociendo estos valores, la altura de la curva correspondiente se puede calcular en cualquier punto.

El área total bajo la curva normal es igual a la unidad, o sea, a

uno, y representa la frecuencia relativa con que una variable tomará valores entre dos puntos cualesquiera del eje horizontal. La figura 33 muestra que, en los resultados sobre un grupo de datos: 68 % de los datos difieren de la media por menos de una desviación típica, 95 % de los datos difieren de la media por menos de dos desviaciones típicas y 99 % de los datos difieren de la media por menos de tres desviaciones típicas.

Se había planteado ya, en un tema anterior, que para que un resultado pueda ser utilizado en el comercio global este debe ser:

1. *Confiable.*
2. *Comparable.*
3. *Seguro.*

Y que la incertidumbre era una de las bases técnicas que se debe considerar para garantizar la calidad del resultado. Desde el punto de vista científico-técnico, la incertidumbre se define (3,4) como un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pudieran ser razonablemente atribuidos a la magnitud a medir.

### Condiciones para la evaluación

La evaluación de la incertidumbre no es una tarea rutinaria puramente matemática, en esta se involucran varios factores, por ejemplo (1):

1. El conocimiento detallado de lo que se quiere medir o ensayar.
2. El conocimiento profundo del proceso de medición o de ensayo.

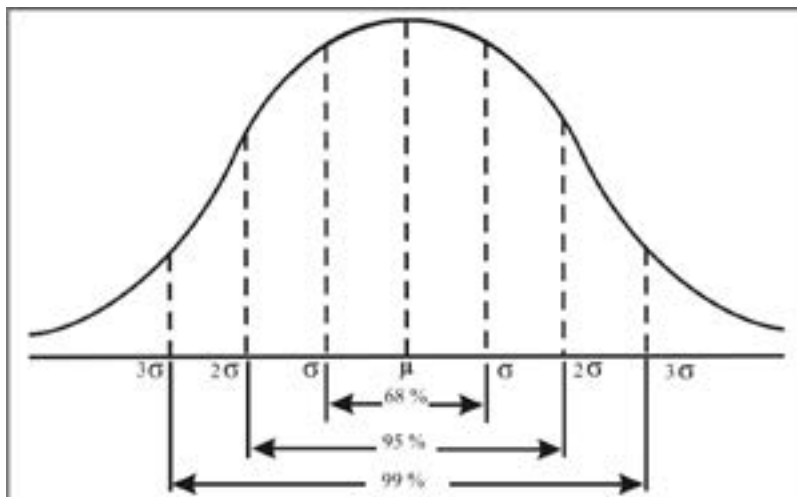


Fig. 33 Curva de distribución normal.

3. La honestidad intelectual del evaluador de la incertidumbre.
4. El pensamiento crítico del evaluador.
5. La habilidad profesional del analista u operario durante el trabajo experimental.
6. El conocimiento del uso que se vaya a dar al resultado.

La evaluación de la incertidumbre de la medición se puede hacer mediante:

1. Aproximaciones sucesivas, según se describe en la *Guía para la expresión de la incertidumbre de la medición*, conocida entre los metrologos como GUM (5).
2. La representación de características de la medición o del procedimiento de ensayo, según se describe en la serie de normas 5725 de la Organización Internacional de Normalización (ISO) relacionadas con la exactitud de los métodos de medición y

resultados (6).

Los principios establecidos en la *Guía* antes señalada son aplicables a mediciones realizadas para:

- a) Mantener y asegurar la calidad en la producción y los servicios.
- b) Cumplir con leyes y reglamentos obligatorios.
- c) La investigación científica y la innovación tecnológica.
- d) La calibración de instrumentos de medición.
- e) Desarrollar, mantener y comparar los patrones nacionales e internacionales, incluyendo los materiales de referencia.

Estos principios pueden ser aplicados, también, durante la realización de mediciones para ensayos, pero en la práctica, la tendencia es que la *Guía* tiene uso generalizado, cuando de mediciones físicas se trata, y en el caso de los ensayos se utiliza básicamente lo establecido en los documentos normativos de la serie 5725 de la ISO.

Existen diversas fuentes para la evaluación de la incertidumbre en los ensayos, de acuerdo con su tipo, por ejemplo, en el caso de los de alimentos se utilizan, entre otros, los lineamientos establecidos por el Centro para la Química Analítica en Europa (EURACHEM, siglas en inglés: A Focus of Analytical Chemistry in Europe) y el Comité Nórdico de Análisis de Alimentos (NMKL, siglas en noruego: Nordisk Metodikkomité for Naeringsmidler). Aunque, actualmente, la tendencia internacional de todas las organizaciones, es alinear en la mayor medida posible los procedimientos de evaluación, con la mayor aproximación al GUM.

## Evaluación de la incertidumbre en los ensayos

Es oportuno señalar que existen similitudes operacionales en los ensayos y en las magnitudes físicas al efectuar mediciones, pero se presentan particularidades, incluso desde la terminología, por ejemplo: Ya se presentó la definición del término *medición* como el conjunto de operaciones que tienen por objeto determinar el valor de una magnitud,

y la de *ensayo* como la operación técnica que determina una o varias características de un producto, proceso o servicio dado, de acuerdo con un procedimiento especificado.

A pesar de las diferencias en la definición de estos términos, la esencia es la misma, esto se puede entender si se analiza la figura 34.

Al evaluar la incertidumbre de la medición en los ensayos, se pueden presentar las situaciones siguientes:

1. Que se utilice un método de ensayo normalizado que contiene directrices relacionadas con la evaluación de la incertidumbre, en ese caso los laboratorios de ensayo tienen que limitarse a seguir el procedimiento de evaluación de la incertidumbre descrito en el método.
2. Que en la norma se establezca la incertidumbre de la medición en los resultados del ensayo, por lo que no es necesaria ninguna acción adicional.
3. Que la norma especifique la incertidumbre típica de medición para los resultados del ensayo, por lo que los laboratorios pueden dar esa cifra siempre que sean capaces de demostrar su plena conformidad con el método de ensayo.

La evaluación de la incertidumbre de la medición de los resultados de los ensayos ofrece a los laboratorios una serie de ventajas, entre estas:

- a) La incertidumbre de medición supone una ayuda cuantitativa en aspectos importantes como el control de riesgos y la credibilidad de los resultados de un ensayo.
- b) Incorporar la incertidumbre asociada al resultado de medición puede ofrecer una ventaja competitiva directa, al añadir valor y significado al resultado.
- c) El conocimiento de los efectos cuantitativos de magnitudes únicas en el resultado de un ensayo aumenta la fiabilidad del procedimiento de ensayo. De esta forma se pueden adoptar medidas correctivas con más eficiencia, haciéndolas más eficaces en relación con su costo.
- d) La evaluación de la incertidumbre de la medición constituye un punto de partida para optimizar los procedimientos de ensayo,

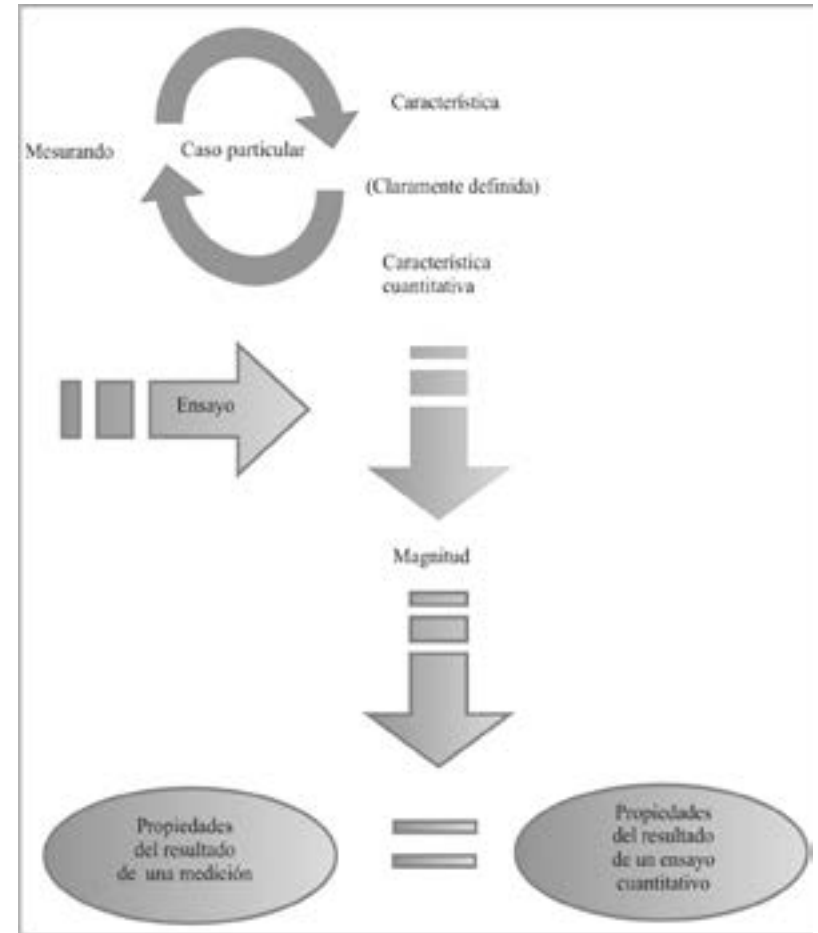


Fig. 34 Comparación entre una medición y un ensayo.

- gracias a un mejor conocimiento del proceso.
- e) Clientes, como los organismos que realizan la evaluación de la conformidad de productos, para objetivos de certificación, necesitan la información sobre la incertidumbre asociada a los resultados, para identificar el cumplimiento de estos contra

límites especificados.

En estos casos, la información sobre las características del método y su validación, son esenciales para evaluar la incertidumbre de la medición. Esta información se puede obtener por diversas vías, entre las que se encuentran:

- Datos obtenidos durante la validación y verificación de un método de ensayo antes de su aplicación en las condiciones del ensayo.
- Estudios de intercomparación del método entre diferentes laboratorios.
- Datos obtenidos de los controles de calidad durante el proceso.

## Caracterización y evaluación de la incertidumbre de la medición

Según su origen, se puede identificar la incertidumbre como:

1. Incertidumbre típica.
2. Incertidumbre típica combinada.
3. Incertidumbre expandida.

### *Incertidumbre típica (u)*

Se cuantifica mediante la desviación típica de la distribución de probabilidades del mensurando y en dependencia de la distribución, por convención, esta se puede clasificar como de tipo A o tipo B.

#### Incertidumbre tipo A

Cuando la incertidumbre se evalúa por medio del análisis estadístico de series de mediciones.

#### Incertidumbre tipo B

Cuando no se dispone de series de mediciones para evaluar la incertidumbre, pero existe un conocimiento previo a partir del cúmulo de conocimientos científico-técnicos o datos de importancia y experiencia, que permita conocer qué tipo de distribución siguen los datos.

### *Incertidumbre típica combinada ( $u_c$ )*

El resultado de una medición se considera que es el estimado de la desviación típica del resultado y se obtiene a partir de la combinación de todas las incertidumbres, ya sean de tipo A o tipo B.

### *Incertidumbre expandida (U)*

Se obtiene al multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura  $k$ , para un nivel de confianza dado.

La secuencia de trabajo para la evaluación de la incertidumbre se describe, esencialmente, en la figura 35, la cual muestra las diferentes etapas de trabajo:

1. Establecer el modelo de la magnitud a medir ( $X_i$ ) mediante la relación funcional correspondiente,  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ .
2. Determinar el estimado  $x_i$  definiendo el método de medición y las condiciones bajo las cuales se va a aplicar.
3. Determinar todas las fuentes de incertidumbre y evaluar la incertidumbre típica  $u(x_i)$  de cada estimación  $x_i$ .
4. Evaluar las covarianzas asociadas con cualesquiera estimaciones de los argumentos correlacionados.
5. Calcular el resultado de la medición, si no fue calculado antes.
6. Evaluar la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  y a partir de esta la incertidumbre expandida  $U$ .
7. Reportar el resultado junto con la incertidumbre estimada.

Dentro de este proceso el punto relacionado con la cuantificación de los componentes de la incertidumbre reviste especial atención, ya que es uno de los de mayor incidencia durante la evaluación y como se indicó

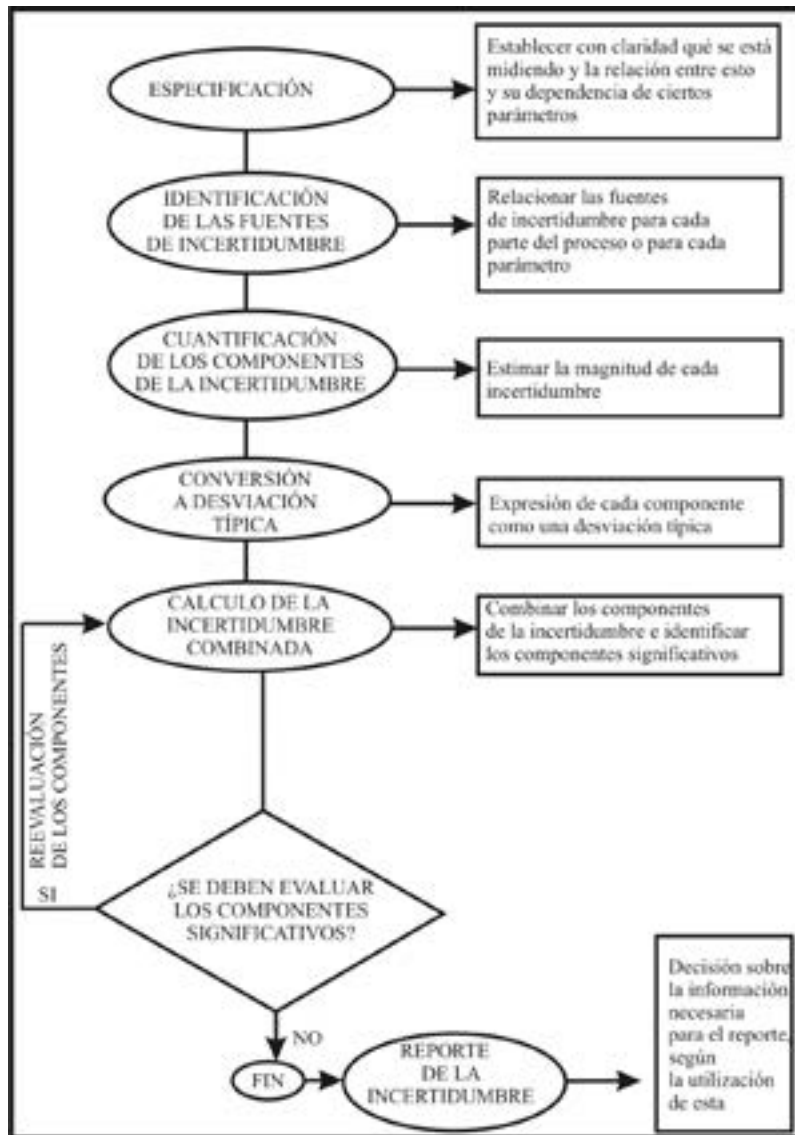


Fig. 35 Proceso para la evaluación de la incertidumbre de la medición.

antes, se debe realizar con la mayor profesionalidad y rigor posibles. En la figura 36 se muestran algunas de las fuentes de incertidumbre que, por lo general, son consideradas al efectuar la evaluación.

1. Incompleta definición del mensurando.
2. Realización imperfecta de la definición del mensurando.
3. Muestreo no representativo (la muestra medida puede no representar el mensurando definido).
4. Correcciones en la preparación del objeto a calibrar o la muestra a ensayar.
5. Inadecuado conocimiento de los efectos de las condiciones ambientales o mediciones imperfectas de estas.
6. Error del personal en la lectura de los instrumentos analógicos (tanto los patrones como los sometidos a calibración).
7. Resolución finita o umbral de discriminación de los instrumentos (tanto los patrones como los sometidos a calibración).
8. Efectos de histéresis u otros errores intrínsecos del instrumento a calibrar.
9. Incertidumbre de calibración de los instrumentos (patrones y de trabajo) y de certificación de los materiales de referencia.
10. Valores inexactos asignados a los patrones.
11. Valores inexactos de las constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y utilizados en el algoritmo de procesamiento de los datos.
12. Aproximaciones y asunciones incorporadas en el método y procedimiento de medición.
13. Variaciones en observaciones repetidas del mensurando, bajo condiciones aparentemente idénticas.
14. Tratamiento matemático inexacto del procesamiento de datos (ajuste de curvas de calibración, redondeo y otros).

Es importante resaltar que todas las fuentes de incertidumbre no tienen que ser necesariamente independientes.

### Importancia de la incertidumbre de la medición

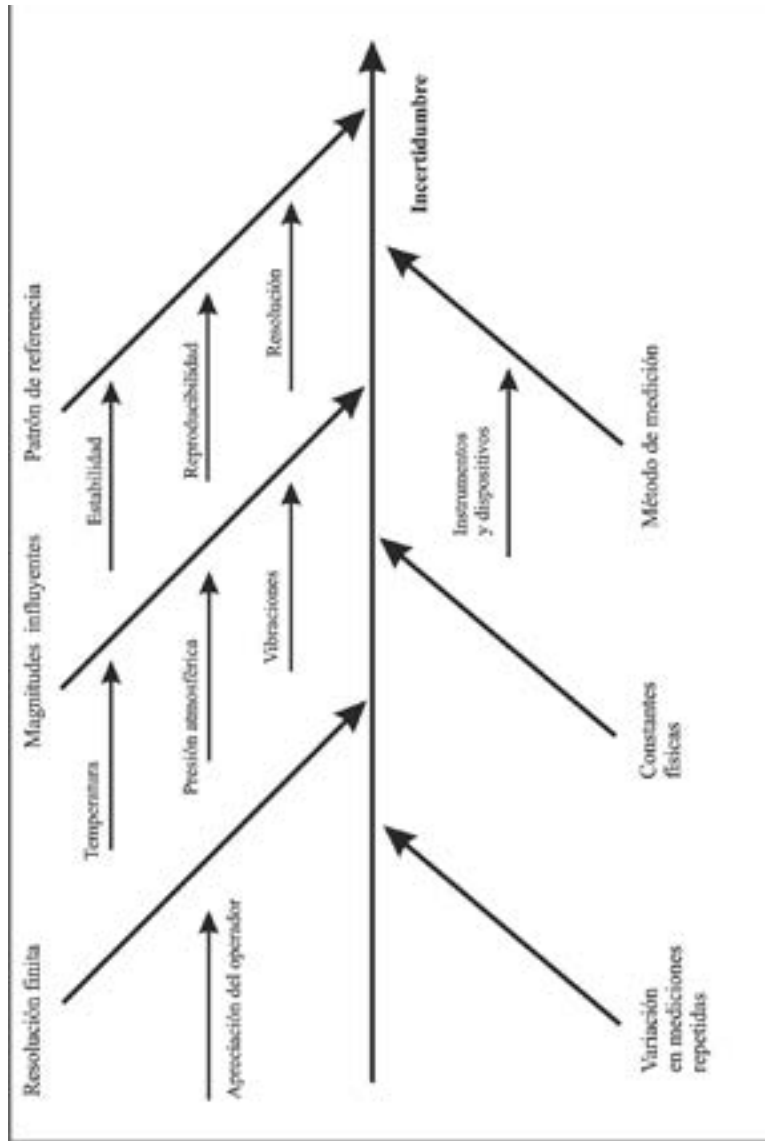


Fig. 36 Fuentes de incertidumbre.

En más de una ocasión se ha resaltado la importancia de conocer la incertidumbre de la medición. A continuación se señalan ejemplos prácticos de ¿por qué es importante y por qué es necesario?

La respuesta es bien sencilla, el conocimiento de la incertidumbre de la medición permite que los usuarios de esta tengan la capacidad de interpretar los resultados recibidos y tomar decisiones oportunas sobre su aceptación. Esto es la base para el reconocimiento mutuo de los resultados entre las partes y es una contribución a la no duplicidad de esfuerzos y recursos, y por ende a la disminución de los costos en la gestión. Vea un ejemplo real (1).

#### Comercio internacional

Se tienen dos países, uno como vendedor y el otro como comprador, durante una exportación de un lote de mariscos, donde el contenido de cloranfenicol era determinante. No se efectuó la venta porque el comprador consideró que no se cumplió esa especificación para el producto y eso fue por que no hubo homogeneidad al tratar el problema. Uno evaluó la incertidumbre de la medición en la determinación de cloranfenicol y el otro no, y esto conllevó a una interpretación errónea del resultado, se impidió el reconocimiento mutuo de este y se estableció entonces una barrera técnica para la comercialización del producto.

Las evidencias se manifiestan si se analiza la figura 37. En esta se aprecia que la incertidumbre permite conocer el intervalo de valores donde, con determinada probabilidad, el resultado se puede encontrar. Si esta no se determina, si no se cuenta con ese rango de valores, entonces se indica solo un valor, que si no coincide exactamente con el del establecido para la especificación, brinda una información no real sobre el resultado, que se convierte en la base para el rechazo. Por último ambos países estuvieron afectados, uno porque no vendió y el otro porque la población no disfrutó de los mariscos.

A partir de aquí se puede concluir que es útil considerar la incertidumbre de la medición a la hora de interpretar y decidir sobre la aceptación o no de resultados, que están acompañados de límites especificados. Esto se puede detallar en los casos A, B, C y D de la figura 38 (7).

### Caso A

El resultado de la medición está dentro de los límites, aun cuando se extienda por el intervalo de incertidumbre. Por tanto, el producto cumple con la especificación.

### Caso B

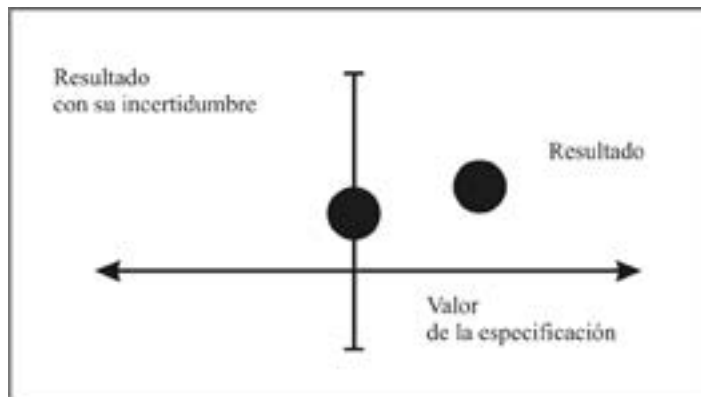


Fig. 37 Resultado de la medición con su incertidumbre.

El resultado de la medición está por debajo del límite superior, pero por un margen menor que la mitad del intervalo de incertidumbre; esto no permite establecer el cumplimiento basado en un nivel de confianza de 95 %. Sin embargo, eso indica que hay más probabilidades de que se cumpla el requisito, que no cumplirlo.

### Caso C

El resultado de la medición está por encima del límite superior, pero por un margen menor que la mitad del intervalo de incertidumbre; esto no permite establecer el cumplimiento basado en un nivel de confianza de 95 %. Sin embargo, esto indica que es más probable que el resultado no se cumpla.

### Caso D

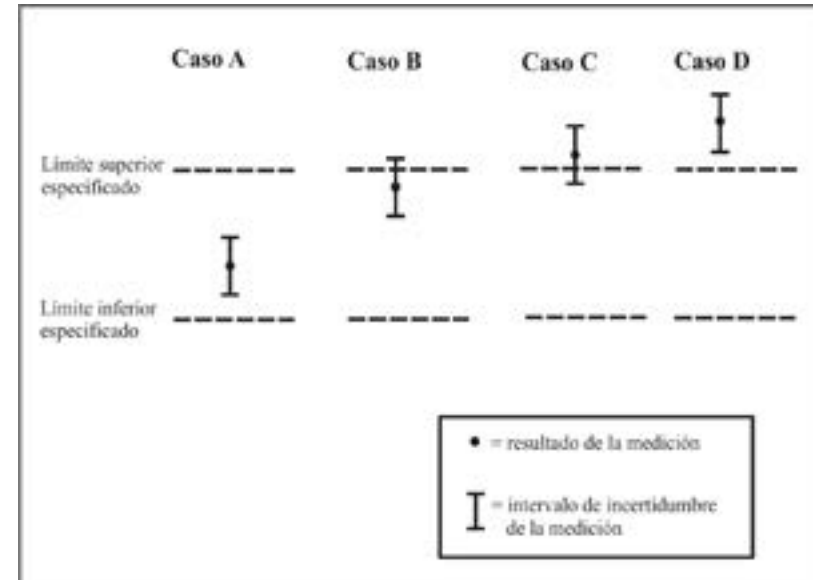


Fig. 38 Resultado, incertidumbre asociada y límites especificados.

El resultado de la medición está fuera de los límites aun cuando se extiende hacia la mitad del intervalo de incertidumbre. El producto entonces no cumple con la especificación.

Otro ejemplo de la importancia de conocer la incertidumbre es el siguiente (7):

Para efectuar la compra de un instrumento de medición, el interesado debe conocer ante todo el nivel de exactitud que requiere para la medición del parámetro en cuestión y debe, además, buscar la opción más económica que satisfaga su necesidad. En este caso, el conocimiento de la incertidumbre de la medición brinda información oportuna para la toma de decisión.

El parámetro a medir es el espesor de un trazo, para efectuar esta medición lineal se tienen dos ofertas:

1. Microscopio universal (Fig. 39), cuyo resultado de medición tiene una incertidumbre expandida  $U: \pm 0,012$  mm.
2. Microscopio de lectura, cuyo resultado de medición tiene una incertidumbre expandida  $U: \pm 0,04$  mm.

En ambos casos, el factor de cobertura es  $k = 2$  y el nivel de confianza de un 95 %.

¿Cuál es la decisión correcta?

Se pretende efectuar mediciones cuyos resultados se expresen en el orden de las décimas, entonces, la decisión correcta es solicitar el microscopio de lectura, ya que su costo es inferior al del microscopio universal y la incertidumbre de la medición efectuada con este satisface totalmente los requerimientos metrológicos del parámetro a medir.

## Reporte de la incertidumbre

El reconocimiento mutuo de los resultados de las mediciones implica la confianza en su aceptación, para garantizar esto es necesaria la armonización de cómo se realiza la evaluación de la incertidumbre, de manera que esta pueda ser reproducida sin dificultad por cualquiera de las partes interesadas, por eso, tan importante como la evaluación en sí es la elaboración correcta del reporte de los resultados, donde se describen los elementos necesarios para comprender lo que se hizo.

Un informe completo del resultado de una medición debe incluir:

1. Una descripción de los métodos utilizados para calcular el resultado de la medición y su incertidumbre a partir de observaciones experimentales, y datos de entrada.
2. Los valores y fuentes de todas las correcciones, y constantes utilizadas en el cálculo y en el análisis de la incertidumbre.
3. Una relación de todos los componentes de incertidumbre con



Fig. 39 Microscopio electrónico.

4. toda la documentación sobre cómo fue evaluado cada uno.
4. Los datos y análisis deben ser presentados de forma tal, que sus pasos o etapas importantes puedan ser seguidos fácilmente y puedan repetirse los cálculos de los resultados, si fuera necesario.
5. En dependencia del tipo de incertidumbre que se reporte, la especificación del nivel de confianza y el factor de cobertura seleccionados.
6. La especificación de las condiciones ambientales o de otro tipo, durante la medición.
7. La trazabilidad de las mediciones.

El resultado de una medición y la incertidumbre asociada se deben expresar de acuerdo con el uso que vaya a hacerse de este, es decir, si son resultados de mediciones de alto nivel de exactitud; puede ser el caso de instrumentos de medición patrones, o de mediano o bajo nivel, si se está ante la calibración de instrumentos de medición de trabajo o de ensayos de rutina, entre otros.

Si los resultados son para caracterizaciones, calibraciones, certificaciones u otros, correspondientes a mediciones de alto nivel de exactitud, este se debe expresar acompañado de la incertidumbre típica combinada, o sea: “Resultado:  $x$  (unidades);  $u_c$  (unidades)”.

Si por el contrario estos se van a utilizar para el reporte de la calibración de instrumentos de medición de trabajo o de ensayos de rutina, se expresan, por lo general, acompañados de la incertidumbre expandida, utilizando el factor de cobertura  $k = 2$ , para el nivel de confianza de 95 %. Se expresaría entonces el resultado como: “Resultado:  $x$  (unidades)  $\pm U$  (unidades)” + la indicación del factor de cobertura y el nivel de confianza, utilizados.

Los resultados de mediciones únicas pueden reflejar la diversidad de opiniones en el mercado global e impulsar el desarrollo de este disminuyendo los costos de producción, y aumentando el nivel de confianza entre vendedores y compradores.

Como se señaló en ocasiones anteriores, la economía global de hoy depende de mediciones confiables, comparables y seguras, las cuales son creíbles y aceptadas internacionalmente para eliminar barreras técnicas al comercio y sentar las bases para lograr el reconocimiento mutuo de los resultados de mediciones y ensayos, fundamentando con eso la actual filosofía de la Organización Internacional de Normalización de:

## Referencias bibliográficas

1. Reyes, P. Y.: “Incertidumbre de la medición, base para el reconocimiento mutuo y la eliminación de barreras técnicas al comercio”. *Boletín Científico-Técnico del INIMET*. No. 3, pp. 8-12, 2003.
2. Torras, G. O.: Curso de Incertidumbre de las mediciones. La Habana, 2005.

3. NC-OIML V-2: *Vocabulario Internacional de Términos Generales y Básicos de Metrología*, 1995.
4. ISO/IEC Guide 99: *International Vocabulary of Metrology-Basic and general Concepts and Associated Terms (VIM)*, 2007.
5. ISO/IEC Guide 98-3: *Uncertainty of Measurement*. Part 3: Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement (GUM: 1995), 2008.
6. ISO 5725: *Accuracy (trueness and precision) of Measurement Methods and Results*, 1998.
7. \_\_\_\_ M 3003: *The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement*. Edition 1. United Kingdom Accreditation Service.

D  
1997

UNA MEDICIÓN, UN ENSAYO, ACEPTADOS DONDE QUIERA
----------------------------------------------------