GUÍA

NC

1066: 2015

GUÍA PARA LA EXPRESIÓN DE INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Guide for the expression of uncertainty measurement

ICS: 17.020

1. Edición Enero 2015

Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 El Vedado, La Habana. Cuba. Teléfono: 830-0835 Fax: (537) 836-8048; Correo electrónico: nc@ncnorma.cu; Sitio Web: www.nc.cubaindustria.cu

Cuban National Bureau of Standards

Prefacio

La Oficina Nacional de Normalización (NC) es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba y representa al país ante las organizaciones internacionales y regionales de normalización.

La elaboración de las Normas Cubanas y otros documentos normativos relacionados se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización. Su aprobación es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en las evidencias del consenso.

Esta Norma Cubana:

- Ha sido elaborada por el Comité Técnico de Normalización NC/CTN 2 de Metrología integrado por representantes de las siguientes entidades:

- Ministerio de la Industria Alimenticia.
- OSDE AZCUBA.
- Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias.
- OSDE GESIME.
- Oficina Nacional de Normalización.
- Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología.
- Ministerio de Comercio Interior.
- OSDE Unión Cubapetróleo.
- OSDE Unión Eléctrica.
- Corporación CIMEX S.A.
- Laboratorio Cubacontrol.

- Es una adopción de la *Guía para la expresión de incertidumbre de medición (JCMG 100: 2008),* traducción en español, primera edición, septiembre 2008

Oficina Nacional de Normalización (NC)
Calle E No. 261, El Vedado, La Habana, Habana 4, Cuba.

Impreso en Cuba.

Índice

Introducción

A la hora de expresar el resultado de una medición de una magnitud física, es obligado dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de forma que quienes utilizan dicho resultado puedan evaluar su idoneidad. Sin dicha indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas. Por ello es necesario establecer un procedimiento fácilmente comprensible y aceptado universalmente para caracterizar la calidad del resultado de una medición; esto es, para evaluar y expresar su *incertidumbre*.

El concepto de *incertidumbre* como atributo cuantificable es relativamente nuevo en la historia de la medición, a pesar de que conceptos como *error* y *análisis de errores* han formado parte desde hace mucho tiempo de la práctica de la ciencia de la medición o metrología. Actualmente está ampliamente reconocido que aún cuando se hayan considerado todas las componentes conocidas o sospechadas del error, y se hayan aplicado las correcciones oportunas, aún existe una incertidumbre asociada a la corrección del resultado final; esto es, una duda acerca de la bondad con que el resultado final representa al valor de la magnitud medición.

De la misma manera que la utilización casi universal del Sistema Internacional de Unidades (SI) ha dado coherencia a todas las mediciones científicas y tecnológicas, un consenso internacional sobre la evaluación y expresión de la incertidumbre de medición permitiría dar significado a una gran variedad de resultados de medición en los campos de la ciencia, la ingeniería, el comercio, la industria y la reglamentación, para que fueran fácilmente entendidos e interpretados adecuadamente. En esta era del mercado global, es imprescindible que el método de evaluación y expresión de la incertidumbre sea uniforme en todo el mundo, de manera que las mediciones realizadas en diferentes países puedan ser comparadas fácilmente.

El método ideal para evaluar y expresar la incertidumbre del resultado de una medición debe ser:

- *universal*: el método debe ser aplicable a toda clase de mediciones y a todo tipo de datos de entrada empleados en mediciones.

La magnitud utilizada para expresar la incertidumbre debe ser:

- *consistente internamente*: debe poder obtenerse directamente a partir de las componentes que contribuyen a ella, así como ser independiente de como estén agrupadas dichas componentes y de la descomposición de sus componentes en subcomponentes.

- *transferible*: debe ser posible utilizar directamente la incertidumbre obtenida para un resultado, como componente en la evaluación de la incertidumbre de otra medición en la que intervenga ese primer resultado.

Además, en muchas aplicaciones industriales y comerciales, así como en las áreas de la salud y de la seguridad, a menudo es necesario proporcionar un intervalo en torno al resultado de la medición, en el que se espera encontrar la mayor parte de valores de la distribución que pueden ser razonablemente atribuidos a la magnitud objeto de la medición. Por tanto, el método ideal para evaluar y expresar la incertidumbre de medición debería ser capaz de proporcionar fácilmente un intervalo, en particular, aquel con la probabilidad o el nivel de confianza que corresponda de manera realista con lo requerido.

Expresión de las incertidumbres experimentales:

1.La incertidumbre de un resultado de medición consta generalmente de varias componentes, que pueden agruparse en dos tipos, según el modo en que se estime su valor numérico:

A. aquellas que se evalúan por métodos estadísticos,
B. aquellas que se evalúan por otros medios.

No siempre existe una simple correspondencia entre la clasificación en tipo A y B, y la clasificación en “aleatoria” y “sistemática” utilizada anteriormente para incertidumbres. El término “incertidumbre sistemática” puede ser confuso y debe evitarse.

Cualquier informe detallado de la incertidumbre debe incluir una lista completa de las componentes, especificando para cada una el método utilizado para obtener su valor numérico.

2. Las componentes de tipo A se expresan por medio de varianzas estimadas s_i^2(o las “desviaciones típicas” estimadas s_i) y el número de grados de libertad v_i cuando sea necesario, se darán las covarianzas.

3. Las componentes de tipo B deben expresarse por medio de varianzas estimadas uj^2, que pueden considerarse como aproximaciones a las varianzas correspondientes, cuya existencia se supone. Las magnitudes uj^2 pueden tratarse como varianzas y las uj como desviaciones típicas. Cuando sea necesario, las covarianzas deben ser tratadas de modo similar.

4. La incertidumbre combinada debe expresarse por el valor numérico obtenido al aplicar el método habitual de combinación de varianzas. La incertidumbre combinada y sus componentes deben expresarse en forma de “desviaciones típicas”.

5. Si, en aplicaciones particulares, es necesario multiplicar la incertidumbre combinada por un factor para obtener una incertidumbre global, deberá especificarse siempre el factor multiplicador utilizado.

Definiciones

Términos metrológicos generales

Las definiciones de un determinado número de términos metrológicos generales, relevantes para esta norma, tales como “magnitud medible”, “mensurando” y “error de medición” figuran en los Anexos Estas definiciones están tomadas del *Vocabulario Internacional de términos básicos y generales en Metrología* (abreviadamente VIM). Cuando uno de estos términos metrológicos o estadísticos (o un término relacionado con ellos) se utiliza por primera vez en el texto, aparece escrito en letra negrita.

El término “incertidumbre”

La palabra “incertidumbre”, significa duda. Así, en su sentido más amplio, “incertidumbre de medición", significa duda sobre la validez del resultado de una medición. Como no se dispone de distintas palabras para este *concepto general* de incertidumbre y para las magnitudes específicas que proporcionan *medicines cuantitativas* del concepto, por ejemplo la desviación típica, es necesario utilizar la palabra “incertidumbre” en estos dos sentidos diferentes.

En esta Norma, la palabra “incertidumbre” sin adjetivos se refiere tanto al concepto general de incertidumbre como a cualquier expresión cuantitativa de una medición de dicho concepto. En el caso de mediciones específicas, se utilizarán los adjetivos apropiados.

La definición formal del término “incertidumbre de medición”, desarrollada para esta norma y adoptada por el VIM [6] (VIM:1993, definición 3.9) es la siguiente:

Incertidumbre (de medición)

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

NOTA 1 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica (o un múltiplo de ella), o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.

NOTA 2 La incertidumbre de medición comprende, en general, varias componentes. Algunas pueden ser evaluadas a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, y pueden caracterizarse por sus desviaciones típicas experimentales. Las otras componentes, que también pueden ser caracterizadas por desviaciones típicas, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.

NOTA 3 Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todas las componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como las componentes asociadas a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

La definición de incertidumbre de medición dada anteriormente es totalmente operativa y se centra en el resultado de medición y en su incertidumbre evaluada. No obstante, no es incompatible con otros conceptos de incertidumbre de medición, tales como:

- medición del error posible en el valor estimado del mensurando, proporcionado como resultado de una medición;

- estimación que expresa el campo de valores dentro del cual se halla el verdadero valor del mensurando.

A pesar de que estas dos concepciones tradicionales son válidas en tanto que ideales, sin embargo se centran en magnitudes *desconocidas*: el "error" del resultado de una medición, y el "valor verdadero" del mensurando (en contraposición a su valor estimado), respectivamente. No obstante, cualquiera que sea el *concepto* de incertidumbre que se adopte, una componente de incertidumbre debe *evaluarse* siempre utilizando los mismos datos y la información asociada.

Términos específicos de esta Norma Cubana

incertidumbre típica
incertidumbre del resultado de una medición, expresada en forma de desviación típica.

evaluación Tipo A (de incertidumbre)
método de evaluación de la incertidumbre mediante análisis estadístico de series de observaciones.

evaluación Tipo B (de incertidumbre)
método de evaluación de la incertidumbre por medios distintos al análisis estadístico de series de observaciones.

incertidumbre típica combinada
incertidumbre típica del resultado de una medición, cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo éstos las varianzas o covarianzas de esas otras magnitudes, ponderadas en función de la variación del resultado de medición con la variación de dichas magnitudes.

incertidumbre expandida
magnitud que define un intervalo en torno al resultado de una medición, y en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser atribuidos razonablemente al mensurando.

NOTA 1 La fracción puede entenderse como la probabilidad o el nivel de confianza del intervalo.

NOTA 2 Para asociar un nivel específico de confianza a un intervalo definido por la incertidumbre expandida, se requieren hipótesis explícitas o implícitas sobre la distribución de probabilidad representada por el resultado de medición y su incertidumbre típica combinada. El nivel de confianza que puede atribuirse a este intervalo posee la misma validez que las hipótesis realizadas.

factor de cobertura
factor numérico utilizado como multiplicador de la incertidumbre típica combinada, para obtener la incertidumbre expandida

NOTA Un factor de cobertura k típico, toma valores comprendidos entre 2 y 3.

Conceptos básicos

Medición

El objetivo de una **medición** es determinar el **valor** del **mensurando**; esto es, el valor de la **magnitud particular** bajo medición. Por tanto, una medición comienza con una adecuada definición del mensurando, del **método de medición** y del **procedimiento de medición**.

NOTA El término “valor verdadero” (véase Anexo D) no se utiliza en esta *Norma*; los términos “valor de un mensurando” (o de una magnitud) y “valor verdadero de un mensurando” (o de una magnitud) se consideran equivalentes.

En general, el **resultado de una medición** es sólo una aproximación o **estimación** del valor del mensurando, y únicamente se halla completo cuando está acompañado de una declaración acerca de la **incertidumbre** de dicha estimación.

En la práctica, la especificación o definición requerida del mensurando es función de la **exactitud de medición** requerida por la medición. El mensurando debe definirse lo más completamente posible respecto a la exactitud requerida, de modo que para todos los efectos prácticos asociados con la medición su valor sea único. Es en este sentido, en el que se utiliza la expresión “valor del mensurando” en la presente *Norma*.

NOTA Una definición incompleta del mensurando puede dar lugar a una componente de incertidumbre tan grande que deba ser incluida en la evaluación de la incertidumbre del resultado de medición.

En muchos casos, el resultado de una medición se determina a partir de una serie de observaciones obtenidas en **condiciones de repetibilidad.**

La variación entre las observaciones repetidas se asume que es debida a **magnitudes de influencia** que pueden afectar al resultado de medición por no mantenerse totalmente constantes.

El modelo matemático de la medición, que transforma la serie de observaciones repetidas en resultado de medición es de importancia crítica ya que, además de las observaciones, incluye generalmente varias magnitudes de influencia, no conocidas con exactitud. Este conocimiento imperfecto contribuye a la incertidumbre del resultado de medición, lo mismo que lo hacen las variaciones encontradas en las observaciones repetidas y cualquier otra incertidumbre asociada al propio modelo matemático.

Esta *Norma* trata el mensurando como escalar (magnitud única). La ampliación a un conjunto de mensurandos relacionados entre sí, determinados simultáneamente en una única medición, requiere reemplazar el mensurando escalar y su **varianza** por un mensurando vectorial y por una **matriz de covarianzas.**

Errores, efectos y correcciones

En general, en una medición se cometen imperfecciones que dan lugar a un **error** en el resultado de medición. Tradicionalmente, el error se ha considerado constituido por dos componentes, una componente **aleatoria** y una componente **sistemática**

NOTA El error es un concepto ideal, y como tal no puede ser conocido con exactitud.

El error aleatorio se supone que procede de variaciones de las magnitudes de influencia, de carácter temporal y espacial, impredecibles o estocásticas. Los efectos de tales variaciones, denominados en lo sucesivo *efectos aleatorios*, dan lugar a variaciones en las observaciones repetidas del mensurando. Aunque no es posible compensar el error aleatorio de un resultado de medición, habitualmente puede reducirse incrementando el número de observaciones. Su **esperanza matemática** o **valor esperado** es igual a cero.

NOTA 1 La desviación típica experimental de la media aritmética de una serie de observaciones *no es* el error aleatorio de la media, aunque se designe así en algunas publicaciones. Se trata de una medición de la *incertidumbre* de la media, debido a los efectos aleatorios. Es imposible conocer el valor exacto del error de la media, debido a esos efectos.

NOTA 2 En esta *Norma*, se tiene gran cuidado en distinguir entre los términos “error” e “incertidumbre”. No son sinónimos, sino que representan conceptos completamente diferentes. Por tanto, no deben ser confundidos entre sí o utilizados inadecuadamente, uno en lugar del otro.

El error sistemático, al igual que el error aleatorio, no puede eliminarse, pero frecuentemente puede ser reducido. Si se produce un error sistemático sobre un resultado de medición, debido a un efecto *identificado* de una magnitud de influencia (*efecto sistemático*), dicho efecto puede cuantificarse y, si es suficientemente significativo frente a la exactitud requerida en la medición, puede aplicarse una **corrección** o un **factor de corrección** para compensarlo. Se asume que, tras la corrección, la esperanza matemática del error debido al efecto sistemático es igual a cero.

NOTA La incertidumbre de la corrección aplicada a un resultado de medición, para compensar un efecto sistemático *no es* el error sistemático (*bias* en inglés) del resultado de medición debido a dicho efecto, tal como a veces se denomina. En lugar de eso es una medición de la *incertidumbre* del resultado debido a un conocimiento incompleto del valor de corrección requerido. El error derivado de la compensación imperfecta de un efecto sistemático no puede conocerse con exactitud. Los términos “error” e “incertidumbre” deben ser utilizados correctamente, teniendo siempre cuidado de distinguirlos entre sí.

Se asume que el resultado de una medición ha sido corregido por todos los efectos sistemáticos *identificado*s como significativos, tras haber hecho todo lo posible para su identificación.

NOTA A menudo los instrumentos y sistemas de medición se ajustan o calibran utilizando patrones y materiales de referencia, con objeto de eliminar los efectos sistemáticos; aún así, deben tenerse en cuenta las incertidumbres asociadas a dichos patrones y materiales.

Incertidumbre

La incertidumbre del resultado de una medición refleja la imposibilidad de conocer exactamente el valor del mensurando. El resultado de una medición tras la corrección de los efectos sistemáticos identificados es aún una *estimación* del valor del mensurando, dada la incertidumbre debida a los efectos aleatorios y a la corrección imperfecta del resultado por efectos sistemáticos.

NOTA El resultado de una medición (tras su corrección) puede estar, sin saberlo, muy próximo al valor del mensurando (y, en consecuencia, tener un error despreciable) aunque tenga una incertidumbre elevada. Es por esto por lo que la incertidumbre del resultado de una medición no debe confundirse jamás con el error residual desconocido.

En la práctica existen numerosas fuentes posibles de incertidumbre en una medición, entre ellas:

a) definición incompleta del mensurando;
b) realización imperfecta de la definición del mensuramuestra no representativa del mensurando, la muestra analizada puede no representar al mensurando definido;
d) conocimiento incompleto de los efectos de las condiciones ambientales sobre la medición, o medición imperfecta de dichas condiciones ambientales;
e) lectura sesgada de instrumentos analógicos, por parte del técnico;
f) resolución finita del instrumento de medición o umbral de discriminación;
g) valores inexactos de los patrones de medición o de los materiales de referencia;
h) valores inexactos de constantes y otros parámetros tomados de fuentes externas y utilizadas en el algoritmo de tratamiento de los datos;
i) aproximaciones e hipótesis establecidas en el método y en el procedimiento de medición;
j) variaciones en las observaciones repetidas del mensurando, en condiciones aparentemente idénticas.

Estas fuentes no son necesariamente independientes, y algunas de ellas, de a) a i), pueden contribuir en j). Por supuesto, un efecto sistemático no identificado no puede ser tenido en cuenta en la evaluación de la incertidumbre del resultado de una medición, aunque contribuirá a su error.

Las incertidumbres se agrupan en dos categorías, según su método de evaluación, “A” y “B”. Estas categorías se refieren a la *incertidumbre* y no sustituyen a las palabras “aleatorio” y “sistemático”. La incertidumbre de una corrección por efecto sistemático conocido puede obtenerse en algunos casos mediante una evaluación Tipo A, mientras que en otros casos puede obtenerse mediante una evaluación Tipo B; lo mismo puede decirse para una incertidumbre que caracteriza a un efecto aleatorio.

NOTA En algunas publicaciones las componentes de la incertidumbre se denominan “aleatorias” y “sistemáticas”, asociándose respectivamente a errores derivados de efectos aleatorios y sistemáticos conocidos. Tal clasificación de las componentes de la incertidumbre puede resultar ambigua si se aplica en general. Por ejemplo, una componente “aleatoria” de la incertidumbre en una medición dada puede convertirse en componente “sistemática” de la incertidumbre en otra medición en la que el resultado de la primera medición se utilice como dato de entrada. Diferenciar los *métodos* de evaluación de las propias *componentes* evita tal ambigüedad. Al mismo tiempo, ello no impide la clasificación posterior de las componentes individuales, obtenidas por ambos métodos, en grupos concebidos para ser utilizados con un objetivo particular.

El propósito de la clasificación en Tipo A y Tipo B es indicar las dos formas diferentes de evaluar las componentes de incertidumbre, a efectos únicamente de su análisis; la clasificación no trata de indicar que exista alguna diferencia de naturaleza entre las componentes resultantes de ambos tipos de evaluación. Los dos tipos de evaluación se basan en **distribuciones de probabilidad**, y las componentes resultantes tanto de uno como del otro tipo de evaluación se cuantifican mediante varianzas o desviaciones típicas.

La varianza estimada u^2 que caracteriza una componente de la incertidumbre obtenida mediante una evaluación Tipo A se calcula a partir de una serie de observaciones repetidas y es la conocida varianza estimada estadísticamente s^2. La **desviación típica** estimada u, raíz cuadrada positiva de u^2, es pues $u = s$ y por conveniencia, a veces se denomina *incertidumbre típica Tipo A*. Para una componente de incertidumbre obtenida a partir de una evaluación tipo B, la varianza estimada u^2se evalúa a partir de información existente y la desviación típica estimada u a veces se denomina *incertidumbre típica Tipo B*.

Así, la incertidumbre típica tipo A se obtiene a partir de una **función de densidad de probabilidad** derivada de una **distribución de frecuencia observada** mientras que una incertidumbre típica tipo B se obtiene a partir de una función de densidad de probabilidad supuesta o asumida, basada en el grado de confianza que se tenga en la ocurrencia del suceso [a menudo denominada **probabilidad** subjetiva]. Ambas aproximaciones se basan en interpretaciones admitidas de la probabilidad.

NOTA La evaluación tipo B de una componente de incertidumbre se basa habitualmente en un conjunto de informaciones fiables.

Cuando el resultado de una medición se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes varias, la incertidumbre típica de este resultado se denomina *incertidumbre típica combinada*, y se representa por u_c. Se trata de la desviación típica estimada asociada al resultado, y es igual a la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada, obtenida a partir de todas las varianzas y **covarianzas**, como quiera que hayan sido evaluadas, utilizando lo que en esta *Norma* se denomina *ley de propagación de la incertidumbre.*

Para satisfacer las necesidades de determinadas aplicaciones industriales y comerciales, así como las exigencias de los campos de la salud y la seguridad, la incertidumbre típica combinada u_c se multiplica por un *factor de cobertura k*, obteniéndose la denominada *incertidumbre expandida U*. El propósito de esta incertidumbre expandida *U* es proporcionar un intervalo en torno al resultado de medición, que pueda contener una gran parte de la distribución de valores que razonablemente podrían ser atribuidos al mensurando. La elección del factor *k*, habitualmente comprendido entre los valores 2 y 3, se fundamenta en la probabilidad o nivel de confianza requerido para el intervalo.

NOTA El valor del factor de cobertura *k* debe especificarse siempre, para que pueda hallarse la incertidumbre típica de la magnitud medición, y pueda ser utilizada en el cálculo de la incertidumbre típica combinada de otros resultados de medición que pudieran depender de esta magnitud.

Consideraciones prácticas

Si se hacen variar todas las magnitudes de las que depende el resultado de una medición, su incertidumbre puede evaluarse por métodos estadísticos. En la práctica, sin embargo, esto no es posible, por limitaciones de tiempo y de recursos; por ello, la incertidumbre de un resultado de medición habitualmente se evalúa acudiendo a un modelo matemático de la medición, y a la ley de propagación de la incertidumbre. En la presente *Norma* está implícita la hipótesis de que a toda medición puede hacérsele corresponder un modelo matemático, hasta el grado impuesto por la exactitud requerida en la medición.

Dado que el modelo matemático puede ser incompleto, deben hacerse variar de forma práctica, hasta el grado máximo posible, todas las magnitudes relevantes, con objeto de que la evaluación de la incertidumbre esté basada tanto como sea posible en los datos observados. Cuando sea factible, la utilización de modelos empíricos de la medición, basados en datos cuantitativos observados durante un largo plazo, así como el uso de normativas de verificación y gráficos de control que indiquen que la medición está bajo control estadístico, debe ser parte del esfuerzo para obtener evaluaciones fiables de la incertidumbre. El modelo matemático debe revisarse cuando los datos obtenidos, incluyendo aquí los resultados de determinaciones independientes del mismo mensurando, demuestren que el modelo es incompleto. Un ensayo bien concebido puede facilitar en gran medición la consecución de evaluaciones fiables de la incertidumbre, siendo esta una parte importante del arte de la medición.

Con el fin de decidir si un sistema de medición funciona correctamente, a menudo se compara la variabilidad observada experimentalmente de sus valores de salida, caracterizada por su desviación típica, con la desviación típica esperada, obtenida mediante combinación de las distintas componentes de incertidumbre que caracterizan la medición. En tales casos, solamente deben considerarse aquellas componentes (hayan sido obtenidas por evaluación Tipo A o Tipo B) que puedan contribuir a la variabilidad observada experimentalmente, de los valores de salida.

NOTA Tal análisis puede verse facilitado tras clasificar las componentes en dos grupos separados y correctamente identificados, aquellas que contribuyen a la variabilidad y aquellas otras que no contribuyen.

En algunos casos, la incertidumbre de la corrección de un efecto sistemático no necesita ser incluida en la evaluación de la incertidumbre del resultado de medición. A pesar de haber realizado la evaluación de dicha incertidumbre, ésta puede despreciarse si su contribución a la incertidumbre típica combinada del resultado de medición es insignificante. Incluso la propia corrección puede ser ignorada, si el valor relativo de ésta con respecto a la incertidumbre típica combinada, es también despreciable.

En la práctica ocurre a menudo, especialmente en el campo de la metrología legal, que un instrumento es verificado mediante comparación con un patrón de medición, y las incertidumbres asociadas al patrón y al procedimiento de comparación son despreciables respecto a la exactitud exigida por el ensayo. Un ejemplo de esto es la utilización de un juego de patrones de masa calibrados, para verificar la exactitud de una balanza comercial. En tales casos, dado que las componentes de la incertidumbre son lo suficientemente pequeñas como para poder ser ignoradas, la medición puede entenderse como una forma de determinar el error del instrumento en ensayo.

La estimación del valor de un mensurando, proporcionada por el resultado de una medición, se expresa a veces en función del valor adoptado para un patrón de medición, más que en función de la unidad específica del Sistema Internacional de Unidades (SI). En tales casos, el orden de magnitud de la incertidumbre que puede atribuirse al resultado de medición, puede ser significativamente menor que si el resultado se expresara en la correspondiente unidad SI. (En efecto, el mensurando queda redefinido como la relación existente entre el valor de la magnitud bajo medición y el valor adoptado para el patrón).

Equivocaciones a la hora de registrar o analizar los datos observados pueden dar lugar a errores significativos y desconocidos en el resultado de una medición. Los errores de bulto pueden detectarse fácilmente tras revisar los datos tomados; los pequeños pueden quedar enmascarados, o parecer incluso variaciones aleatorias. La estimación de la incertidumbre no se ocupa de tales errores.

Aunque la presente *Norma* proporciona un marco de actuación para la evaluación de la incertidumbre, éste no puede nunca sustituir a la reflexión crítica, la honradez intelectual y la competencia profesional. La evaluación de la incertidumbre no es ni una tarea rutinaria ni algo puramente matemático; depende del conocimiento detallado de la naturaleza del mensurando y de la medición. La calidad y utilidad de la incertidumbre asociada al resultado de una medición dependen en último término del entendimiento, análisis crítico e integridad de aquellos que contribuyen a su evaluación.

Evaluación de la incertidumbre típica

Modelo de medición

En la mayor parte de los casos, un mensurando Y no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras N magnitudes X_1, X_2, ..., X_N, por medio de una relación funcional f:

$$Y = f(X_1, X_2, \ldots, X_N) \quad (1)$$

NOTA 1 Por simplificación, en esta *Guía* se utiliza el mismo símbolo para la magnitud física (el mensurando) y para la variable aleatoria que representa el resultado posible de una observación de dicha magnitud. Cuando se dice que X_i responde a una distribución de probabilidad particular, el símbolo se utiliza en su segundo sentido; se supone que la propia magnitud física puede venir expresada en primera aproximación por un valor único.

NOTA 2 En una serie de observaciones, el valor k-ésimo observado de X_i se indica como $X_{i\,k}$; así, si el símbolo de una resistencia es R, el k-ésimo valor observado de la resistencia es R_k.

NOTA 3 La estimación de X_i(hablando con propiedad, de su esperanza matemática) se indica como x_i.

Las *magnitudes de entrada* X_1, X_2, . . . , X_N, de las que depende la *magnitud de salida* Y pueden ser consideradas a su vez como mensurandos, pudiendo depender de otras magnitudes, junto con las correcciones y factores de corrección de los efectos sistemáticos, llegándose así a una relación funcional f compleja, que podría ser difícil de escribir en forma explícita. Además, la función f puede determinarse experimentalmente o existir solamente en forma de algoritmo calculable numéricamente. Tal como aparece en esta *Norma*, la función f debe interpretarse en su concepto más amplio; en particular, como la función que contiene cada magnitud, incluyendo todas las correcciones y factores de corrección, susceptible de contribuir a una componente significativa de la incertidumbre del resultado de medición.

En consecuencia, si los datos indican que esta función f no representa la medición con el grado impuesto por la exactitud exigida por el resultado de medición, deben introducirse en f magnitudes de entrada adicionales, para eliminar la falta de adecuación. Podría ser necesario introducir una magnitud de entrada que reflejara el conocimiento incompleto de un fenómeno que afecta al mensurando.

NOTA - La ecuación (1) puede ser tan sencilla como $Y = X_1 – X_2$. Esta expresión representa, por ejemplo, la comparación de dos determinaciones de la misma magnitud X.

El conjunto de magnitudes de entrada X_1, X_2, . . . , X_N puede clasificarse en:

- magnitudes cuyos valores e incertidumbres se determinan directamente en el curso de la medición. Estos valores e incertidumbres pueden obtenerse, por ejemplo, a partir de una única observación, o a partir de observaciones repetidas, o por una decisión basada en la experiencia. Pueden implicar la determinación de correcciones para las lecturas de los instrumentos y correcciones debidas a las magnitudes de influencia, tales como la temperatura ambiente, la presión atmosférica o la humedad;

- magnitudes cuyos valores e incertidumbres se introducen en la medición procedente de fuentes externas, tales como magnitudes asociadas a patrones, a materiales de referencia certificados y a valores de referencia tomados de publicaciones.

Una estimación del mensurando Y, representada por y, se obtiene a partir de la ecuación (1) utilizando las estimaciones de entrada $x_1, x_2, \ldots, x_N$ para los valores de N magnitudes $X_1, X_2, \ldots, X_N$. Así, la *estimación de salida* y, que es el resultado de la medición, viene dada por:

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_N) \qquad (2)$$

NOTA En algunos casos, la estimación y puede obtenerse a partir de:

$$y = \bar{Y} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} Y_k = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} f\left(X_{1,k}, X_{2,k}, \ldots, X_{N,k}\right)$$

Es decir, que y se toma como la media aritmética (véase 4.2.1) de n determinaciones independientes Y_k de Y, teniendo cada determinación la misma incertidumbre, y basándose cada una en un conjunto completo de valores observados de N magnitudes de entrada X_i obtenidas al mismo tiempo. En lugar de hacer $y = f(–X_1, –X_2, \ldots –X_N)$ donde:

$$\bar{X_i} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} X_{i,k}$$

es la media aritmética de las observaciones individuales $X_{i,k}$, esta otra forma de calcular la media puede ser preferible cuando f sea una función no lineal de las magnitudes de entrada $X_1, X_2, \ldots, X_N$, pero las dos aproximaciones son idénticas si f es una función lineal de las X_i (véanse H.2 y H.4).

La desviación típica estimada asociada a la estimación de salida o resultado de medición y, denominada *incertidumbre típica combinada* y representada por $u_c(y)$, se determina a partir de la desviación típica estimada, asociada a cada estimación de entrada x_i, denominada *incertidumbre típica* y representada por $u(x_i)$.

Cada estimación de entrada x_i, así como su incertidumbre asociada $u(x_i)$ se obtienen a partir de una distribución de valores posibles de la magnitud de entrada X_i. Esta distribución de probabilidad puede basarse en una distribución de frecuencias; es decir, en una serie de observaciones $X_{i,k}$ de las X_i, o puede tratarse de una distribución supuesta *a priori*. Las evaluaciones Tipo A de las componentes de la incertidumbre típica se basan en distribuciones de frecuencia mientras que las evaluaciones Tipo B se basan en distribuciones supuestas *a priori*. Debe tenerse en cuenta que, en los dos casos, las distribuciones son modelos utilizados para representar nuestro nivel de conocimiento.

Evaluación Tipo A de la incertidumbre típica

En la mayor parte de los casos, la mejor estimación disponible de la esperanza matemática μ_q de una magnitud q que varía al azar [es decir, de una **variable aleatoria**], de la que se han obtenido n observaciones independientes q_k en las mismas condiciones de medición, es la **media aritmética** $\bar{q}$ de las n observaciones:

$$\bar{q} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} q_k \qquad (3)$$

Así, para una magnitud de entrada X_i estimada a partir de n observaciones repetidas e independientes $X_{i,k}$, la media aritmética $–X_i$ obtenida mediante la ecuación (3) es utilizada como estimación de entrada x_i en la ecuación (2) para determinar el resultado de medición y, tomándose pues x_i=–X_i .

Los valores de las observaciones individuales q_k difieren en razón de las variaciones aleatorias de las magnitudes de influencia o de efectos aleatorios. La varianza experimental de las observaciones, que estima la varianza σ^2 de la distribución de probabilidad de q, viene dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(q_j - \bar{q}\right)^2 \quad (4)$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada positiva $s(q_k)$, denominada **desviación típica experimental**, representan la variabilidad de los valores observados q_k, o más específicamente, su dispersión alrededor de su media $\bar{q}$.

La mejor estimación de σ^2 ($\bar{q}$) = σ^2 / n, varianza de la media, viene dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{s^2(q_k)}{n} \qquad (5)$$

La varianza experimental de la media s^2(q) y la **desviación típica experimental de la media** $s(q)$ (B.2.17, nota 2), igual a la raíz cuadrada positiva de $s^2(q)$, determinan la bondad con que q estima la esperanza matemática μ_q de q, y una u otra pueden ser utilizadas como medición de la incertidumbre de q .

De este modo, para una magnitud de entrada X_i obtenida a partir de n observaciones repetidas e independientes $X_{i,k}$, la incertidumbre típica $u(x_i)$ de su estimación x_i= X_i es $u(x_i)$=$s(X_i)$, con s^2(X_i) calculada según la ecuación (5). Por comodidad, $u^2(x_i)$ = s^2(X_i) y $u(x_i)$=$s(X_i)$ son a veces llamadas *varianza Tipo A* e *incertidumbre típica tipo A,* respectivamente.

NOTA 1 El número de observaciones n debe ser suficientemente grande para garantizar que q proporcione una estimación fiable de la esperanza matemática μ_q de la variable aleatoria q, y para que s^2 (q) proporcione una estimación fiable de la varianza σ^2 (q)=σ^2/n. La diferencia entre s^2 (q) y σ^2 (q) debe tomarse en consideración cuando se determinan intervalos de confianza En este caso, si la distribución de probabilidad de q es una distribución normal la diferencia se tiene en cuenta mediante la distribución-*t.*

NOTA 2. Aunque la varianza s^2 (q) es la magnitud fundamental, la desviación típica s (q) es, en la práctica, más cómoda de utilizar porque posee la misma dimensión que q y un valor más significativo que el de la varianza.

En una medición bien diseñada y bajo control estadístico, puede existir una estimación de la varianza s_p^2, combinada o procedente de un conjunto previo de resultados (o la desviación típica experimental correspondiente s_p) que la caracterice. En tal caso, cuando se determina el valor de un mensurando q a partir de n observaciones independientes, la varianza experimental de la media aritmética q de las observaciones resulta mejor estimada por s_p^2/n que por $s^2(q_k)/n$ y la incertidumbre típica es $u = s_p/\sqrt{n}$.

Frecuentemente, la estimación xi de una magnitud de entrada X_i se obtiene a partir de una curva ajustada a resultados experimentales por el método de mínimos cuadrados. Las varianzas estimadas y las incertidumbres típicas resultantes de los parámetros de ajuste característicos de la curva y de cualesquiera puntos predecibles pueden calcularse habitualmente por procedimientos estadísticos conocidos.

El número de **grados de libertad** v_i de $u(x_i)$ igual a $n - 1$ en el caso más sencillo, donde $x_i = -X_i$ y $u(x_i) = s(X_i)$, se calcula a partir de n observaciones independientes y debe figurar siempre que se indiquen las evaluaciones Tipo A de las componentes de la incertidumbre.

Si existe una correlación entre las variaciones aleatorias de las observaciones de una magnitud de entrada, por ejemplo en función del tiempo, la media y la desviación típica experimental de la media, pueden ser **estimadores** inadecuados de los **estadísticos** buscados. En tales casos, las observaciones deben analizarse por métodos estadísticos especialmente diseñados para tratar series de mediciones correlacionadas variando aleatoriamente.

NOTA Estos métodos especiales se utilizan para tratar las mediciones de patrones de frecuencia. Sin embargo, también es posible utilizarlos en mediciones de otras magnitudes metrológicas, cuando se pasa de mediciones a corto plazo a mediciones a largo plazo, donde la hipótesis de variaciones aleatorias no correlacionadas pudiera no ser válida.

La discusión sobre la evaluación Tipo A de la incertidumbre típica no pretende ser exhaustiva; existen numerosas situaciones, algunas relativamente complejas, que pueden tratarse por métodos estadísticos. Un ejemplo importante se refiere a la utilización de modelos de calibración, a menudo basados en el método de mínimos cuadrados, para evaluar las incertidumbres procedentes de variaciones aleatorias, tanto a corto como a largo plazo, de los resultados de comparaciones de patrones materializados de valor desconocido, tales como bloques patrón o patrones de masa, con patrones de referencia de valor conocido. En tales situaciones de medición, relativamente sencillas, las componentes de la incertidumbre pueden evaluarse frecuentemente mediante análisis estadístico de los datos obtenidos a partir de diseños experimentales, consistentes en secuencias anidadas de mediciones del mensurando, para diferentes valores de las magnitudes de las que depende esta técnica se denomina análisis de la varianza.

NOTA En los niveles inferiores de la cadena de calibración, en los que se supone frecuentemente que los patrones de referencia son conocidos con exactitud, por haber sido calibrados en un laboratorio nacional o primario, la incertidumbre de un resultado de calibración puede ser una simple incertidumbre típica tipo A, evaluada mediante la desviación típica experimental obtenida a partir de un conjunto acumulado de resultados, que representa al mensurando.

Evaluación Tipo B de la incertidumbre típica

Para una estimación x_i de una magnitud de entrada X_i no obtenida a partir de observaciones repetidas, la varianza estimada asociada $u^2(x_i)$ o la incertidumbre típica $u(x_i)$ se establecen mediante decisión científica basada en toda la información disponible acerca de la variabilidad posible de X_i. El conjunto de la información puede comprender:

- resultados de mediciones anteriores;
- experiencia o conocimientos generales sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos utilizados;
- especificaciones del fabricante;
- datos suministrados por certificados de calibración u otros tipos de certificados;
- incertidumbres asignadas a valores de referencias procedentes de libros y manuales.

Por conveniencia, los valores $u^2(x_i)$ y $u(x_i)$ así evaluados, se denominan respectivamente *varianza Tipo B* e *incertidumbre típica Tipo B*.

NOTA Cuando x_i se obtiene a partir de una distribución *a priori*, la varianza asociada debería escribirse correctamente como $u^2(X_i)$ pero, con ánimo de simplificar, a lo largo de la *Norma*se utilizan $u^2(x_i)$ y $u(x_i)$.

La utilización correcta del conjunto de informaciones disponibles para una evaluación Tipo B de la incertidumbre típica se fundamenta en la experiencia y en el conocimiento general, siendo ésta una disciplina que puede aprenderse con la práctica. No debe olvidarse que una evaluación Tipo B de la incertidumbre típica puede ser tan fiable como una evaluación Tipo A, especialmente en situaciones en las que una evaluación Tipo A se basa en un número relativamente pequeño de observaciones estadísticamente independientes.

NOTA Si la distribución de probabilidad de q es normal, entonces $\sigma\,[s\,(q)]/\sigma\,(q)$, desviación típica relativa de $s\,(q)$ respecto a $\sigma\,(q)$, es aproximadamente igual a $[2(n - 1)]^{-1/2}$. Tomando entonces $\sigma\,[s\,(q)]$ como la incertidumbre de $s\,(q)$, la incertidumbre relativa de $s\,(q)$ es del 24 % para $n = 10$ observaciones, y del 10 % para $n = 50$ observaciones.

Si la estimación x_i se obtiene a partir de una especificación del fabricante, de un certificado de calibración, de una publicación o de otra fuente, y su incertidumbre viene dada como un múltiplo específico de una desviación típica, la incertidumbre típica $u(x_i)$ es simplemente el cociente entre el valor indicado y el factor multiplicador, y la varianza estimada $u^2(x_i)$ es el cuadrado de dicho cociente.

NOTA En numerosos casos, apenas se dispone de información acerca de las componentes individuales que han permitido obtener la incertidumbre indicada. Esto carece generalmente de importancia para expresar la incertidumbre según lo sugerido en esta *Norma*, ya que todas las incertidumbres típicas son tratadas de la misma forma cuando se calcula la incertidumbre típica combinada de un resultado de medición

La incertidumbre de x_i no siempre viene expresada como un múltiplo de una desviación típica. En su lugar, puede definir un intervalo correspondiente a un nivel de confianza del 90, 95 ó 99 por ciento. Salvo indicación en contra, puede suponerse que se ha utilizado una **distribución normal** para calcular la incertidumbre, obteniéndose la incertidumbre típica de x_i mediante simple división del valor de incertidumbre dado por el factor correspondiente de la distribución normal. Dicho factor, para los tres niveles de confianza citados, es 1,64; 1,96 y 2,58.

NOTA Tal hipótesis no es necesaria si la incertidumbre se da siguiendo las recomendaciones de esta *Norma*, la cual subraya que siempre debe citarse el factor de cobertura utilizado.

Consideremos el caso en que, en base a las informaciones disponibles, puede afirmarse que "existe una probabilidad del 50 % de que el valor de la magnitud de entrada X_i esté comprendido en el intervalo de $a-$ a $a+$". Si puede suponerse que los valores posibles de X_i se distribuyen aproximadamente según una distribución normal, entonces la mejor estimación x_i de X_i puede tomarse en el centro del intervalo. Además, si la semiamplitud del intervalo es $a = (a+ - a-)/2$, puede tomarse $u(x_i) = 1{,}48a$, ya que, para una distribución normal de esperanza matemática μ y desviación típica σ, el intervalo $\mu \pm \sigma/1{,}48$ cubre aproximadamente el 50 % de la distribución.

Consideremos un caso análogo pero en el que, según la información de que se dispone, puede decirse que "en dos de cada tres casos, el valor X_i se encuentra en el intervalo comprendido entre $a-$ y $a+$"(en otras palabras, la probabilidad de que X esté comprendida en este intervalo es del orden de 0,67; es decir, del 67 %). En este caso puede suponerse 'razonablemente' que $u(x_i) = a$, puesto que para una distribución normal de esperanza matemática μ y desviación típica σ, el intervalo μ ± σ abarca aproximadamente el 68,3 % de la distribución.

NOTA Si se utilizara el percentil normal 0,967 42, correspondiente a la probabilidad p = 2/3; es decir, si se escribiera $u(x_i) = a/0{,}967\ 42 = 1{,}033\ a$, se daría al valor de $u(x_i)$ mucha más importancia de la que en realidad se justifica.

En otros casos, puede que únicamente sea posible estimar límites (inferior y superior) para X_i, en particular, para poder decir que "la probabilidad de que el valor de X_i esté comprendido en el intervalo de $a-$ a $a+$ es a todos los efectos prácticamente igual a uno y la probabilidad de que X_i se encuentre fuera de este intervalo es esencialmente cero". Si *no se posee ningún conocimiento específico* sobre los valores posibles de X_i dentro del intervalo, puede asumirse que X_i puede encontrarse con igual probabilidad en cualquier punto del mismo (distribución uniforme o rectangular de los valores posibles (véase figura 2a). Entonces x_i, esperanza matemática de X_i, está en el punto medio del intervalo, $x_i = (a- + a+)/2$, con varianza asociada:

$$u^2(x_i) = (a+ - a-)^2/12 \quad (6)$$

Si la diferencia entre los límites, $a+ - a-$, se considera como $2a$, entonces la ecuación (6) se convierte en:

$$u^2(x_i) = a^2/3 \quad (7)$$

NOTA Cuando una componente de incertidumbre determinada de esta forma contribuye significativamente a la incertidumbre de un resultado de medición, es prudente obtener más datos complementarios para su evaluación posterior.

Los límites superior e inferior $a+$ y $a-$ para la magnitud de entrada X_i pueden no ser simétricos respecto a su mejor estimación x_i; en concreto, si el límite inferior es $a- = x_i - b-$ y el límite superior es $a+ = x_i + b+$, ello significa que $b- \neq b+$. Dado que, en este caso, x_i (esperanza matemática de X_i) no está en el centro del intervalo de $a-$ a $a+$, la distribución de probabilidad de X_i puede no ser uniforme en todo el intervalo. No obstante, si no se dispone de información suficiente para elegir una distribución conveniente, diferentes modelos conducirán a diferentes expresiones de la varianza. En ausencia de tal información, la aproximación más sencilla es:

$$u^2(x_i) = \frac{(b_+ + b_-)^2}{12} = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12}$$

que es la varianza de una distribución rectangular de amplitud total $b+ + b-$

Dado que no había conocimiento específico sobre los valores posibles de X_i dentro de sus límites estimados de $a-$ a $a+$, únicamente se pudo suponer que X_i tenía la misma probabilidad de tomar cualquiera de los valores en el interior de esos límites y una probabilidad nula fuera de ellos. Tales discontinuidades en forma de función escalón para una distribución de probabilidad, raramente se dan en la física. En numerosos casos, es más realista suponer que los valores cerca de los límites son menos probables que los situados en torno al centro. Es entonces razonable reemplazar la distribución rectangular simétrica por una distribución trapezoidal simétrica de pendientes iguales (un trapecio isósceles), con una base mayor de anchura $a+ - a- = 2a$ y una base menor de anchura $2a\beta$, donde $0 \leq \beta \leq 1$. Cuando $\beta \to 1$ esta distribución trapezoidal se aproxima a una distribución rectangular, mientras que para β = 0 es una distribución triangular (véase figura 2b). Suponiendo tal distribución trapezoidal para X_i, se encuentra que la esperanza matemática de X_i es $x_i = (a- + a+)/2$ y su varianza es:

$$u^2(x_i) = a^2(1 + \beta^2) / 6 \quad (9a)$$

que se convierte, para la distribución triangular con β = 0, en:

$$u^2(x_i) = a^2 / 6$$

NOTA 1 Para una distribución normal de esperanza matemática μ y desviación típica σ, el intervalo μ ± 3σ comprende aproximadamente el 99,73 por ciento de la distribución. Si los límites superior e inferior, $a+$ y $a-$, definen un intervalo con un 99,73 por ciento, en lugar de con un 100 por ciento, y si X_i puede suponerse distribuida de forma aproximadamente normal, en lugar de carecer de información específica sobre X_i entre los límites, como en 4.3.7, entonces $u^2(x_i) = a^2/9$. En comparación, la varianza de una distribución rectangular simétrica de semi amplitud a es $a^2/3$ [ecuación (7)] y la de una distribución triangular simétrica de semiamplitud a es $a^2/6$ [ecuación (9b)]. Los valores de las varianzas para las tres distribuciones son sorprendentemente similares a pesar de las grandes diferencias de información que las justifican.

NOTA 2 La distribución trapezoidal es equivalente a la convolución de dos distribuciones rectangulares [10], una de semiamplitud a_1 igual a la semiamplitud media del trapecio, $a_1 = a\,(1+\beta)/2$, y la otra de semiamplituda_2 igual a la anchura media de una de las porciones triangulares del trapecio, $a_2 = a\,(1-\beta)/2$. La varianza de la distribución es $u^2 = a_1^2/3 + a_2^2/3$. La distribución resultante puede interpretarse como una distribución rectangular cuya anchura 2a1 posee una incertidumbre representada a su vez por una distribución rectangular de anchura 2a2 y explica el hecho de que los límites de una magnitud de entrada no son conocidos con exactitud. Incluso si a2 fuera el 30 por ciento de a1, u superaría a a1/√3 en menos de un 5 por ciento.

Es importante no contabilizar dos veces las mismas componentes de incertidumbre. Si una componente de incertidumbre procedente de un efecto particular se obtiene mediante una evaluación Tipo B, no debe introducirse como componente independiente en el cálculo de la incertidumbre típica combinada del resultado de medición, salvo, si acaso, la parte de efecto que no contribuye a la variabilidad de las observaciones. La incertidumbre debida a la parte del efecto que contribuye a la variabilidad observada está ya incluida en la componente de incertidumbre obtenida mediante análisis estadístico de las observaciones.

Los ejemplos de evaluación Tipo B de la incertidumbre típica, de 4.3.3 a 4.3.9, se proponen únicamente a título de muestra. Además, es necesario basar lo más posible las evaluaciones de incertidumbre en datos cuantitativos, como se subraya en 3.4.1 y 3.4.2.

Ilustración gráfica de la evaluación de la incertidumbre típica

La figura 1 representa la estimación del valor de una magnitud de entrada X_i y la evaluación de la incertidumbre de dicha estimación, a partir de la distribución desconocida de los valores medidos posibles de X_i, o a partir de la distribución de probabilidad de X_i, muestreada mediante observaciones repetidas.

En la figura 1(a) se asume que la magnitud de entrada X_i es una temperatura t y que su distribución desconocida es una distribución normal, con esperanza matemática μ_t=100 °C y desviación típica σ = 1,5 °C.Su función de densidad de probabilidad es entonces

$$p(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp[-(t-\mu_t)^2/2\sigma^2]$$

NOTA La definición de función de densidad de probabilidad $p(z)$ requiere que se cumpla la relación $\int p(z)\, dz = 1$

La figura 1(b) presenta un histograma de n = 20 observaciones repetidas t_k de la temperatura t supuestamente tomadas al azar, a partir de la distribución de la figura 1(a). Para obtener el histograma, las 20observaciones, cuyos valores se dan en la tabla 1, se han agrupado en intervalos de anchura 1 °C.

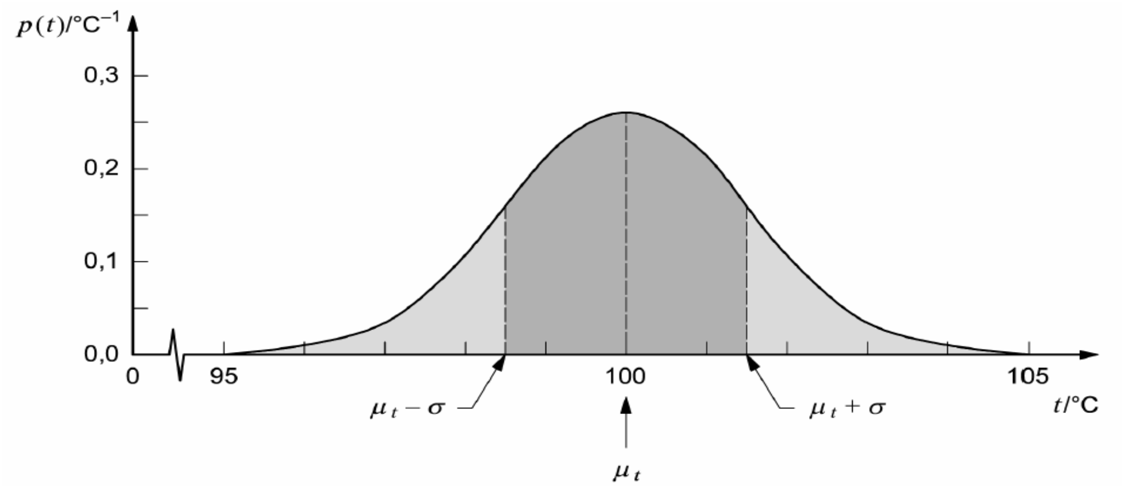
(Naturalmente, no es necesario preparar un histograma para el análisis estadístico de los datos).

Tabla 1 — Veinte observaciones repetidas de la temperatura *t* agrupadas en intervalos de 1 ºC

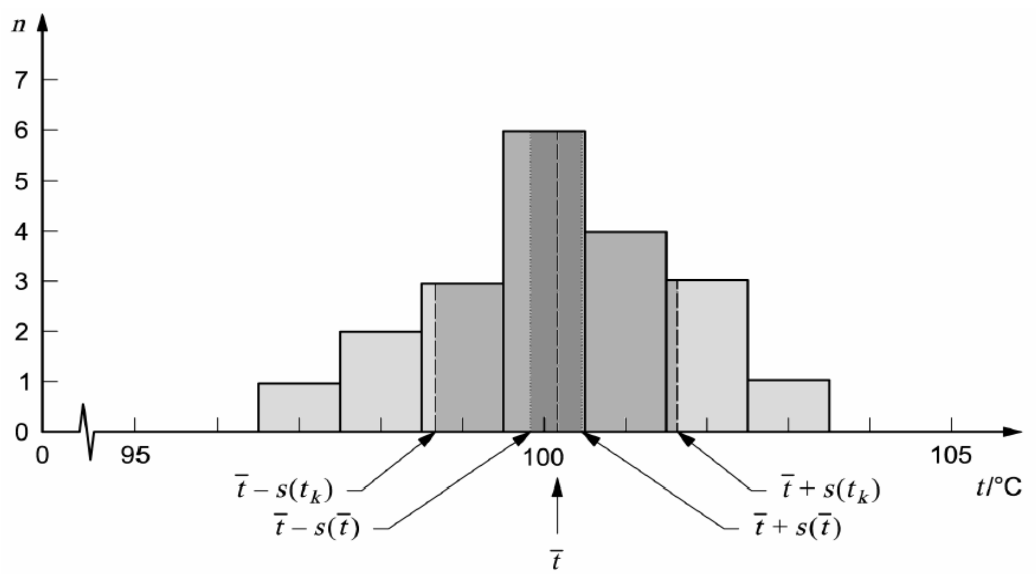
Intervalo $t1 \leq t < t2$		Temperatura t / ºC
$t1$ / ºC	$t2$ / ºC	
94,5	95,5	-
95,5	96,5	-
96,5	97,5	96,90
97,5	98,5	98,18; 98,25
98,5	99,5	98,61; 99,03; 99,49
99,5	100,5	99,56; 99,74; 99,89; 100,07;100,33; 100,42
100,5	101,5	100,68; 100,95; 101,11; 101,20
101,5	102,5	101,57; 101,84; 102,36
102,5	103,5	102,72
103,5	104,5	-
104,5	105,5	-

La media aritmética t de las n = 20 observaciones, calculada según la ecuación (3) es t = 100,145 °C ≈100,14 °C, tomándose ésta como la mejor estimación de la esperanza matemática μ_t de t, en base a los datos disponibles. La desviación típica experimental $s(t_k)$, calculada según la ecuación (4), es $s(t_k)$ = 1,489 °C ≈1,49 °C, y la desviación típica experimental de la media, $s(t)$, calculada según la ecuación (5), que es además la incertidumbre típica $u(t)$, es $u(t) = s(t) = s(t_k) / 20$ = 0,333 °C≈ 0,33 °C (para los cálculos posteriores, interesa conservar todas las cifras).

NOTA Aunque los datos de la tabla 1 son verosímiles, dado el uso tan extendido de los termómetros electrónicos digitales de alta resolución, se dan a título ilustrativo, no debiendo necesariamente interpretarse como descriptivos de una medición real.

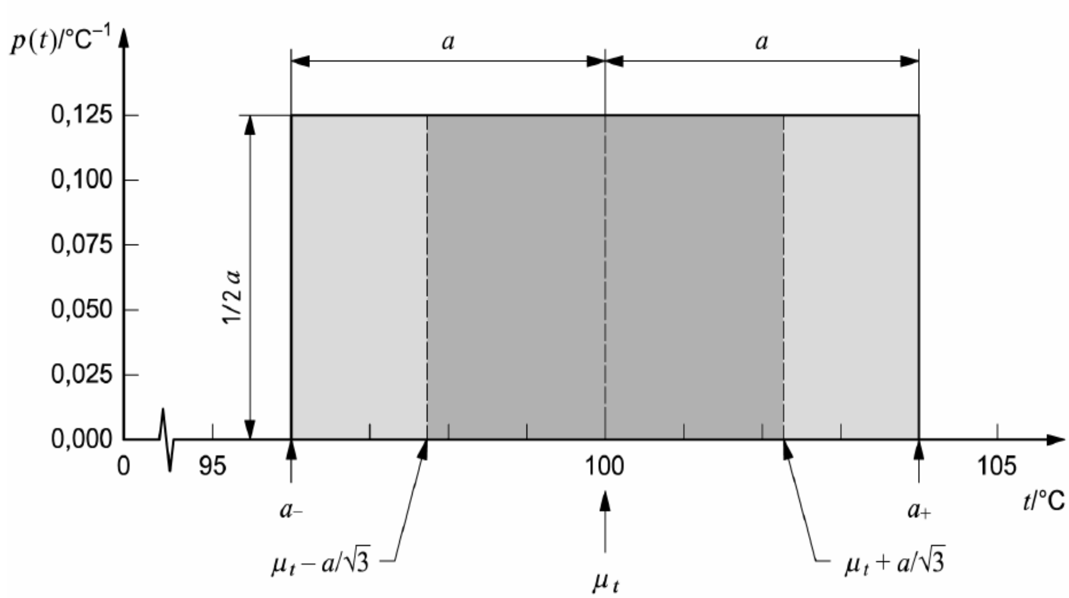


a)

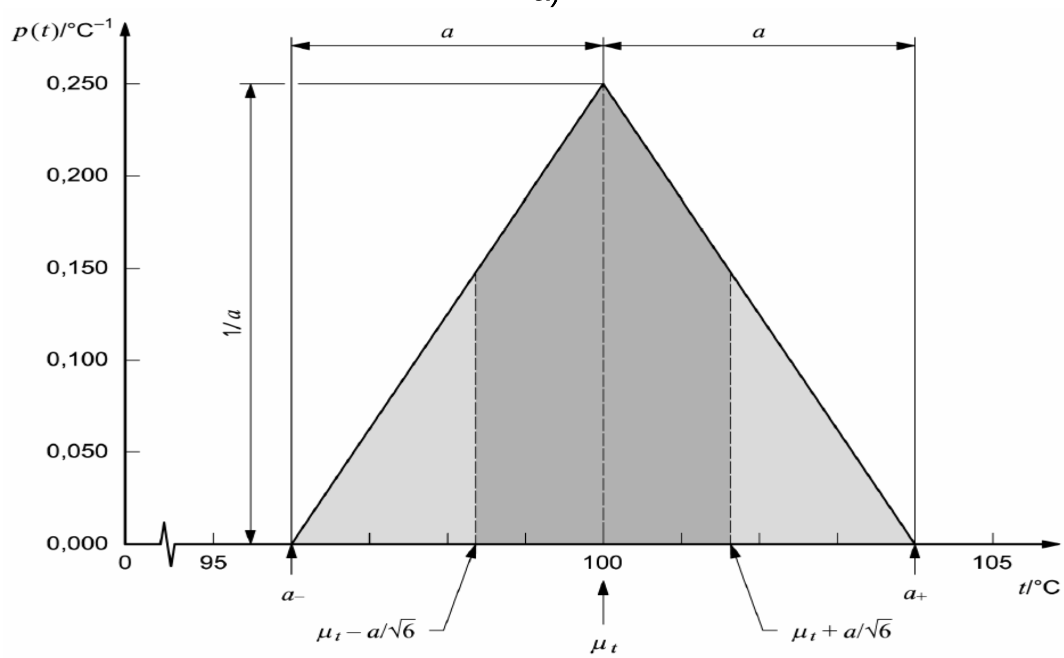


b)

Figura 1 — Representación gráfica de la evaluación de la incertidumbre típica de una magnitud de entrada, a partir de observaciones repetidas.



a)



b)

Figura 2 — Representación gráfica de la evaluación de la incertidumbre típica de una magnitud de entrada, a partir de una distribución supuesta *a priori*

La figura 2 representa la estimación del valor de una magnitud de entrada X_i y la evaluación de la incertidumbre de esta estimación, a partir de una distribución supuesta *a priori* de los valores posibles de X_i, o de una distribución de probabilidad de X_i basada en la totalidad de las informaciones disponibles. En los dos casos presentados, se supone de nuevo que la magnitud de entrada es una temperatura *t.*

En el caso ilustrado en la figura 2a, se supone que se tiene poca información sobre la magnitud de entrada t y que todo lo que puede hacerse es suponer que t se describe *a priori* por una distribución de probabilidad rectangular simétrica, de límite inferior a- = 96 °C, y de límite superior a+ = 104 °C, con una semiamplitud $a = (a_+ - a_-)/2$ = 4°C. La densidad de probabilidad de t es entonces:

$$p(t) = 1/2, \text{ para } a- \leq t \leq a+$$

$$p(t) = 0, \text{ para el resto de los casos.}$$

La mejor estimación de t es su esperanza matemática $\mu_t = (a_+ + a_-)/2$ = 100 °C. La incertidumbre típica de esta estimación es $u(\mu_t) = a / \sqrt{3} \approx 2{,}3$ °C, según C.3.2 [véase ecuación (7)].

Para el caso ilustrado en la figura 2b, se supone que la información disponible concerniente a t es menos limitada, pudiendo venir descrita t *a priori* por una distribución de probabilidad triangular simétrica, con el mismo límite inferior a- = 96 °C, el mismo límite superior a+ = 104 °C y, por tanto, la misma semiamplitud $a = (a_+ - a_-)/2$ = 4 °C. La densidad de probabilidad de t será entonces:

$$p(t) = (t - a_-)/a, \text{ para } a_- \leq t \leq (a_+ + a_-)/2$$

$$p(t) = (a_+ - t)/a2, \text{ para } (a_+ + a_-)/2 \leq t \leq a_+$$

$$p(t) = 0, \text{ para el resto de los casos.}$$

La esperanza matemática de t es $\mu_t = (a_+ + a_-)/2$ = 100 °C, según C.3.1. La incertidumbre típica de esta estimación es $u(\mu_t) = a/\sqrt{6} \approx 1{,}6$ °C [véase ecuación (9b)].

El valor anterior, $u(\mu_t)$ = 1,6 °C, puede compararse con $u(\mu_t)$ = 2,3 °C obtenida en 4.4.5 a partir de una distribución rectangular con la misma anchura de 8 °C; con σ = 1,5 °C de la distribución normal de la figura1(a) cuyo intervalo, de −2,58σ a +2,58σ, es casi 8 °C, lo que corresponde al 99 por ciento de la distribución; y con $u(t)$ = 0,33 °C, obtenida anteriormente a partir de 20 observaciones, suponiendo que han sido obtenidas aleatoriamente a partir de la misma distribución normal.

Determinación de la incertidumbre típica combinada

Magnitudes de entrada no correlacionadas

Este apartado trata el caso en que todas las magnitudes de entrada son **independientes.** El caso en que existe una relación entre dos o más magnitudes de entrada; es decir, en que son dependientes entre sí o **correlacionadas,** se analizará más adelante.

La incertidumbre típica de y, siendo y la estimación del mensurando Y; es decir, el resultado de medición, se obtiene componiendo adecuadamente las incertidumbres típicas de las estimaciones de entrada x_1, x_2, ..., x_N. Esta *incertidumbre típica combinada* de la estimación y se nota como $u_c(y)$.

NOTA Por las mismas razones apuntadas anteriormente, en todos los casos se utilizan los símbolos $u_c(y)$ y $u_c^2(y)$.

La incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $u_c^2(y)$, dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) \qquad (10)$$

donde *f* es la función dada en la ecuación (1). Cada $u(x_i)$ es una incertidumbre típica evaluada como se describe anteriormente (evaluación Tipo A) o (evaluación Tipo B). La incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ es una desviación típica estimada y caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando *Y.*

La ecuación (10) y su equivalente para las magnitudes de entrada correlacionadas, ecuación (13), basadas ambas en un desarrollo en serie de Taylor de primer orden de $Y=f(X_1, X_2, ..., X_N)$, expresan lo que en la *Norma* se denomina *ley de propagación de la incertidumbre*.

NOTA Cuando la no linealidad de *f* resulta significativa, es necesario incluir términos de orden más elevado en el desarrollo en serie de Taylor para la expresión de $u_c^2(y)$, ecuación (10). Cuando la distribución de cada X_i es simétrica alrededor de su media, los términos más importantes de orden inmediatamente superior que deben ser añadidos a los términos de la ecuación (10) son:

Las derivadas parciales $\partial f / \partial x_i$ son iguales a $\partial f / \partial X_i$, calculadas para $X_i = x_i$ (véase más abajo la nota 1). Estas derivadas, frecuentemente denominadas coeficientes de sensibilidad, describen cómo varía la estimación de salida *y*, en función de las variaciones en los valores de las estimaciones de entrada $x_1, x_2, ..., x_N$. En particular, la variación de *y* producida por una pequeña variación Δx_i en la estimación de entrada *xi* viene dada por $(\Delta y)_i = (\partial f / \partial x_i)(\Delta x_i)$. Si esta variación es debida a la incertidumbre típica de la estimación x_i, la variación correspondiente de *y* es $(\partial f / \partial x_i)\, u(x_i)$. La varianza combinada $u_c^2(y)$ puede considerarse entonces como una suma de términos, cada uno de ellos representando la varianza estimada asociada a *y*, debido a la varianza estimada asociada a cada estimación de entrada x_i. Esto conduce a escribir la ecuación (10) en la forma

$$u_c^2(y) = \sum_{j=1}^{N} [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^{N} u_i^2(y) \qquad (11a)$$

donde:

$$C_i \equiv \partial f / \partial x_i \,, u_i(y) \equiv |c_i| u(x_i) \qquad (11b)$$

NOTA 1 En rigor, las derivadas parciales son $\partial f / \partial x_i = \partial f / \partial X_i$, calculadas para las esperanzas matemáticas de las X_i. En la práctica, no obstante, las derivadas parciales se estiman mediante:

$$\frac{\partial f}{x_i} = \frac{\partial f}{X_i}\bigg|_{x_1, x_2, ..., x_N}$$

Magnitudes de entrada correlacionadas

La ecuación (10) y las derivadas de ella, tales como la ecuación (11a), son válidas solamente si las magnitudes de entrada X_i son independientes o no correlacionadas. Si algunas de las X_i están correlacionadas significativamente, es imprescindible tener en cuenta las correlaciones.

Cuando las magnitudes de entrada están correlacionadas, la expresión adecuada para la varianza combinada $u_c^2(y)$ asociada al resultado de medición es:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j}u(x_i,x_j) = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j}u(x_i,x_j) \qquad (13)$$

Donde x_i y x_j son las estimaciones de X_i y X_j, y $u(x_i,x_j) = u(x_i,x_j)$ es la covarianza estimada asociada a x_i y x_j. El grado de correlación entre x_i y x_j viene dado por el **coeficiente de correlación** estimado (C.3.6).

$$r(x_i,x_j) = \frac{u(x_i,x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \qquad (14)$$

Donde $r(x_i,x_j) = r(x_i,x_j)$ y $-1 \leq r(x_i,x_j) \leq +1$. Si las estimaciones x_i y x_j son independientes, $r(x_i,x_j) = 0$, y una variación en una de las dos no implica una variación en la otra.

El término de covarianza de la ecuación (13) puede escribirse en función de los coeficientes de correlación, más fácilmente interpretables que las covarianzas, como:

$$2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j}u(x_i)u(x_j)r(x_i,x_j) \qquad (15)$$

La ecuación (13), con ayuda de la ecuación (11b), se transforma entonces en

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} c_i^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} c_i c_j u(x_i)u(x_j)r(x_i,x_j) \qquad (16)$$

Consideremos dos medias aritméticas $\bar{q}$ y $\bar{r}$, que estiman las esperanzas matemáticas μ_q y μ_r de dos magnitudes q y r que varían aleatoriamente, y supongamos que $\bar{q}$ y $\bar{r}$ se calculan a partir de n pares independientes de observaciones simultáneas de q y r, realizadas en las mismas condiciones de medición. Entonces, la covarianza de $\bar{q}$ y $\bar{r}$ viene estimada por

$$s(\bar{q},\bar{r}) = \frac{1}{n(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(q_k - \bar{q})(r_k - \bar{r}) \qquad (17)$$

Donde q_k y r_k son las observaciones individuales de las magnitudes q y r, y donde $\bar{q}$ y $\bar{r}$ se calculan a partir de las observaciones, según la ecuación (3). Si las observaciones son realmente no correlacionadas, puede esperarse un valor de la covarianza calculada próximo a cero.

De esta forma, la covarianza estimada de dos magnitudes de entrada correlacionadas X_i y X_i, estimadas por sus medias X_i y X_j, y determinadas a partir de pares independientes de observaciones simultáneas repetidas, viene dada por $u(x_i, x_j) = s(X_i,X_j)$, con $s(X_i, X_j)$ calculada según la ecuación (17). Esta aplicación de la ecuación (17) es una evaluación Tipo A de la covarianza. El coeficiente de correlación estimado de X_i y X_j se obtiene a partir de la ecuación (14).

Las correlaciones entre magnitudes de entrada no pueden ignorarse, siempre que existan y sean significativas. Las covarianzas asociadas deben evaluarse experimentalmente, si ello es posible, haciendo variar las magnitudes de entrada correlacionadas o utilizando el conjunto de informaciones disponibles acerca de la variabilidad correlacionada de las magnitudes en cuestión (evaluación Tipo B de la covarianza). La intuición basada en la experiencia y en el conocimiento general es especialmente necesaria a la hora de estimar el grado de correlación entre dos magnitudes de entrada, derivado de efectos causados por influencias comunes, tales como la temperatura ambiente, la presión atmosférica y la humedad. Por suerte, en numerosos casos, los efectos de estas magnitudes de influencia presentan una dependencia mutua despreciable, y las magnitudes de entrada afectadas pueden suponerse no correlacionadas. Si no es posible hacer tal suposición, pueden evitarse estas correlaciones introduciendo las magnitudes de influencia comunes como magnitudes de entrada adicionales e independientes.

Determinación de la incertidumbre expandida

Aunque $u_c(y)$ puede ser utilizada universalmente para expresar la incertidumbre de un resultado de medición, frecuentemente es necesario, en ciertas aplicaciones comerciales, industriales o reglamentarias, o en los campos de la salud o la seguridad, dar una medición de la incertidumbre que defina, alrededor del resultado de medición, un intervalo en el interior del cual pueda esperarse encontrar gran parte de la distribución de valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando.

Incertidumbre expandida

La nueva expresión de la incertidumbre, que satisface la exigencia de proporcionar un intervalo tal como el que se indica anteriormente, se denomina *incertidumbre expandida*, y se representa por U. La incertidumbre expandida U se obtiene multiplicando la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ por un *factor de cobertura* k:

$$U = ku_c(y) \qquad (18)$$

Resulta conveniente expresar el resultado de una medición en la forma $Y = y \pm U$, lo que se interpreta como que la mejor estimación del valor atribuible al mensurando Y es y, y que puede esperarse que en el intervalo que vade $y - U$ a $y + U$ esté comprendida una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser razonablemente atribuidos a Y. Tal intervalo puede también expresarse por $y - U \leq Y \leq y + U$.

Siempre que sea posible, debe estimarse e indicarse el nivel de confianza p asociado al intervalo definido por U. Debe tenerse en cuenta que el hecho de multiplicar $u_c(y)$ por una constante no añade información nueva, sino que presenta en forma diferente la información previamente disponible. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que, en numerosos casos, el nivel de confianza p (especialmente para valores de p cercanos a 1) es bastante incierto, no solamente debido al limitado conocimiento de la distribución de probabilidad representada por y y por $u_c(y)$ (particularmente en las regiones extremas), sino también por causa de la propia incertidumbre de $u_c(y)$.

Elección del factor de cobertura

El valor del factor de cobertura k se elige en función del nivel de confianza requerido para el intervalo $y - U$ a $y + U$. En general, k toma un valor entre 2 y 3. No obstante, en aplicaciones especiales, k puede tomarse fuera de dicho margen de valores. La experiencia y el conocimiento amplio sobre la utilización de los resultados de medición pueden facilitar la elección de un valor conveniente para k.

Idealmente, debería poderse escoger un valor específico del factor de cobertura k que proporcionase un intervalo $Y = y \pm U = y \pm k\ u_c(y)$ correspondiente a un nivel de confianza particular p, por ejemplo, un 95 o un 99 por ciento y, de forma equivalente, para un valor dado de k, debería ser posible enunciar de forma inequívoca el nivel de confianza asociado a dicho intervalo. Sin embargo, no es fácil lograr esto en la práctica puesto que se requiere un conocimiento amplio de la distribución de probabilidad caracterizada por el resultado de medición y, y su incertidumbre típica combinada $u_c(y)$. Aunque estos parámetros son de importancia crítica, sin embargo no son suficientes por sí mismos para poder establecer intervalos con niveles de confianza exactamente conocidos.

No obstante, a menudo para series de mediciones donde la distribución de la probabilidad representada por y y $u_c(y)$ es aproximadamente normal, y el número de grados efectivos de libertad de $u_c(y)$ es significativo. Cuando este es el caso, frecuente en la práctica, se puede suponer que $k = 2$ representa un intervalo con un nivel de confianza de aproximadamente el 95 por ciento, y que $k = 3$ representa un intervalo con un nivel de confianza de aproximadamente el 99 por ciento.

Evaluación y expresión de la incertidumbre

Las etapas a seguir para evaluar y expresar la incertidumbre del resultado de una medición, tal como se presentan en la *Norma*, pueden resumirse como sigue:

1) Expresar matemáticamente la relación existente entre el mensurando Y y las magnitudes de entrada X_i de las que depende Y según $Y = f(X_1, X_2, ..., X_N)$. La función f debe contener todas las magnitudes, incluyendo todas las correcciones y factores de corrección que pueden contribuir significativamente a la incertidumbre del resultado de medición.

2) Determinar x_i, el valor estimado de la magnitud de entrada X_i, bien a partir del análisis estadístico de una serie de observaciones, bien por otros métodos.

3) Evaluar la *incertidumbre típica* $u(x_i)$ de cada estimación de entrada x_i. Para una estimación de entrada obtenida por análisis estadístico de series de observaciones, la incertidumbre típica se evalúa tal como se describe en esta *Norma* (*evaluación Tipo A de la incertidumbre típica*). Para una estimación de entrada obtenida por otros medios, la incertidumbre típica $u(x_i)$ se evalúa tal como se describe en esta *Norma* (*evaluación Tipo B de la incertidumbre típica*).

4) Evaluar las covarianzas asociadas a todas las estimaciones de entrada que estén correlacionadas.

5) Calcular el resultado de medición; esto es, la estimación y del mensurando Y, a partir de la relación funcional f utilizando para las magnitudes de entrada Xi las estimaciones xi obtenidas en el paso 2.

6) Determinar *la incertidumbre típica combinada* $u_c(y)$ del resultado de medición y, a partir de las incertidumbres típicas y covarianzas asociadas a las estimaciones de entrada, tal como se describe en la *Norma*. Si la medición determina simultáneamente más de una magnitud de salida, calcular sus covarianzas.

7) Si es necesario dar una *incertidumbre expandida* U, cuyo fin es proporcionar un intervalo $[y - U, y + U]$ en el que pueda esperarse encontrar la mayor parte de la distribución de valores que podrían, razonablemente, ser atribuidos al mensurando Y, multiplicar la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ por un factor de cobertura k, normalmente comprendido en un margen de valores entre 2 y 3, para obtener $U= k\, u_c(y)$.

Seleccionar k considerando el nivel de confianza requerido para el intervalo.

Anexo A
Términos metrológicos generales

Las definiciones de los términos metrológicos generales relacionados con esta *Norma* y que se ofrecen aquí, están tomadas del *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*- (abreviadamente VIM), 2ª edición, 1993, publicado por la Organización Internacional de Normalización (ISO), en nombre de las siete organizaciones que apoyaron su desarrollo y nombraron los expertos que lo prepararon: la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), la Federación Internacional de Química Clínica (IFCC), la propia ISO, la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP), y la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML). El VIM debe ser la primera fuente a consultar para las definiciones de los términos no incluidos en el presente Anexo o en el texto de la *Norma*.

Definiciones

magnitud (mensurable)
atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que es susceptible de ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

valor (de una magnitud)
expresión cuantitativa de una magnitud particular, generalmente en forma de una unidad de medición multiplicada por un número.

valor verdadero (de una magnitud)
valor en consistencia con la definición de una magnitud particular dada.

NOTA 1 Es un valor que se obtendría mediante una medición perfecta.

NOTA 2 Todo valor verdadero es por naturaleza indeterminado.

NOTA 3 Es mejor utilizar en conjunción con “valor verdadero” el artículo indefinido “un” que el artículo definido “el”, porque el valor verdadero puede tener varios valores que se correspondan con la definición de una magnitud particular dada.

valor convencionalmente verdadero (de una magnitud)
valor atribuido a una magnitud particular y aceptado, a veces por convenio, como teniendo una incertidumbre apropiada para un uso dado.

NOTA 1 En un lugar dado, el valor atribuido a la magnitud realizada por un patrón de referencia puede ser tomado como un valor convencionalmente verdadero.

NOTA 2 El “valor convencionalmente verdadero” es denominado a veces, **valor asignado**, **mejor estimación** del valor, **valor convencional** o **valor de referencia**.

NOTA 3 A menudo se utiliza un gran número de resultados de mediciones de una magnitud para establecer un valor convencionalmente verdadero.

medición
conjunto de operaciones que tienen por finalidad determinar un valor de una magnitud.

NOTA El desarrollo de las operaciones puede ser automático.

principio de medición
base científica de una medición.

método de medición
sucesión lógica de operaciones, descritas de una forma genérica, utilizadas en la ejecución de las mediciones.

NOTA El método de medición puede ser clasificado de diversas formas tales como:

- método de substitución
- método diferencial
- método de cero

procedimiento de medición
conjunto de operaciones, descritas de forma específica, utilizadas en la ejecución de mediciones particulares, conforme a un método dado.

mensurando
magnitud particular sometida a medición.

NOTA La definición de un mensurando puede necesitar indicaciones relativas a magnitudes tales como el tiempo, la temperatura y la presión.

magnitud de influencia
magnitud que no es el mensurando, pero que tiene un efecto sobre el resultado de la medición.

NOTA Se entiende que la definición de magnitud de influencia incluye valores asociados a los patrones de medición, a los materiales de referencia y a datos de referencia, de los cuales puede depender el resultado de una medición, así como fenómenos tales como fluctuaciones a corto plazo del instrumento de medición y magnitudes tales como temperatura ambiente, presión barométrica y humedad.

resultado de una medición
valor atribuido a un mensurando, obtenido por medición.

NOTA 1 Cuando se da un resultado, se indicará claramente si se refiere a:

- la indicación,
- el resultado sin corregir,
- el resultado corregido,

y si aquél proviene de una media obtenida a partir de varios valores.

NOTA 2 Una expresión completa del resultado de una medición incluye información sobre la incertidumbre de medición.

resultado sin corregir
resultado de una medición, antes de la corrección del error sistemático.

resultado corregido
resultado de una medición, después de la corrección del error sistemático.

exactitud de medición
grado de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando.

NOTA 1 El concepto “exactitud” es cualitativo.

NOTA 2 El término “precisión” no debe utilizarse por “exactitud”.

repetibilidad (de los resultados de las mediciones)
grado de concordancia entre resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando, realizadas bajo las mismas condiciones de medición.

NOTA 1 Estas condiciones se denominan **condiciones de repetibilidad.**

NOTA 2 Las condiciones de repetibilidad comprenden:

- el mismo procedimiento de medición,
- el mismo observador,
- el mismo instrumento de medición, utilizado en las mismas condiciones,
- el mismo lugar,
- repetición durante un corto período de tiempo.

NOTA 3 La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente por medio de las características de dispersión de los resultados.

reproducibilidad (de los resultados de las mediciones)
grado de concordancia entre los resultados de las mediciones del mismo mensurando, realizadas bajo diferentes condiciones de medición.

NOTA 1 Para que una expresión de la reproducibilidad sea válida, es necesario especificar las condiciones de medición que han variado.

NOTA 2 Las condiciones variables pueden comprender:

- principio de medición
- método de medición
- observador
- instrumento de medición
- patrón de referencia
- lugar
- condiciones de utilización
- tiempo.

NOTA 3 La reproducibilidad puede expresarse cuantitativamente por medio de las características de la dispersión de los resultados.

NOTA 4 Los resultados aquí considerados son habitualmente resultados corregidos.

desviación típica experimental
para una serie de *n* mediciones de un mismo mensurando, la magnitud $s(q_k)$ que caracteriza la dispersión de los resultados, viene dada por la fórmula.

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n}(q_k - \bar{q})^2}{n-1}}$$

siendo, q_k el resultado de la k-ésima medición y $\bar{q}$ la media aritmética de los n resultados considerados.

incertidumbre (de medición)
parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

NOTA 1 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica (o un múltiplo de ésta), o la semiamplitud de un intervalo con un nivel de confianza determinado.

NOTA 2 La incertidumbre de medición comprende, en general, varias componentes. Algunas pueden ser evaluadas a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones típicas experimentales. Las otras componentes, que también pueden ser caracterizadas por desviaciones típicas, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.

NOTA 3 Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todas las componentes de la incertidumbre, comprendidas las que provienen de efectos sistemáticos, tales como las asociadas a correcciones y a patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

error (de medición)
resultado de una medición menos un valor verdadero del mensurando.

NOTA 1 Considerando que un valor verdadero no puede ser determinado, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero.

NOTA 2 Cuando sea necesario hacer la distinción entre “error” y “error relativo”, el primero es a veces denominado **error absoluto de medición**. No hay que confundirlo con el **valor absoluto del error**, que es el módulo del error.

error relativo
relación entre el error de medición y un valor verdadero del mensurando

NOTA Considerando que un valor verdadero no puede ser determinado, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero.

error aleatorio
resultado de una medición menos la media de un número infinito de mediciones del mismo mensurando, efectuadas bajo condiciones de repetibilidad.

NOTA 1 El error aleatorio es igual al error menos el error sistemático.

NOTA 2 Como no pueden hacerse más que un número finito de mediciones, solamente es posible determinar una estimación del error aleatorio.

error sistemático
media que resultaría de un número infinito de mediciones del mismo mensurando efectuadas bajo condiciones de repetibilidad, menos un valor verdadero del mensurando.

NOTA 1 El error sistemático es igual al error menos el error aleatorio.

NOTA 2 El valor verdadero, como el error sistemático y sus causas, no pueden ser conocidos completamente.

corrección
valor sumado algebraicamente al resultado sin corregir de una medición, para compensar un error sistemático

NOTA 1 La corrección es igual al opuesto del error sistemático estimado.

NOTA 2 Puesto que el error sistemático no puede conocerse perfectamente, la compensación no puede ser completa.

factor de corrección
factor numérico por el que se multiplica el resultado sin corregir de una medición para compensar un error sistemático.

NOTA Puesto que el error sistemático no puede conocerse perfectamente, la compensación no puede ser completa.

Anexo B
Términos y conceptos estadísticos básicos

Origen de las definiciones

Las definiciones de los términos estadísticos básicos dados en este anexo han sido tomadas de la Norma Internacional ISO 3534-1:1993. Esta debería ser la primera fuente de consulta para las definiciones de términos no incluidos en este anexo.

Definiciones

probabilidad
número real, entre 0 y 1, asociado a un suceso aleatorio

NOTA Puede referirse a la frecuencia relativa de un suceso, dentro de una larga serie, o al grado de credibilidad de que un suceso ocurra. Para un alto grado de credibilidad, la probabilidad es próxima a 1.

variable aleatoria
variable que puede tomar cualquiera de los valores de un conjunto determinado de valores, y a la que se asocia una *distribución de probabilidad.*

NOTA 1 Una variable aleatoria que puede tomar únicamente valores aislados se denomina “discreta” Una variable que puede tomar cualquiera de los valores de un intervalo finito o infinito se denomina “continua”.

NOTA 2 La probabilidad de ocurrencia de un suceso A se representa como Pr(*A*) o *P*(*A*).

distribución de probabilidad (de una variable aleatoria)
función que da la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor dado cualquiera o pertenezca a un conjunto dado de valores.

NOTA La probabilidad que cubre el conjunto total de valores de una variable aleatoria es igual a 1.

función de distribución
función que da, para cada valor de *x*, la probabilidad de que la variable aleatoria *X* sea menor o igual que *x*:

$$F(x) = \Pr\,(X \leq x)$$

función de densidad de probabilidad (para una variable aleatoria continua)
es la derivada (cuando existe) de la función de distribución:

$$f(x) = dF(x)/dx$$

función de masa de probabilidad
función que da, para cada valor x_i de una variable aleatoria discreta *X*, la probabilidad p_i de que esta variable aleatoria sea igual a x_i:

$$p_i = \Pr(\, X = x_i \,)$$

parámetro
magnitud utilizada para describir la distribución de probabilidad de una variable aleatoria.
correlación
relación entre dos o más variables aleatorias dentro de una distribución de dos o más variables aleatorias

NOTA La mayoría de las mediciones estadísticas de correlación únicamente miden el grado de linealidad de la relación.

esperanza matemática (de una variable aleatoria o de una distribución de probabilidad); **valor esperado; media**

1) Para una variable aleatoria discreta *X* que toma los valores x_i con probabilidades p_i, la esperanza, si existe, es:

$$\mu = E(X) = \sum p_i x_i$$

2) Para una variable aleatoria continua *X*, con función de densidad de probabilidad *f*(*x*), la esperanza, si existe, es:

$$\mu = E(X) = \int x f(x)\, dx$$

donde la integral se extiende a todo el campo de variación de *X*.

variable aleatoria centrada
variable aleatoria cuya esperanza matemática es igual a cero.

NOTA Si la variable aleatoria *X* tiene por esperanza matemática μ, la correspondiente variable aleatoria centrada es (*X*-μ).

varianza(de una variable aleatoria o de una distribución de probabilidad)
esperanza matemática del cuadrado de la *variable aleatoria centrada.*

$$\sigma^2 = V(X) = E\{ [X - E(X)]^2\}$$

desviación típica (de una variable aleatoria o de una distribución de probabilidad)
raíz cuadrada positiva de la varianza:

$$\sigma = \sqrt{V(x)}$$

distribución normal; distribución de Laplace-Gauss
distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua *X*, cuya función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

Para $\infty < x < +\infty$

NOTA μ es la esperanza matemática y σ es la desviación típica de la distribución normal

población

totalidad de los elementos considerados.

NOTA En el caso de una variable aleatoria, se considera que *la distribución de probabilidad* define la población de esa variable.

frecuencia
número de ocurrencias de un tipo dado de suceso, o número de observaciones que pertenecen a una clase específica.

distribución de frecuencia
relación empírica entre los valores de una característica y sus frecuencias o frecuencias relativas.

media aritmética; valor medio
suma de valores dividida entre el número de valores.

NOTA 1 El término “media” se emplea generalmente cuando se hace referencia a un parámetro de una población y el término “valor medio” cuando se refiere al resultado de cálculo sobre datos obtenidos en una muestra.

NOTA 2 El valor medio de una muestra aleatoria simple tomada de una población es un estimador insesgado de la media de esa población. No obstante, a veces, se utilizan otros estimadores, tales como la media geométrica o la armónica, la mediana o la moda.

varianza
medición de dispersión, igual a la suma de los cuadrados de las desviaciones de las observaciones con respecto a su valor medio, dividido por el número de observaciones menos uno.

NOTA 1 La varianza de la muestra es un estimador insesgado de la varianza de la población.

NOTA 2 La varianza es n / (n - 1) veces el momento central de orden 2.

desviación típica
raíz cuadrada positiva de la varianza

estimación
proceso que tiene por finalidad atribuir, a partir de observaciones en una muestra, valores numéricos a los parámetros de una distribución elegida como modelo estadístico de la población, de la cual la muestra fue tomada

NOTA El resultado de este proceso puede expresarse como un valor único; o como un estimador en intervalo.

estimador
estadístico utilizado para estimar un parámetro de una población

grados de libertad
en general, el número de términos de una suma, menos el número de restricciones sobre los términos de dicha suma.

Bibliografía

I. *International vocabulary of basic and general terms in metrology,* segunda edición, 1993,4 Organización Internacional de Normalización (Ginebra, Suiza). El título abreviado de este vocabulario es VIM.

II. *Guia para la expresión de incertidumbre de medición,* traducción en español primera edición, septiembre 2008