

CAPÍTULO III:

CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES

El propósito de este capítulo es explicar el concepto de *incertidumbre*, así como proporcionar los conocimientos necesarios y métodos para su cálculo. Para ello aclararemos previamente que no existen recetas mágicas para el cálculo de las incertidumbres de medida; su cálculo dependerá en cada momento de multitud de factores como son: el tipo de medida, el equipo de medida, el método de medida o la forma de realizar las medidas, y que no es objetivo del presente capítulo entrar en detalle en los desarrollos matemáticos que nos llevan a las fórmulas del cálculo de la incertidumbre.

Sin embargo se intentará explicar su sentido práctico, basándonos en los documentos aceptados y utilizados en metrología para el cálculo de incertidumbres.

La materialización de los contenidos del presente capítulo se puede apreciar en los apartados correspondientes al cálculo de incertidumbres dentro de los procedimientos específicos elaborados, así como en las hojas de cálculo que los implementan, ambos incluidos en el documento correspondiente.-

3.1.-INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN.-

Podemos preguntarnos a raíz de lo comentado hasta el momento, el porqué es importante conocer la incertidumbre de una medida, de una forma genérica podríamos decir que simplemente porque se desean obtener mediciones de buena calidad y comprender los resultados. Sin embargo, existen razones más particulares que obligan a conocer el cálculo de las incertidumbres de medición, ya que, como ocurre en el presente proyecto, si se realizan mediciones como parte de:

- **Una calibración**, es “obligatorio” consignar en el certificado la incertidumbre de medición .
- **Un ensayo**, donde la incertidumbre de medición es necesaria para determinar si el objeto ensayado cumple o no cumple con el ensayo.

- De la misma forma es necesario conocer la incertidumbre si lo que se desea es *satisfacer una tolerancia*, para poder decidir si se satisface, o no, la tolerancia establecida.

Dicho con palabras sencillas, la incertidumbre de una medición está asociada generalmente a su calidad, siendo esta, *la duda que existe respecto del resultado de dicha medición*. Toda medición está afectada siempre por alguna incertidumbre, y se considera, que el resultado de una medición solamente está completo si se acompaña de un valor estimado de incertidumbre de la misma, es decir la expresión del resultado de una medición sólo está completa cuando contiene, además del valor atribuido al mensurando, la incertidumbre asociada a la medida de dicho valor.

En el ámbito de la metrología, todas las magnitudes que no se conozcan exactamente se consideran como *variables aleatorias*, incluso las magnitudes de influencia que pudieran afectar al valor medido, de ahí que, como es sabido, la estadística juegue un papel importante a la hora de calcular la incertidumbre asociada a una medición.

Para comenzar, será importante diferenciar los términos *error* e *incertidumbre*:

- En metrología se entiende por **Error** a la diferencia entre el valor medido (resultado de la medición) y el valor convencionalmente verdadero, del objeto que se está midiendo. Tradicionalmente el error se ha considerado constituido por dos componentes, una aleatoria y otra sistemática:
 - El **error aleatorio** se supone procedente de las variaciones de las magnitudes de influencia, de carácter temporal y espacial, impredecibles o estocásticas. Los efectos de tales variaciones, efectos aleatorios, dan lugar a variaciones en las observaciones repetidas de un mensurando. Aunque no es posible compensar el error aleatorio de un resultado de medida, habitualmente puede reducirse aumentando el número de observaciones. De esta forma su esperanza matemática es igual a cero.
 - El **error sistemático** al igual que el aleatorio, no puede eliminarse, pero frecuentemente puede ser reducido. Si se produce error sistemático sobre un resultado de medida, debido a un efecto identificado de una magnitud de influencia, efecto sistemático, dicho efecto puede cuantificarse y, si es

suficientemente significativo puede aplicarse una corrección para compensarlo.

En las calibraciones, siempre que es posible, se trata de corregir los **errores conocidos** aplicando las **correcciones** e indicándolas en los certificados de calibración, teniendo en cuenta que, cualquier error cuyo valor sea desconocido es una fuente de incertidumbre.

Aunque, de forma incorrecta, se usen los términos error y corrección indistintamente, hay que aclarar que aunque sus valores absolutos sean idénticos, a la hora de presentar la información por ejemplo, en un informe o certificado de calibración, es importante para su interpretación, el signo de dicho valor, pues como decimos el error es la diferencia entre el valor indicado por el instrumento a calibrar y su valor “convencionalmente” verdadero, entendiendo como tal el valor del instrumento de medida utilizado como patrón en dicha medición; mientras que como corrección, se proporcionará la diferencia entre el valor “convencionalmente” verdadero (indicación patrón) y el valor medido (indicación del mensurando), es decir se trata del mismo valor pero con distinto signo.

- Por el contrario, la **Incertidumbre** es la cuantificación de la duda que se tiene sobre el resultado de la medición. Se trata de un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse, razonablemente, al mensurando. A partir de ahora, utilizaremos el término abreviado **incertidumbre**, en lugar de *incertidumbre de medida*, siempre que no exista riesgo de equívocos.

3.1.1 Tolerancia e Incertidumbre.-

En el apartado anterior dijimos, que era necesario conocer la incertidumbre si lo que se desea es **satisfacer una tolerancia**.

Cualquier característica que pretendamos medir está acompañada de unos valores mínimos y máximos dentro de los cuales se considerará la pieza como conforme o no:



Figura 5: Esquema Tolerancia

Dado que cualquier medición que efectuemos va afectada de una incertidumbre, nos encontraremos con la siguiente clasificación:



Figura 5.1: Esquema Tolerancia-Incertidumbre

Desde el punto de vista de los criterios de control de calidad, debemos aceptar como buenos los componentes que sin lugar a dudas están dentro del intervalo de piezas conformes, aún a costa de que se rechacen componentes que siendo buenos, estén dentro del intervalo de piezas dudosas. A nivel práctico esto se traduce en una reducción de la *tolerancia de verificación*:

$$T_v = T - 2I \quad (3.1)$$

Para reducir lo menos posible las tolerancias de verificación conviene por tanto trabajar con incertidumbres pequeñas respecto a las tolerancias de fabricación, lo que requiere trabajar con instrumentación de gran precisión, y por lo tanto más cara.

Por el contrario si trabajamos con incertidumbres grandes aumentará el número de piezas que rechazamos, aún siendo buenas, lo cual, también es antieconómico.

En la práctica se puede demostrar que si la producción está distribuida según la ley normal, está centrada y con límites 3σ sobre la tolerancia, unas reducciones del 10% y 33% del campo de tolerancias, proporcionan porcentajes de rechazo no deseado del 0,5% y 4,3%. Esto se traduce en la siguiente relación práctica:

$$\frac{T}{2I} = 3 a 10 \quad (3.2)$$

Estas decisiones que, como sabemos se aplican en el control de calidad de los productos son extrapolables a la hora de realizar una verificación, en lo que se pretende es determinar si las indicaciones de un equipo se encuentran o no dentro de unos límites establecidos por unos errores máximos permitidos (Metrología Legal).

En la legislación correspondiente se suele especificar, por un lado la incertidumbre máxima del equipo de medida con el que se realiza la verificación, y por otro, a la hora de dar por válida una medición, se debe cumplir que la suma del error obtenido en la indicación del equipo verificado más la incertidumbre de esa medición, se encuentra por debajo del error máximo permitido (E.M.P), para asegurarnos que el instrumento puede ser cualificado como conforme.

3.2.-FUENTES DE INCERTIDUMBRE.-

Como fuentes de incertidumbre, entendemos, pues, todos aquellos fenómenos que pueden contribuir al hecho de que una medición no pueda ser caracterizada por un valor único.

En definitiva, como las mediciones reales no se hacen en condiciones perfectas; los errores y las incertidumbres asociadas a los mismos, pueden provenir de factores diversos, de entre los que destacan los que mencionamos a continuación:

- ***El instrumento de medición:*** este es, obviamente, uno de los factores más influyentes, ya que todos los instrumentos de medida poseen errores, por muy sofisticados que estos sean, errores como pueden ser, entre otros muchos problemas funcionales, los siguientes:
 - Una tendencia a dar resultados mayores o menores.
 - Cambios por envejecimiento, desgastes u otras derivas.
 - Mala repetibilidad⁶, ruido en los instrumentos eléctricos.
- ***El objeto a ser medido:*** el cual puede no ser estable, es decir que a medida que se efectúa la calibración del mismo, este cambie sus propiedades. Como ejemplo de este fenómeno se puede dar el caso de una máquina de ensayos de materiales uniaxial, con principio de funcionamiento hidráulico, cuyo circuito posea pérdida de carga de forma que en el dispositivo indicador de la misma se observa una disminución en la indicación bajo carga constante a medida que transcurre el tiempo.
- ***El proceso de medición:*** la medición en sí misma puede ser difícil de realizar. Por ejemplo, si se pretende calibrar una máquina como la descrita en el caso anterior y ésta presenta grandes dificultades a la hora de mantener una carga constante durante el tiempo necesario para tomar la lectura patrón, no ya sólo por la falta de estabilidad

⁶ En el próximo capítulo, se tratará con mayor detenimiento las características generales de los instrumentos de medida

en sus medidas sino porque además es posible que según su diseño y construcción esta no pueda mantener una carga constante por no disponer de un dispositivo de control automático.

- ***Incertidumbres “importadas:*** la propia calibración de los instrumentos de medida patrones provocará contribuciones a la incertidumbre de las mediciones que se hace con ellos. Es decir, en la incertidumbre de las mediciones que realizamos sobre un instrumento de medida cualquiera contribuye lógicamente, la incertidumbre del instrumento patrón con el que se está efectuando la calibración. Destaquemos, que obviamente, la incertidumbre por no calibrar los instrumentos es mucho peor, recordemos en este sentido el concepto de *trazabilidad*.
- ***Habilidad del operador:*** algunas mediciones dependen mucho de la habilidad y juicio del operador. Una persona puede ser mejor que otra en el trabajo delicado de ajustar un instrumento u obtener visualmente una lectura fina. El uso de un instrumento, como por ejemplo un cronómetro, depende del tiempo de reacción de cada operador. En este sentido, también será una fuente de incertidumbres el sesgo personal en la lectura de instrumentos analógicos en los que se requerirá un alineamiento visual similar para cada una de las lecturas que el operador haga, aún así, la resolución del instrumento ya sea analógico o digital generará obviamente una incertidumbre en la medición
- ***Muestreo adecuado,*** las mediciones que se hacen deben de ser adecuadamente representativas del proceso que desea determinar. Por ejemplo, si se eligen muestras de entre un grupo de células de carga que se pretenden verificar para su aprobación de modelo, habrá que seleccionar al menos una de cada grupo de células con características metrológicas similares para poder extrapolar los resultados al conjunto de las células.
- ***Condiciones ambientales,*** la temperatura, presión atmosférica, humedad ambiente y otras condiciones pueden afectar significativamente al instrumento de medida que se pretende calibrar, teniendo que aplicar, cuando la situación lo requiera, correcciones a los resultados obtenidos en la calibración siempre y cuando esas condiciones ambientales no hayan permanecido estables durante el proceso de calibración. De ahí la importancia de los sistemas de control ambiental que deben poseer los Laboratorios de Ensayo y Calibración que estén o pretendan estar acreditados. Concretamente la

norma ISO 17025 por la que los laboratorios se acreditan, refleja en su apartado 5.3: “*Instalaciones y condiciones Ambientales*”, que las instalaciones de los laboratorios acreditados en base a esta norma deben poseer sistemas de vigilancia, control y registro de las condiciones ambientales.

Como sabemos, cuando el valor y efecto de un error es conocido, por ejemplo el indicado en el certificado de calibración, se puede aplicar una **corrección** al resultado de la medición, pero, en general, las incertidumbres provenientes de las distintas fuentes, deben considerarse como factores individuales que contribuyen a la incertidumbre combinada de las mediciones.

A pesar de que, como vemos, las fuentes de incertidumbre son múltiples y de origen diverso, es importante, a la hora de calibrar o verificar un equipo, saber distinguir aquellas circunstancias o anomalías que no deben ser tratadas como incertidumbres de medición:

- En primer lugar, hay que decir, que **las equivocaciones** que cometen los operadores no son incertidumbres de medición, son errores groseros. Ellas no deben tomarse en cuenta para calcular las incertidumbres. Estas deben evitarse trabajando cuidadosamente y mediante la aplicación de los controles adecuados.
- Las **tolerancias** tampoco son incertidumbres, como sabemos, son los límites de aceptación que se han elegido para un proceso o un producto.
- Las **especificaciones** no son incertidumbres. Una especificación nos indica lo que podemos esperar de un producto. Las especificaciones pueden tener un alcance amplio, incluso cualidades no técnicas, como el aspecto.
- La **exactitud** o su antónimo la **inexactitud**, no es lo mismo que incertidumbre. Desafortunadamente, el uso de los dos términos es confuso. Hablando correctamente, exactitud es un término cualitativo, o sea se puede decir que una medición es exacta o inexacta. La incertidumbre es cuantitativa.
- Por último recordar que los **errores** no son incertidumbres, aunque en el pasado se tomaban como equivalentes, en frases tales como “análisis de error” en lugar de la actual “análisis o cálculo de incertidumbres”.

Finalmente, destacar que existen reglas establecidas para realizar, de una forma correcta, una estimación global de la incertidumbre, a partir de sus componentes

elementales. Estas reglas o pautas de comportamiento tienen como base el uso de buenas prácticas de laboratorio, en ese sentido, la realización de calibraciones con **Trazabilidad**, es imprescindible, así como llevar a cabo cálculos minuciosos, mantener buenos registros en los archivos, y controlar repetidamente los datos, resultados y procedimientos, todo ello reducirá las incertidumbres de las mediciones efectuadas en el laboratorio.

3.3.-LA ESTADÍSTICA EN LA METROLOGÍA.-

El formato conocido en que normalmente se expresa cualquier medida, como sabemos es el siguiente:

$$x = \bar{x} \pm I \quad (3.3)$$

esto quiere decir que el valor verdadero de la medida efectuada (x) se encontrará, con una alta probabilidad, en el intervalo:

$$(\bar{x} - I) < x < (\bar{x} + I) \quad (3.4)$$

donde \bar{x} es el estimador más probable de la medida, generalmente la media si se realizan varias mediciones e “I” es la llamada incertidumbre .

Sin embargo, puesto sabemos que existe siempre un margen de duda en cualquier medición, necesitamos conocer “¿cómo de grande es ese margen? ”. Es por esto por lo que se necesitan dos números para cuantificar una incertidumbre, uno es la amplitud, llamado **intervalo de confianza**, el otro es el **nivel de confianza** que establece qué seguridad tenemos de que el “valor verdadero” cae dentro de ese margen.

Como sabemos, en estadística se entiende por **nivel de confianza** al valor (1- α) de la probabilidad asociada al **intervalo de confianza** o un intervalo estadístico de dispersión. En términos simples y no matemáticos, el nivel de confianza puede definirse como el porcentaje de ocurrencias donde, como media, está el «valor verdadero» de una propiedad dentro de los límites de incertidumbre indicados. Por tanto la expresión (3.3) es incompleta pues tan sólo proporciona el intervalo de confianza y no proporciona el valor (1- α), es decir el nivel de confianza, la probabilidad exacta con la que el valor verdadero de la medida efectuada (x) se encontrará, en el intervalo dado en la expresión (3.4).

Destacar por tanto, debido a la importancia de estos conceptos en el presente proyecto, que en metrología se hace uso de los mismos, pero con otra terminología: en metrología el intervalo de confianza es comúnmente llamado **incertidumbre** y al nivel de confianza se le denomina como **probabilidad de cobertura**.

A modo de ejemplo, si se dice que cuando una llave dinamométrica indica que está aplicando 60 N·m, en realidad aplica un par de 58,9 N·m con una incertidumbre de medida de 1,2 N·m y un probabilidad de cobertura aproximada del 95 %, estaremos diciendo, en términos estadísticos, que el par aplicado por dicha llave cuando la medida dada por la misma es de 60 N·m es de 58,9 N·m con un intervalo de confianza de $\pm 1,2$ N·m y un nivel de confianza $(1-\alpha)$ del 95 %.

Cabe decir también que el *análisis estadístico* no es lo mismo que el análisis de la incertidumbre. La estadística puede usarse para establecer numerosas conclusiones que no tienen que ser acerca de incertidumbres, de la misma forma que el análisis de la incertidumbre que se realiza en metrología solamente utiliza una parte de la estadística, pues como veremos en siguientes capítulos, las incertidumbres pueden estimarse utilizando el análisis estadístico de un conjunto de mediciones y / o utilizando otras fuentes de información de los procesos de medición.

3.4.-CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN.-

3.4.1.-Planteamiento y definiciones.-

Como sabemos, la expresión del resultado de una medición sólo está completa cuando contiene, además del valor atribuido al mensurando, la incertidumbre asociada a la medida de dicho valor y su probabilidad de cobertura. Por lo tanto debemos considerar como *variables aleatorias* todas las magnitudes que no se conozcan exactamente. La *incertidumbre de medida* es un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse, razonablemente, al mensurando.

Los *mensurandos* son las magnitudes particulares objeto de medición. En calibración es frecuente que sólo se disponga de un mensurando o *magnitud de salida* Y , que depende de una serie de magnitudes de entrada, X_i ($i = 1, 2, \dots, N$), de acuerdo con la relación funcional:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.5)$$

La función modelo f determina el procedimiento de medida y el método de evaluación. Describe cómo se obtienen los valores de la magnitud de salida, Y , a partir de los valores de las magnitudes de entrada, X_i . En la mayoría de los casos, será una expresión analítica, pero también puede tratarse de un grupo de estas expresiones que

incluya correcciones y factores de corrección para los efectos sistemáticos, en cuyo caso existirá una relación más compleja que no se expresa, explícitamente, como una función.

Sobre cada una de las magnitudes de entrada X_i , tendremos pues, una componente de incertidumbre que afectará al cálculo de la incertidumbre total.

El conjunto de las magnitudes de entrada X_i , puede agruparse en dos categorías, según la forma en que se haya calculado el valor de la magnitud y la incertidumbre asociada al mismo:

- Magnitudes cuyo valor estimado e incertidumbre asociada se determinan directamente a partir de las propias mediciones. Estos valores pueden obtenerse, por ejemplo, a partir de una única observación, de observaciones reiteradas o de juicios basados en la experiencia. Pueden dar lugar a la determinación de correcciones para las lecturas del instrumento así como para las magnitudes de influencia, tales como la temperatura ambiental, la presión barométrica o la humedad.
- Magnitudes cuyo valor estimado e incertidumbre asociada se incorporan a la medición desde fuentes externas, tales como las magnitudes asociadas a patrones de medida calibrados, materiales de referencia certificados o datos de referencia obtenidos de manuales.

Una estimación del mensurando Y , estimación de salida expresada por y se obtiene de la ecuación (3.5) utilizando las estimaciones de entrada, x_i como valores de las magnitudes de entrada, X_i :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3.6)$$

Se sobreentiende que los valores de entrada son las mejores estimaciones ya corregidas de todos los efectos significativos para el modelo, o bien que las correcciones necesarias se introducen como magnitudes de entrada separadas.

Por otro lado, como sabemos, la *varianza de la distribución de una variable aleatoria*, o su raíz cuadrada positiva llamada *desviación típica*, se utiliza como una medida de la dispersión de valores. Adelantamos pues, que la *incertidumbre típica de medida* asociada a la estimación de salida o resultado de la medición, y , que a partir de ahora expresaremos por $u(y)$, es la desviación típica del mensurando Y . Tiene que determinarse a partir de las estimaciones x_i de las magnitudes de entrada X_i y de sus

incertidumbres típicas asociadas $u(x_i)$. La incertidumbre típica asociada a una estimación tiene la misma dimensión que ésta.

En algunos casos, como puede observarse en el procedimiento específico: *PEAM XX: Calibración de Instrumentos de Medida de Fuerza conforme UNE 7-474-95*, incluido en el anexo del presente proyecto, puede ser apropiado utilizar la *incertidumbre típica relativa de medida*, que es la relación entre la incertidumbre típica de medida asociada a una estimación y el módulo de ésta y que, por tanto, es adimensional.

Concretamente en la calibración de instrumentos de medida de fuerza se utiliza la incertidumbre relativa (tanto típica como expandida) expresada en tanto por ciento sobre el valor de la medida, porque al tratarse de un número adimensional puede obtenerse la incertidumbre en unidades de fuerza (KN, N,...), o de tensión (mV/V) en función de las necesidades.

3.4.2.-Evaluación de las Incertidumbres de Medida de las Estimaciones de Entrada.-

Por tanto para obtener la incertidumbre de la estimación de salida, necesitamos calcular la incertidumbre de medida asociada a las estimaciones de entrada que puede determinarse de acuerdo con los métodos de evaluación: "Tipo A" o "Tipo B":

- *La evaluación "Tipo A" de la incertidumbre típica* es el método para determinar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones reiteradas. En este caso, la incertidumbre típica es la desviación típica experimental de la media, que se obtiene por un procedimiento de promedio o un análisis de regresión.
- *La evaluación "Tipo B" de la incertidumbre típica* es el método de determinar la incertidumbre mediante un procedimiento distinto al de análisis estadístico de una serie de observaciones. En este caso, la estimación de la incertidumbre típica se basa en otros conocimientos científicos o informaciones. Estas informaciones pueden provenir de experiencias previas con otras mediciones, de certificados de calibración, de las especificaciones de los fabricantes, de cálculos, de informaciones publicadas y del sentido común.

3.4.2.1.-Evaluación "Tipo A" de la incertidumbre típica.-

La evaluación "Tipo A" de la incertidumbre típica puede aplicarse cuando se han realizado n observaciones independientes de una de las magnitudes de entrada X_i bajo las mismas condiciones de medición. Si este proceso de medición tiene suficiente

resolución, se podrá observar una dispersión o fluctuación en los valores obtenidos en el proceso de medida.

Supóngase que la magnitud de entrada X_i es medida repetidas veces, por ejemplo, esa magnitud X puede ser el valor del par (Momento) que se aplica a una llave dinamométrica. Supongamos también que se han realizado “n” observaciones estadísticamente independientes ($n > 1$) por ejemplo $n = 10$.

En ese caso, el valor estimado de la magnitud X es \bar{x} , media aritmética o promedio de todos los valores observados, X_j ($j = 1, 2, \dots, 10, \dots, n$), es decir:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.7)$$

La incertidumbre de medida asociada a la estimación \bar{x} se evalúa con arreglo al siguiente cálculo:

- a) Una estimación de la varianza de la distribución de probabilidad subyacente es la *varianza experimental* $s^2(x)$ de los valores x_j que viene dada por:

$$s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (3.8)$$

Su raíz cuadrada (positiva) se denomina *desviación típica experimental*. La estimación óptima de la varianza de la media aritmética \bar{x} , es la *varianza experimental de la media*, dada por:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x)}{n} \quad (3.9)$$

Su raíz cuadrada (positiva) se denomina *desviación típica experimental de la media*. Y finalmente, la incertidumbre típica $u(\bar{x})$ de la estimación de entrada \bar{x} , es la *desviación típica experimental de la media*:

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) \quad (3.10)$$

Es importante resaltar que, cuando el número de mediciones repetidas, n , es pequeño ($n < 10$), debería tenerse en cuenta la fiabilidad de una evaluación "Tipo A" de la incertidumbre típica, expresada en la ecuación (3.10). Si no puede aumentarse el número de observaciones, el cálculo para evaluar la incertidumbre típica se realizará de otra forma, tal y como se tratará en el apartado 3.4.5 del presente capítulo .

3.4.2.2.-Evaluación "tipo B" de la incertidumbre típica. -

La evaluación "tipo B" de la incertidumbre típica, consiste en la evaluación de la incertidumbre asociada a una estimación x_i de una magnitud de entrada X_i por un método diferente del análisis estadístico de una serie de observaciones. La incertidumbre típica $u(x_i)$ se evalúa mediante un juicio científico basado en toda la información disponible sobre la posible variabilidad de X_i .

Los valores pertenecientes a esta categoría pueden obtenerse de:

- datos de mediciones anteriores;
- experiencias o conocimiento general del comportamiento y de las propiedades de materiales e instrumentos pertinentes;
- especificaciones de los fabricantes;
- datos obtenidos de calibraciones y de otros certificados;
- incertidumbres asignadas a datos de referencia procedentes de manuales.

El uso apropiado de la información disponible para una evaluación "Tipo B" de la incertidumbre típica de medida, exige experiencia y conocimientos generales suficientes.

Se trata de una evaluación que requiere una cierta destreza que puede conseguirse con la práctica. Siendo así, una correcta evaluación "Tipo B" de la incertidumbre típica puede ser tan fiable como una evaluación "Tipo A", especialmente en el caso en que la evaluación "Tipo A" se base en un número relativamente pequeño de observaciones estadísticamente independientes, circunstancia que se da frecuentemente pues los procedimientos de calibración deben de estar elaborados de forma que se obtengan resultados metrológicamente estables dentro de unas restricciones de espacio y tiempo, que hagan factible la realización de las calibraciones, es decir, no se realizarán por ejemplo un número de 10 medidas reiteradas, si para ello se requiere un tiempo excesivo y la realización de 5 medidas proporciona resultados aceptables, en cuyo caso, como decimos se recomienda, bien la utilización de la evaluación "Tipo B" o la utilización de la evaluación "Tipo A" en base a los cálculos expuestos en el apartado 3.4.5.

A pesar de que como hemos dicho la aplicación de una evaluación "Tipo B" requiere experiencia pueden darse algunas recomendaciones de carácter general y que han sido llevadas a la práctica durante el desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera.

En definitiva, deben distinguirse los casos siguientes:

- a) Cuando sólo se conoce un **valor único** de la magnitud X_i , por ejemplo, el valor de una única medición, el valor resultante de una medición previa, un valor de referencia obtenido de la literatura o el valor de una corrección, este valor debe utilizarse como x_i . En ese caso, la incertidumbre típica $u(x_i)$ asociada a x_i debe adoptarse siempre que se conozca. En caso contrario, debe calcularse a partir de datos inequívocos sobre la incertidumbre. Si no se dispone de este tipo de datos, la incertidumbre tendrá que estimarse sobre la base de la experiencia.
- b) Cuando se pueda suponer una **distribución de probabilidad** para la magnitud X_i , ya sea basándose en la teoría o en la experiencia, deberá tomarse como el estimado x_i la *esperanza matemática* o *valor esperado* y como incertidumbre típica asociada $u(x_i)$, deberá tomarse la raíz cuadrada de la varianza de su distribución de probabilidad.
- c) Si sólo pueden estimarse unos **límites superior e inferior** (b y a) para el valor de la magnitud X_i (por ejemplo, especificaciones del fabricante de un instrumento de medición, intervalo de temperaturas, error de redondeo o de truncamiento resultante de la reducción automatizada de los datos). En dicho caso, puede suponerse una distribución de probabilidad con una densidad de probabilidad constante entre dichos límites (distribución de probabilidad rectangular o uniforme) para la variabilidad de la magnitud de entrada X_i . Aplicando lo dicho en el anterior apartado b), se obtiene como valor estimado x_i la esperanza matemática de la distribución de probabilidad rectangular:

$$x_i = E(X_i) = \frac{1}{2}(b-a) \quad (3.11)$$

y como cuadrado de la incertidumbre típica:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3}a^2 \quad (3.12)$$

siendo a el semiintervalo de variación, límites entre los cuales se encuentra la magnitud X_i

Como decimos, las expresiones 3.11 y 3.12 provienen del cálculo de la esperanza matemática y de la varianza de la distribución de probabilidad rectangular, tal y como se observa en el siguiente desarrollo:

Como sabemos, una variable aleatoria X posee una distribución rectangular o uniforme en el intervalo $[a,b]$, si su función de densidad es la siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \text{ si } a \leq x \leq b \quad (3.13)$$

Por tanto, la probabilidad de que al hacer un experimento aleatorio, el valor de X este comprendido en cierto subintervalo de $[a,b]$ depende únicamente de la longitud del mismo, no de su posición, podemos decir pues que la probabilidad de todos los puntos del intervalo $[a,b]$ es la misma.

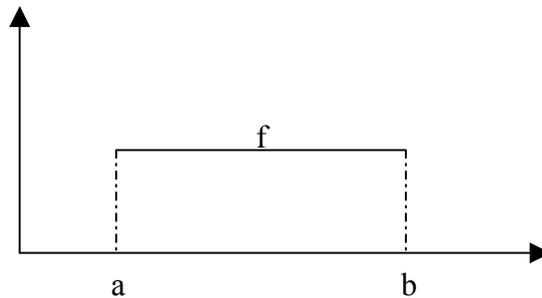


Figura 6: Función de densidad de variable aleatoria uniforme

Como la distribución es muy simple, se pueden calcular sus momentos más usuales directamente a partir de la definición:

Por un lado, el valor de la esperanza matemática:

$$E[X] = \int_a^b x \frac{1}{b-a} dx = \frac{1}{2(b-a)} [x^2]_a^b = \frac{b^2 - a^2}{2(b-a)} = \frac{b+a}{2}$$

Por otro, el valor de la varianza:

$$E[X^2] = \int_a^b x^2 \frac{1}{b-a} dx = \frac{1}{3(b-a)} [x^3]_a^b = \frac{b^3 - a^3}{3(b-a)} = \frac{(b+a)^2}{3}$$

$$VAR[X] = E[X^2] - E[X]^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$$

Por lo tanto, la incertidumbre será la raíz cuadrada de dicha varianza:

$$u(x_i) = \frac{b-a}{\sqrt{12}} \quad (3.14)$$

Esta expresión por tanto es equivalente a la (3.12) pues en ella dijimos que “ a ” representaba el semiintervalo de variación.

Tras este pequeño inciso, decir que la distribución rectangular es una descripción razonable en términos de probabilidad del conocimiento que se tenga sobre la magnitud de entrada X_i cuando no existe ninguna otra información más que sus límites de variabilidad, este hecho acontecerá por ejemplo, en el caso de la resolución de un instrumento. Como se dijo en el capítulo anterior, la resolución (r) es la diferencia más pequeña entre las indicaciones que exhibe un dispositivo, no pudiendo, por tanto, dar como resultado de una medición ningún valor comprendido entre dichas indicaciones separadas “ r ” unidades entre sí. Es por esto, por lo que en la calibración de cualquier instrumento de medida una de las contribuciones a considerar de cara al cálculo de la incertidumbre combinada de la estimación de salida será precisamente la correspondiente a considerar dicha resolución como el intervalo de variación entre los cuales la magnitud

es desconocida, siendo cualquier punto intermedio igualmente probable, con lo que deberemos calcular dicha incertidumbre considerando una distribución rectangular de probabilidad, es decir:

$$u_r = \frac{r}{\sqrt{12}} \quad (3.15)$$

Pero si se sabe que los valores de la magnitud en cuestión próximos al centro del intervalo de variabilidad son más probables que los valores próximos a los extremos, un modelo más adecuado sería, por ejemplo, calcular dicha contribución a la incertidumbre considerando una distribución triangular. Por otro lado, cuando los valores cercanos a los extremos son más probables que los valores cercanos al centro, es más apropiada una distribución con forma de U. En todos estos casos se podrá calcular la incertidumbre típica asociada a la magnitud X_i , sin más que, haciendo uso de la estadística, aplicar el contenido del apartado b), con lo que se puede proporcionar una pequeña tabla en la que se den los valores de incertidumbre bien sea considerando el intervalo completo de valores límite al que llamaremos “b” o la mitad de dicho intervalo a la que llamaremos “a”:

Distribución de probabilidad considerada	Contribución a la incertidumbre típica	
Rectangular	$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$	$u = \frac{b}{\sqrt{12}}$
Arcosenoidal	$u = \frac{a}{\sqrt{2}}$	$u = \frac{b}{\sqrt{8}}$
Triangular	$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$	$u = \frac{b}{\sqrt{24}}$

3.4.2.3.-Comentarios finales sobre el cálculo de la Incertidumbre de las Estimaciones de Entrada.-

Recordar, por último lo comentado en el apartado 3.3 (La Estadística en la metrología) en el que se dijo que “*las incertidumbres pueden estimarse utilizando el análisis estadístico de un conjunto de mediciones*” en lo que vendría a llamarse Evaluación “tipo A” y/o “*utilizando otras fuentes de información de los procesos de medición*” como las descritas en este último apartado correspondiente a la evaluación

“tipo B” de la incertidumbre, en el que la misma no proviene de un conjunto de mediciones, aunque para su estimación sigan siendo necesarios conceptos estadísticos como el de *esperanza matemática* o *distribución de probabilidad* cuya explicación en la presente memoria carece de sentido.

Como acabamos de ver, esta distinción entre ambos tipos de evaluaciones, estipulada por los organismos competentes en metrología entre evaluación “tipo A” y evaluación “tipo B” para el cálculo de la incertidumbre, corresponde al tipo de datos de los que se dispone para su cálculo y por consecuencia, a la función de probabilidad utilizada para el mismo:

- Evaluación tipo A: En ella se dispone de un número de medidas suficiente ($n \geq 10$) para utilizar una función de probabilidad derivada de una distribución de frecuencia. Concretamente la incertidumbre se evaluará en base a distribución Gaussiana o Normal.
- Evaluación “Tipo B”: En ella no se dispone del mínimo número de medidas suficiente ($n \geq 10$) para poder utilizar la distribución Normal con lo que se deberá asumir o suponer otra distribución de probabilidad. Esta suposición se realizará en base a la experiencia metrológica, teniendo en cuenta que cuando no se conozcan más que unos límites superior e inferior para el valor de la magnitud tendrá que adoptarse una distribución de probabilidad rectangular.

3.4.3.-Evaluación de las Incertidumbres de Medida de las Estimaciones de Salida.-

Cuando las magnitudes de entrada no están correlacionadas, el cuadrado de la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida y , viene dado por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (3.16)$$

La magnitud $u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) es la contribución a la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida y , resultante de la incertidumbre típica asociada a la estimación de entrada x_i , es decir:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (3.17)$$

dónde c_i es el **coeficiente de sensibilidad** asociado a la estimación de entrada x_i , es decir, la derivada parcial de la función modelo f con respecto a X_i evaluada para las estimaciones de entrada x_i , tal y como se observa en la siguiente expresión:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_n} \quad (3.18)$$

Este coeficiente de sensibilidad c_i describe el grado en que la estimación de salida y se ve afectada por variaciones en la estimación de entrada x_i . Puede evaluarse a partir de la función modelo f (ecuación 3.5) según la ecuación (3.18) o utilizando métodos numéricos.

Aunque $u(x_i)$ es siempre positiva, la contribución $u_i(y)$ según la ecuación (3.17) puede ser negativa o positiva, dependiendo del signo del coeficiente de sensibilidad c_i , aunque el signo de $u_i(y)$ tendrá que tenerse en cuenta solamente en el caso de magnitudes de entrada correlacionadas.

Para el caso más habitual, como ocurre en las calibraciones de los procedimientos del presente Proyecto Fin de Carrera, si la función modelo f es una suma o diferencia de las magnitudes de entrada X_i , es decir:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i \cdot X_i \quad (3.19)$$

la estimación de salida según la ecuación (3.6) viene dada por la correspondiente suma o diferencia de las estimaciones de entrada:

$$y = \sum_{i=1}^N p_i \cdot x_i \quad (3.20)$$

mientras que los coeficientes de sensibilidad son iguales a p_i y la ecuación (3.16) se convierte en:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3.21)$$

Desarrollos similares a este pueden realizarse para cualquier tipo de función, por ejemplo para el caso en el que la función modelo f sea un producto o cociente de las magnitudes de entrada X_i

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (3.22)$$

la estimación de salida será de nuevo el correspondiente producto o cociente de las estimaciones de entrada:

$$y = c \prod_{i=1}^N x_i^{p_i} \quad (3.23)$$

Si este es el caso, los coeficientes de sensibilidad serán iguales a:

$$p_i \cdot \frac{y}{x_i} \quad (3.24)$$

y de la ecuación (4.16) se obtiene una expresión análoga a la ecuación (3.21):

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3.25)$$

Para el caso en que dos magnitudes de entrada X_i y X_k estén *correlacionadas* en cierto grado; es decir, si son mutuamente dependientes de una forma u otra, su *covarianza* tiene que considerarse también como una contribución a la incertidumbre. En ese caso el tratamiento y cálculo de la incertidumbre de la estimación de salida es distinto al que se acaba de explicar.

La posibilidad de tener en cuenta el efecto de las correlaciones depende del conocimiento que se tenga del proceso de medición y del juicio de las dependencias mutuas de las magnitudes de entrada. En general, no debe olvidarse que, si se ignoran las correlaciones entre las magnitudes de entrada, el resultado puede ser una estimación incorrecta de la incertidumbre típica del mensurando.

No obstante, la covarianza asociada a las estimaciones de dos magnitudes de entrada, X_i y X_k puede considerarse igual a cero o insignificante en cualquiera de los siguientes casos:

- a) las magnitudes de entrada X_i y X_k son independientes; por ejemplo, cuando se han observado reiterada, pero no simultáneamente, en diferentes experimentos independientes, o cuando representan magnitudes resultantes de diferentes evaluaciones que se han realizado de forma independiente,
- b) cualquiera de las magnitudes de entrada X_i y X_k puede tratarse como constante;
- c) no existe información suficiente para valorar la existencia de una correlación entre las magnitudes de entrada X_i y X_k .

En algunas ocasiones, las correlaciones pueden eliminarse mediante la elección de una función modelo adecuada.

Por último comentar, que el análisis de la incertidumbre para una medición a veces llamado “*balance de incertidumbres de una medida*” debe incluir una lista de todas las fuentes de incertidumbre, junto con las incertidumbres típicas de medida asociadas y los métodos para evaluarlas. En el caso de mediciones repetidas, debe

indicarse también el número “ n ” de observaciones. Para mayor claridad, se recomienda presentar los datos referentes a este análisis en forma tabulada. En la tabla, las magnitudes deben expresarse mediante un símbolo físico o una breve descripción, indicando para cada una de ellas, como mínimo:

- el valor estimado x_i ,
- la incertidumbre típica de medición asociada $u(x_i)$,
- el coeficiente de sensibilidad c_i
- las diferentes contribuciones a la incertidumbre $u_i(y)$.

Asimismo, debe indicarse la dimensión de cada magnitud junto con los valores numéricos que se facilitan en la tabla.

3.4.4.- Incertidumbre expandida en las medidas.-

En el seno de las organizaciones metrológicas internacionales, concretamente en la EAL (European co-operation for Accreditation), se ha decidido que los laboratorios de calibración acreditados por miembros de EAL deben obtener una **incertidumbre expandida de medida** U , que se calcula multiplicando la incertidumbre típica $u(y)$ de la estimación de salida y por un **factor de cobertura** k .

$$U = k u(y) \quad (3.26)$$

Cuando se puede atribuir una distribución normal (gausiana) al mensurando y la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida tiene la suficiente fiabilidad, debe utilizarse el factor de cobertura usual $k=2$. La incertidumbre expandida asociada corresponde a una **probabilidad de cobertura** (Nivel de confianza $1-\alpha$) de, aproximadamente, un 95%. Sin embargo, estas condiciones no se cumplen, tal y como puede observarse por ejemplo, en el procedimiento específico *PEAM XX: Calibración de Dinamómetros*.

Como se puede observar en el mencionado procedimiento, la hipótesis de una distribución normal no siempre puede confirmarse experimentalmente con facilidad. Sin embargo, cuando varios componentes de la incertidumbre (por ejemplo, $N \geq 3$), derivados de distribuciones de probabilidad bien definidas de magnitudes independientes (por ejemplo, distribuciones normales o rectangulares), realizan contribuciones comparables a la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida, se cumplen las condiciones del Teorema Central del Límite y puede suponerse, con un elevado grado de aproximación, que la distribución de la estimación de salida es normal.

La fiabilidad de la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida se determina por sus grados efectivos de libertad tal y como se verá en el apartado 3.3.5. Sin embargo, el criterio de fiabilidad se cumple siempre que ninguna de las contribuciones a la incertidumbre se obtenga de una evaluación “Tipo A” basada en menos de diez observaciones repetidas, esta es precisamente la circunstancia que se da en dicho procedimiento de calibración, en el que se ha realizado una de las estimaciones de entrada, la correspondiente a la repetibilidad de las medidas con un número de $n = 5$ medidas.

Si no se cumple alguna de estas dos condiciones mencionadas (normalidad o fiabilidad suficiente), el factor de cobertura usual $k=2$ puede producir una incertidumbre expandida correspondiente a una probabilidad de cobertura inferior al 95%. En estos casos, para garantizar que el valor de la incertidumbre expandida se corresponde con la misma probabilidad de cobertura que en el caso normal, tienen que utilizarse otros procedimientos. La utilización de aproximadamente la misma probabilidad de cobertura es esencial para comparar los resultados de dos mediciones de la misma magnitud; por ejemplo, cuando se evalúan los resultados de intercomparaciones o se verifica el cumplimiento de una especificación.

En el caso que la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida no tenga la suficiente fiabilidad por utilizar un número de mediciones $n > 10$, y no se pueda aumentar el número n de mediciones, no por imposibilidad física sino, como ya se ha comentado, por resultar excesivamente antieconómico, siempre queda la opción de utilizar la evaluación “tipo B” en lugar de la “tipo A” para el cálculo de la incertidumbre de medida de dicha estimación de entrada. Esta decisión se tomará en función de la experiencia y de los resultados acumulados, escogiendo en cada caso aquel método, evaluación “tipo B” o estimación de un nuevo factor de cobertura que proporciona una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%, que proporcione unas incertidumbres menores.

3.4.5.-Cálculo de factores de cobertura en ausencia de fiabilidad suficiente.-

Como acabamos de decir, para estimar el valor de un factor de cobertura k correspondiente a una determinada probabilidad de cobertura, es necesario tener en cuenta la fiabilidad de la incertidumbre típica $u(y)$ de la estimación de salida y . Esto significa que hay que tener en cuenta la fiabilidad con que $u(y)$ estima la desviación

típica asociada al resultado de la medición. En el caso de una estimación de la desviación típica de una distribución normal, los grados de libertad de dicha estimación, que dependen del tamaño de la muestra en la que se basa, es una medida de su fiabilidad.

Igualmente, una medida satisfactoria de la fiabilidad de la incertidumbre típica asociada a una estimación de salida son sus grados efectivos de libertad ν_{ef} , que se estiman mediante una combinación adecuada de los grados efectivos de libertad de las diferentes contribuciones a la incertidumbre $u_i(y)$.

El procedimiento para calcular un factor de cobertura k adecuado cuando se cumplen las condiciones del Teorema Central del Límite, incluye las siguientes tres etapas:

- 1ª) Obtención de la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida según el procedimiento y las recomendaciones descritas en el presente capítulo .
- 2ª) Seguidamente se estimarán los grados efectivos de libertad ν_{ef} de la incertidumbre típica $u(y)$ asociada a la estimación de salida calculada y , mediante el uso de la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (3.27)$$

donde:

- $u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), definido en la ecuación (3.17), son las contribuciones a la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida y resultante de la incertidumbre típica asociada a la estimación de entrada x_i que se supone son mutua y estadísticamente independientes.
- ν_i corresponde a los grados efectivos de libertad de la contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$.

Para el cálculo de este último factor se deberá tener en cuenta:

- Para una incertidumbre típica $u(\bar{q})$ obtenida mediante una evaluación Tipo A, los grados de libertad vendrán dados por $\nu_i = n - 1$.
- Cuando se trate de determinar los grados de libertad de una incertidumbre típica $u(x_i)$ obtenida de una evaluación de Tipo B se podrán considerar como $\nu_i \rightarrow \infty$. Esto es así siempre que dichas evaluaciones Tipo B se realicen tal y como se comenta en el apartado 3.4.2 y evitando cualquier tipo de subestimación, es decir,

si, por ejemplo, se establecen unos límites superior e inferior, éstos suelen escogerse de manera que la probabilidad de que la magnitud en cuestión quede fuera de dichos límites sea, de hecho, extremadamente pequeña.

3ª) Una vez estimados los grados efectivos de libertad ν_{ef} , se obtendrán los factores de cobertura k a partir de la tabla siguiente tabla de valores:

ν_{ef}	K
1	13,97
2	4,53
3	3,31
4	2,87
5	2,65
6	2,52
7	2,43
8	2,37
10	2,28
20	2,13
50	2,05
∞	2

Tabla: Factores de seguridad k para diferentes grados efectivos de libertad ν_{ef}

Esta tabla de valores se basa en una distribución de *t de Student* evaluada para una probabilidad de cobertura del 95,45%. De forma que para la elección del factor de cobertura K , si el valor de ν_{ef} obtenido mediante la fórmula de Welch-Satterthwaite no es un número entero, como es normal que ocurra, deberá truncarse al siguiente número entero más pequeño.

3.4.6.-Presentación de la incertidumbre de medida en los certificados de calibración.-

En los certificados de calibración, el resultado completo de la medición, que consiste en el proporcionar el valor estimado y del mesurando y la incertidumbre expandida asociada U que debe expresarse en la forma $(y \pm U)$.

También debe incluirse una nota explicativa que, en el caso general, debe tener el siguiente contenido:

“La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre

típica de medición por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EAL-R2.”

Sin embargo, cuando se haya seguido el procedimiento descrito en el apartado 3.4.5, la nota explicativa deberá decir lo siguiente:

“La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medida por el factor de cobertura $k = XX$ que, para una distribución de t de Student con $vef = YY$ grados efectivos de libertad, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medición se ha determinado conforme al documento EAL-R2.”

En general, el valor numérico del resultado de la medición debe redondearse en su expresión final a la menor cifra significativa en el valor de la incertidumbre expandida asignada al resultado de la medición. Para el proceso de redondeo, deben aplicarse las normas habituales para el redondeo de cifras. Sin embargo, si el redondeo reduce el valor numérico de la incertidumbre de medición en más de un 5%, debe utilizarse el valor redondeado hacia arriba.

3.3.7.- Resumen del procedimiento para el cálculo de incertidumbres de medida.-

A continuación, ofrecemos a modo resumen, los pasos a seguir para la aplicación práctica del contenido del presente capítulo.

Desde un punto de vista genérico, para calcular la incertidumbre de las mediciones se debe:

- Identificar primero las fuentes de incertidumbre.
- Luego estimar la influencia de cada una de esas fuentes de incertidumbre sobre la incertidumbre global.
- Finalmente se deben combinar las incertidumbres individuales para obtener la incertidumbre global, llamada ***incertidumbre combinada***.

Desarrollando estos tres grandes grupos de actividades en nueve pasos principales, para el cálculo de la incertidumbre de las mediciones, se debe:

- 1°. Expresar en términos matemáticos la dependencia del mensurando (magnitud de salida) Y respecto de las magnitudes de entrada X_i , según la ecuación (3.5).
- 2°. Identificar y aplicar todas las correcciones significativas.
- 3°. Calcular la incertidumbre típica $u(\bar{x})$ para magnitudes medidas reiteradas

conforme a la sección 3.4.2.

- 4°. Relacionar todas las fuentes de incertidumbre en la forma de un análisis de incertidumbres según el apartado 3.4.3.
- 5°. Para valores únicos, por ejemplo, valores resultantes de mediciones previas, valores de corrección, valores tomados de la literatura técnica, etc, adoptar la incertidumbre típica cuando se conozca la misma o pueda calcularse según el párrafo 3.4.4.2(a). Prestar atención a la representación de la incertidumbre utilizada. Si no dispone de datos de los que pueda derivar la incertidumbre típica, tendrá que estimar el valor de $u(xi)$ basándose en la experiencia científica.
- 6°. Para magnitudes de entrada para las que se conoce o puede suponerse una distribución de probabilidad, calcular el valor esperado y la incertidumbre típica $u(xi)$ conforme al párrafo 3.4.4.2 (b). Si sólo conoce o puede estimar los límites superior e inferior, calcule la incertidumbre típica $u(xi)$ de acuerdo con el párrafo 3.4.4.2 (c).
- 7°. Calcular, para cada magnitud de entrada X_i , la contribución $u_i(y)$ a la incertidumbre asociada a la estimación de salida resultante de la estimación de entrada x_i , aplicando las ecuaciones (3.17) y (3.18) y sumando sus cuadrados tal como se describe en la ecuación (3.16) para obtener el cuadrado de la incertidumbre típica $u(y)$ del mensurando.
- 8°. Calcular la incertidumbre expandida U , multiplicando la incertidumbre típica $u(y)$ asociada a la estimación de salida por un factor de cobertura k elegido conforme a los apartados 3.4.4 y 3.4.5.
- 9°. Informar del resultado de la medición, indicando el estimado y del mensurando, la incertidumbre expandida asociada U , y el factor de cobertura k en el certificado de calibración según se indica en el apartado 3.4.6.

3.5.-GLOSARIO DE TÉRMINOS USADOS EN EL CAPÍTULO.-

Capacidad óptima de medida: incertidumbre de medición más pequeña que puede conseguir un laboratorio para una determinada magnitud en condiciones ideales de medición, dentro del alcance de su acreditación.

Ensayo ínter laboratorio: serie de medidas de una o más magnitudes, efectuadas por un cierto número de laboratorios independientes sobre unas muestras de un material dado.

Otros términos que se utilizan igualmente son ensayo “round robin”, programa de colaboración de referencia y estudio de colaboración analítico. Los ensayos interlaboratorios se efectúan con numerosos fines además de la caracterización de los materiales de referencia.

Correlación: relación entre dos o más variables aleatorias dentro de una distribución de dos o más variables aleatorias.

Coefficiente de correlación: medida de la dependencia relativa mutua de dos variables aleatorias, igual a su covarianza dividida por la raíz cuadrada positiva del producto de sus varianzas.

Covarianza: medida de la dependencia mutua de dos variables aleatorias, igual al valor esperado del producto de las desviaciones de las dos variables aleatorias con respecto a sus respectivos valores esperados.

Nivel de confianza : Valor $(1-\alpha)$ de la probabilidad asociada al intervalo de confianza (o una zona de incertidumbre: ver nota 1) o un intervalo estadístico de dispersión.

En términos estadísticos, la zona de incertidumbre se conoce como el intervalo de confianza y los límites de incertidumbre se conocen como los límites de confianza.

En términos simples y no matemáticos, el nivel de confianza puede definirse como el porcentaje de ocurrencias donde, como media, está el «valor verdadero» de una propiedad dentro de los límites de incertidumbre indicados.

Factor de cobertura: factor numérico utilizado como multiplicador de la incertidumbre típica de medida para obtener una incertidumbre expandida de medición.

Probabilidad de cobertura: fracción, generalmente grande, de la distribución de valores que como resultado de una medición, pueden atribuirse razonablemente al mensurando.

Varianza experimental: magnitud que caracteriza la dispersión de los resultados de una serie de n observaciones del mismo mensurando dada por la ecuación (3.8).

Desviación típica experimental: raíz cuadrada positiva de la varianza experimental

Incertidumbre expandida: magnitud que define un intervalo en torno al resultado de una medición que puede esperarse que incluya una fracción grande de la distribución de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando.

Exactitud de medición: Proximidad de concordancia entre el resultado de una medición

y el valor (convencionalmente) verdadero de la magnitud medida.

Estimación de entrada: valor estimado de una magnitud de entrada utilizado en la evaluación del resultado de una medición.

Magnitud de entrada: magnitud de la que depende el mensurando y que se tiene en cuenta en el proceso de evaluar el resultado de una medición.

Mensurando: magnitud concreta objeto de la medición.

Estimación de salida: resultado de una medición calculado por la función modelo a partir de las estimaciones de entrada.

Magnitud de salida: magnitud que representa al mensurando en la evaluación de una medición.

Estimación combinada de la varianza: valor estimado de la varianza experimental obtenido de una larga serie de observaciones del mismo mensurando en mediciones bien caracterizadas y bajo control estadístico.

Distribución de probabilidad: función que da la probabilidad de que una variable aleatoria adopte cualquier valor o pertenezca a un determinado conjunto de valores.

Variable aleatoria: variable que puede adoptar cualquier valor de un determinado conjunto de valores y que está asociada a una distribución de probabilidad.

Incertidumbre típica relativa de medición: incertidumbre típica de una magnitud dividida por el valor estimado de dicha magnitud.

Coefficiente de sensibilidad asociado a una estimación de entrada: variación diferencial en la estimación de salida generada por una variación diferencial en una estimación de entrada dividida por la variación en la estimación de entrada.

Desviación típica: raíz cuadrada positiva de la varianza de una variable aleatoria.

Incertidumbre típica: incertidumbre de medida expresada como desviación típica.

Método de evaluación Tipo A: método de evaluación de la incertidumbre de medida por análisis estadístico de una serie de observaciones.

Método de evaluación Tipo B: método de evaluación de la incertidumbre de medida por otro medio diferente al análisis estadístico de una serie de observaciones.

Incetidumbre de medida: parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando. 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.

La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones típicas experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones típicas, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.

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

Varianza: valor esperado del cuadrado de la desviación de una variable aleatoria con respecto al valor esperado.

Método de medida: sucesión lógica de las operaciones, descritas de una forma genérica, utilizadas en la ejecución de las mediciones.

Punto de calibración: una medida particular en una secuencia de medidas.