

Manual de Contenido
del Participante

Cálculo de incertidumbre y propagación de errores



TX-TCP-001

ESPAÑOL

Propósito y Objetivos de este Manual

Este curso tiene como propósito brindar conocimientos básicos sobre el cálculo de incertidumbre y la propagación de errores. Se abordarán conceptos sobre estadística, sistemas de medición y métodos de estimación de incertidumbre.

Los objetivos de este manual se orientan al cumplimiento de los siguientes puntos:



Comprender los conceptos de estadística aplicables



Reconocer los parámetros que influyen en la determinación de la incertidumbre .



Entender el proceso de medición desde el punto de vista metrológico y las variables que lo influyen



Distinguir los distintos métodos de cálculo de la incertidumbre..

Es importante comprender las consecuencias que el desconocimiento de los conceptos y principios explicados en este manual puede ocasionar en la seguridad y calidad del producto final.



CAPÍTULO 1 5
Conceptos de estadística de
aplicación en metrología



CAPÍTULO 2 49
Las mediciones



CAPÍTULO 3 103
Incertidumbre

El manual contiene pequeñas figuras que se repiten en todos los capítulos y que son una forma de organización de la información para hacer más fácil y dinámica la lectura. Estas figuras se denominan íconos.

A continuación hay una descripción de la utilización de cada ícono, es decir en qué oportunidad aparecen:



GLOSARIO

Explica términos y siglas.



RECUERDE

Refuerza un concepto ya mencionado en el texto del manual.



ANEXO

Profundiza conceptos.



MANTENIMIENTO

Resalta procedimientos necesarios de mantenimiento.



PREGUNTAS

Presenta preguntas disparadoras.



ATENCIÓN

Destaca conceptos importantes.



EJEMPLO

Ilustra con situaciones reales los temas tratados.



ACTIVIDAD

Señala el comienzo de un ejercicio que le permitirá reforzar lo aprendido.



EXAMEN FINAL

Señala el comienzo de la evaluación final.



FIN DE CAPÍTULO

Señala la finalización del capítulo.



FIN DE MANUAL

Señala la finalización del manual.

Conceptos de estadística con aplicación en metrología

TEMAS DEL CAPÍTULO 1

1.1 Variables	6
1.2 Representaciones gráficas	11
1.3 Conceptos estadísticos clave	14

En este capítulo se introducen los distintos tipos de variables y representaciones gráficas, así como los conceptos de población, muestra y muestreo.



1.1 Variables

1.1.1 Introducción

El cálculo de la incertidumbre se aplica en las calibraciones de cada equipo y en el resultado de todos los ensayos cuya variable de salida sea una medida.

Ningún resultado de una medición es 100% perfecto. Por lo tanto, el cálculo o los criterios para estimar y expresar las incertidumbres de medida permiten asegurar la calidad de los resultados, establecer requisitos específicos sobre la expresión de la incertidumbre en éstos y demostrar competencia técnica.

GLOSARIO



Incertidumbre de la medición.

Parámetro asociado con el resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pudieran ser razonablemente atribuidos a la magnitud a medir.

La medición de la incertidumbre se realiza a través, de la metrología, la ciencia de las mediciones. Se puede definir a la medición como el conjunto de operaciones que tienen por objeto determinar un valor de una magnitud. A su vez, la magnitud es todo atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia susceptible de ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. Podemos medir una distancia pero no la felicidad; por lo tanto, la longitud, el tiempo, la temperatura, etc., son magnitudes, mientras que la belleza, la bondad, etc., no lo son.

Existen varias razones para estimar el valor de la incertidumbre:



Requerimientos de las normas y de los clientes.



Conocer y mejorar la calidad de los métodos, eliminando presunciones intuitivas sobre su confiabilidad.



Interpretar adecuadamente los resultados de medición y ensayo.

Por todo ello, a continuación se detallarán los conceptos básicos que permitirán comprender los diferentes métodos utilizados para el cálculo de incertidumbre.

1.1.2 Variable

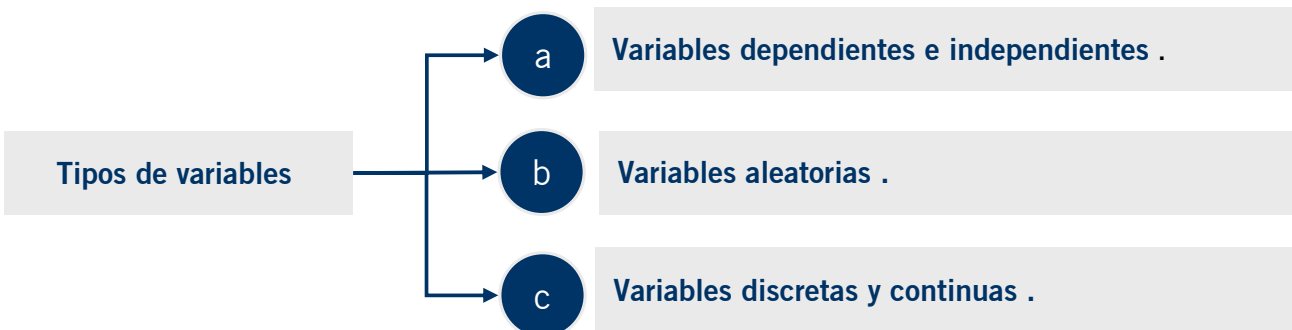
Una variable es una característica que varía de elemento a elemento en una población en estudio.

EJEMPLO

Si nuestra población consta de personas, entonces las variables que podrían interesarnos son: edad, peso, sexo, estatura, etc. Estas variables pueden ser cuantitativas (cuando se realiza una medición) o cualitativas (sólo presentan una cualidad). La edad, el peso y la estatura son ejemplos de variables cuantitativas en una población de personas, mientras que el sexo y el estado civil son variables cualitativas.

ATENCIÓN

Se puede definir a una variable como un símbolo, tal como X , Y , que puede tomar un valor cualquiera de un conjunto determinado de ellos, llamado “dominio de la variable”. Si la variable puede tomar solamente un valor, se la denomina “constante.”



Variable independiente

Característica o propiedad que es una supuesta causa del fenómeno estudiado. En investigación experimental se llama así a la variable manipulada por el investigador.

Variable dependiente

Propiedad o característica que trata de cambiarse mediante la manipulación de la variable independiente. La variable dependiente es el factor que se observa y se mide para determinar el efecto de la variable independiente.

EJEMPLO

Si se quiere averiguar cómo el cambio de luz modifica nuestras sensaciones visuales, la luz sería la variable manipulada por el investigador (es decir, la variable independiente) y la sensación luminosa del sujeto, la variable dependiente.

Por otro lado, en la expresión $y = x + 2$, se considera que "y" es la variable dependiente, ya que depende del valor de "x". En este mismo ejemplo, "x" sería la variable independiente, ya que no requiere de una variable adicional para obtener su valor.

b**Variables aleatorias .**

Son variables que podrán tomar cualquiera de los valores de un conjunto determinado de valores, y se las asocia con una distribución de probabilidad.

EJEMPLO

En un experimento aleatorio se lanza un dado al aire. Los posibles resultados del experimento (sucesos elementales) son los siguientes: <que salga 1>, <que salga 2>, <que salga 3>, <que salga 4>, <que salga 5> y <que salga 6>. Resulta sencillo asociar a cada suceso elemental el número correspondiente a la cara del dado que haya salido. Por tanto, la variable aleatoria, X, será: $X = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

c**Variables discretas y continuas.**

Al organizar los procedimientos estadísticos, una manera eficaz de distribuir los datos en categorías es distinguir entre variables discretas y variables continuas.

Variable discreta

Es la variable tal que entre 2 valores observables cualquiera, existe al menos un valor no observable.

EJEMPLO

El número de alumnos en un curso es una variable discreta. A su vez, valores como 23 y 24 son potencialmente observables, mientras que 23,5 no lo es.

Variable continua

Se caracteriza por el hecho de que entre 2 valores observables cualquiera, existe otro valor observable. La variable continua toma valores a lo largo de un continuo, esto es, en todo un intervalo de valores.

EJEMPLO

Longitudes y pesos son ejemplos de variables continuas. La estatura de una persona, puede ser 1,70 m o 1,75 m, pero en potencia, podría tomar cualquier valor intermedio como por ejemplo 1,73 m.

ATENCIÓN

Un atributo esencial de la variable continua es que, a diferencia de lo que ocurre con la variable discreta, nunca se la puede medir con exactitud. Por lo tanto, en su caso siempre habrá, inevitablemente, un error de medida.

Un importante principio sobre variables continuas es que siempre se registran en forma discreta, quedando la magnitud de la distancia entre valores registrables adyacentes, y determinada por la precisión de la medición.

RECUERDE

Magnitud.

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

ACTIVIDAD 1: Variables

Este ejercicio permitirá afianzar los conceptos generales relativos a los tipos de variables utilizados en los cálculos de incertidumbre.

Unir los siguientes conceptos con su definición correspondiente. .

Se quiere averiguar como el frío afecta el comportamiento humano ¿Qué tipo de variable sería la temperatura?

Variable independiente

¿Qué tipo de variable es el número de manzanas presentes en un cajón de fruta?

Variable dependiente

Se quiere investigar una reacción de un animal ante un cambio de alimentación. ¿Qué tipo de variables sería el alimento?

Variable aleatoria

¿Qué tipo de variable representa a la probabilidad de que un número salga elegido en un sorteo?

Variable discreta

¿Qué tipo de variable es la cantidad de líquido que se encuentra en una botella de agua?

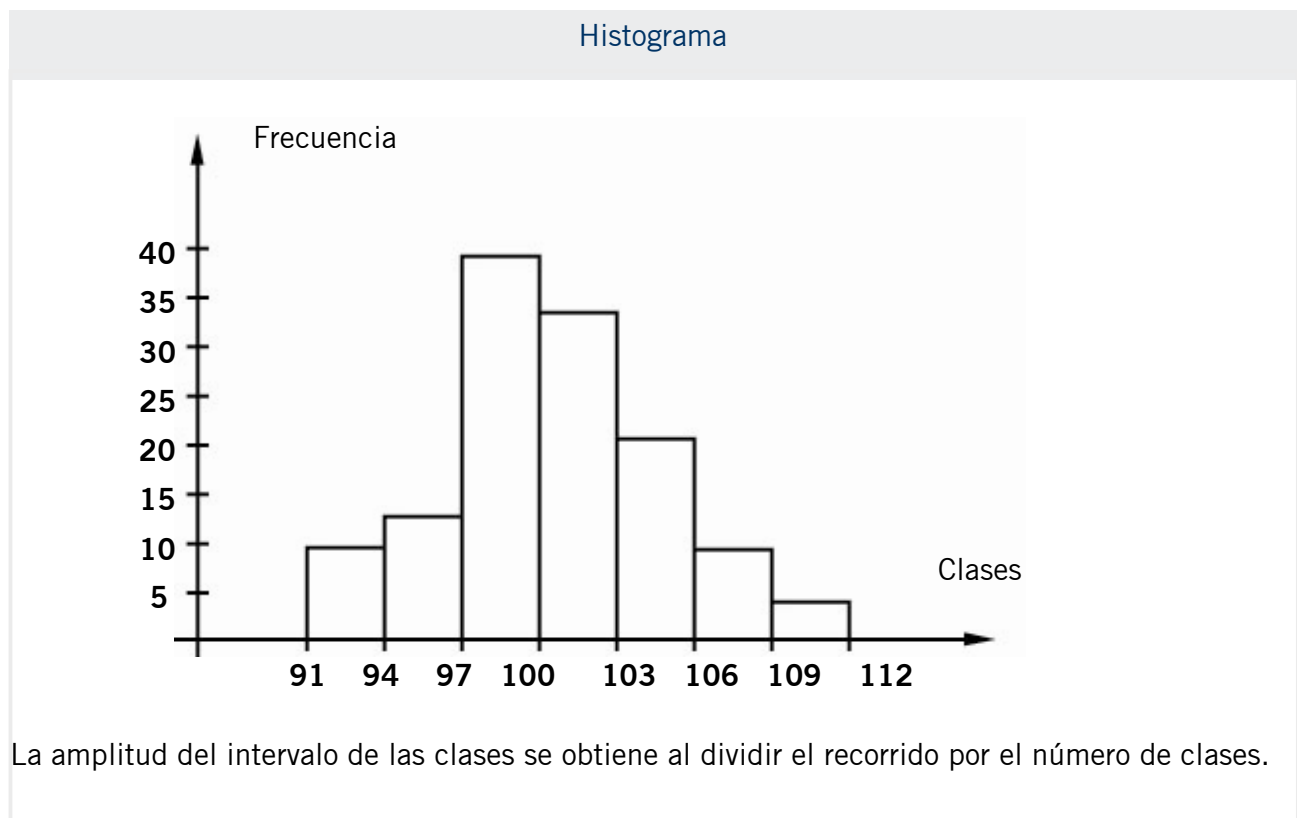
Variable continua

1.2 Representaciones gráficas

En los análisis estadísticos, es frecuente utilizar representaciones visuales complementarias de los datos de estudio. Mediante estas representaciones, adaptadas a la finalidad informativa que se persigue, se transmiten los resultados de los análisis de forma rápida, directa y comprensible para un conjunto amplio de personas.

1.2.1 Histograma

En estadística, un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables.



Los histogramas suelen utilizarse cuando se estudia una variable continua, como franjas de edades o altura de la muestra, y, por comodidad, sus valores se agrupan en clases, es decir, valores continuos.

ATENCIÓN

Los histogramas permiten comparar los resultados de un proceso y son más frecuentes en ciencias sociales, humanas y económicas que en ciencias naturales y exactas.

1.2.2 Gráficos de línea

Los gráficos de línea proporcionan un excelente mapa de variables independientes y dependientes. Cuando ambas variables son cuantitativas, el segmento de línea que conecta dos puntos en el gráfico expresa una pendiente. Este segmento puede interpretarse visualmente con respecto a la pendiente de otras líneas, o expresarse mediante una fórmula matemática precisa.

El gráfico de dispersión es un tipo de gráfico de línea que se utiliza para expresar una tendencia en los datos y la relación entre dos variables.

Los gráficos de dispersión son similares a los gráficos de línea por el hecho de que comienzan con el mapeo de datos cuantitativos. La diferencia es que en un gráfico de dispersión, los puntos individuales no se conectan directamente mediante una línea, pero expresan una tendencia. Esta tendencia puede verse directamente a través de la distribución de puntos o mediante la adición de una línea de regresión.

Gráfico de dispersión

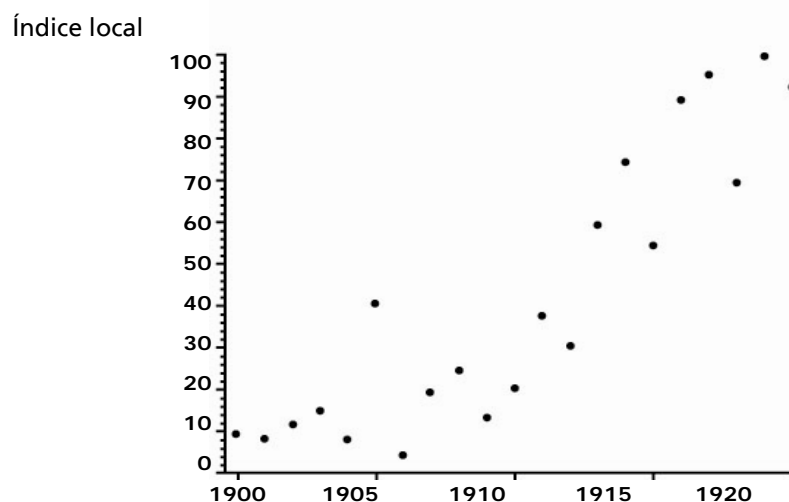
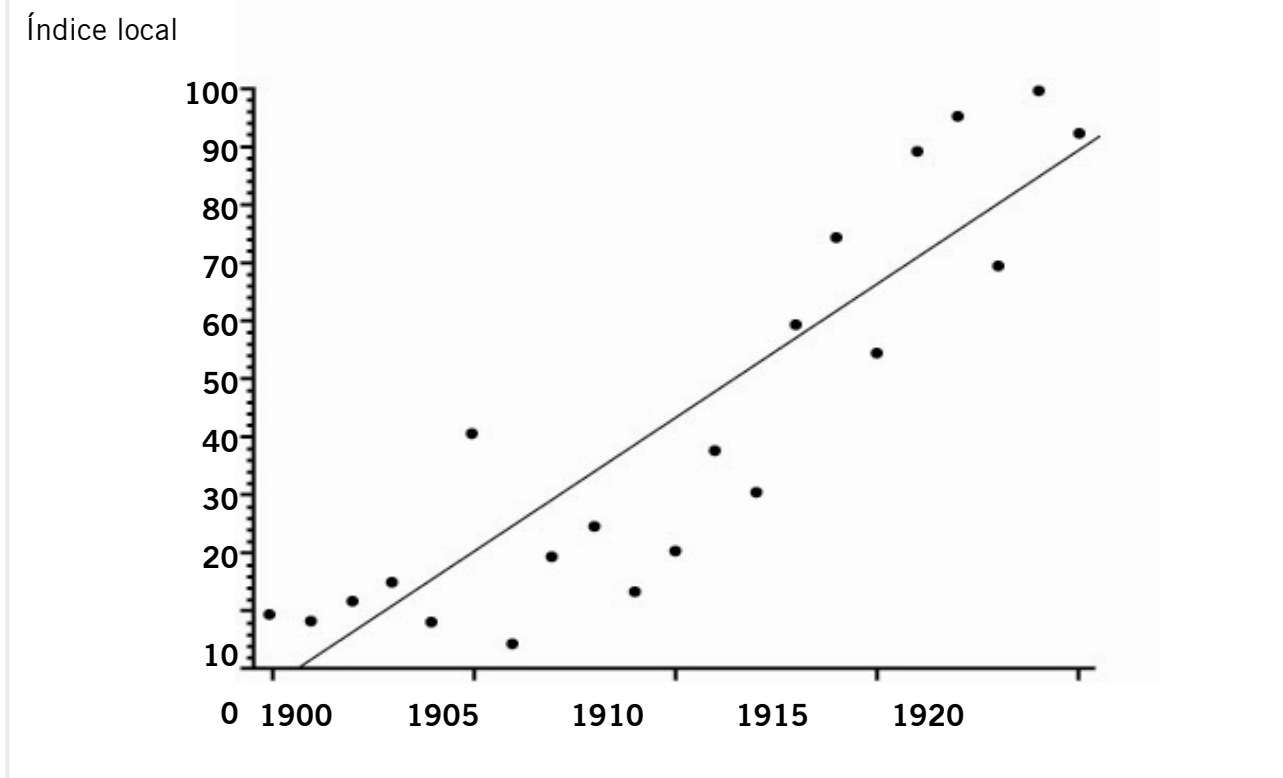


Diagrama de correlación lineal



GLOSARIO

Correlación.

Es el conjunto de técnicas estadísticas empleado para medir la intensidad de la asociación entre dos variables. Generalmente, el primer paso es mostrar los datos en un diagrama de dispersión.



1.3 Conceptos estadísticos clave

1.3.1 Población

En estadística, el concepto de población se refiere al conjunto de todos los elementos que se están estudiando, sobre los cuales se intenta sacar conclusiones sobre determinados ítems.

El tamaño de una población viene dado por el número de elementos que la constituyen; según este número, la población puede ser finita o infinita. Cuando el número de elementos que integra la población es muy grande, se la puede considerar como una población infinita. Por el contrario, una población finita está formada por un número limitado de elementos.

EJEMPLO



El conjunto de todos los números positivos constituye una población infinita, mientras que el número de tubos presentes en una planta de Ternium es una población finita.

1.3.2 Muestra y muestreo

A menudo puede resultar imposible o poco práctico observar la totalidad de los elementos de la población, sobre todo si son muchos. Por lo tanto, en lugar de examinar al grupo entero llamado población o universo, se examina una pequeña parte del grupo conocida como muestra.

Una muestra es una parte de la población que representará a la población a estudiar. Los datos que se recogen de una muestra se usan para referirse a la población que la muestra representa. En consecuencia, muestra y población son conceptos relativos: una población es un todo y una muestra es una fracción o segmento de ese todo. El estudio de muestras es más simple que el de población completa, tiene un costo menor y lleva menos tiempo.

ATENCIÓN



Una muestra representativa contiene las características relevantes de la población en las mismas proporciones que presenta esta última.

Para obtener una o más muestras de una población se lleva a cabo un procedimiento llamado muestreo. El muestreo se realiza una vez que se ha establecido del marco muestral representativo de la población. Cuando se estudian varias muestras de una población, es probable que las estadísticas varíen de una muestra a otra.

Los muestreos de laboratorio se utilizan durante el control del proceso, a fin de obtener muestras que revelen datos estadísticos.

1.3.3 Promedio, mediana y moda

Existen medidas que nos indican como se agrupa la población en determinados valores. Éstas se denominan promedio, mediana y moda.

El promedio es una medida de tendencia central que indica la posición representativa de un grupo de valores. El promedio es el valor más probable, pues es el que se repite más veces si la muestra (n) es muy grande. Su importancia radica en que representa la totalidad de los datos, ya que es el valor central.

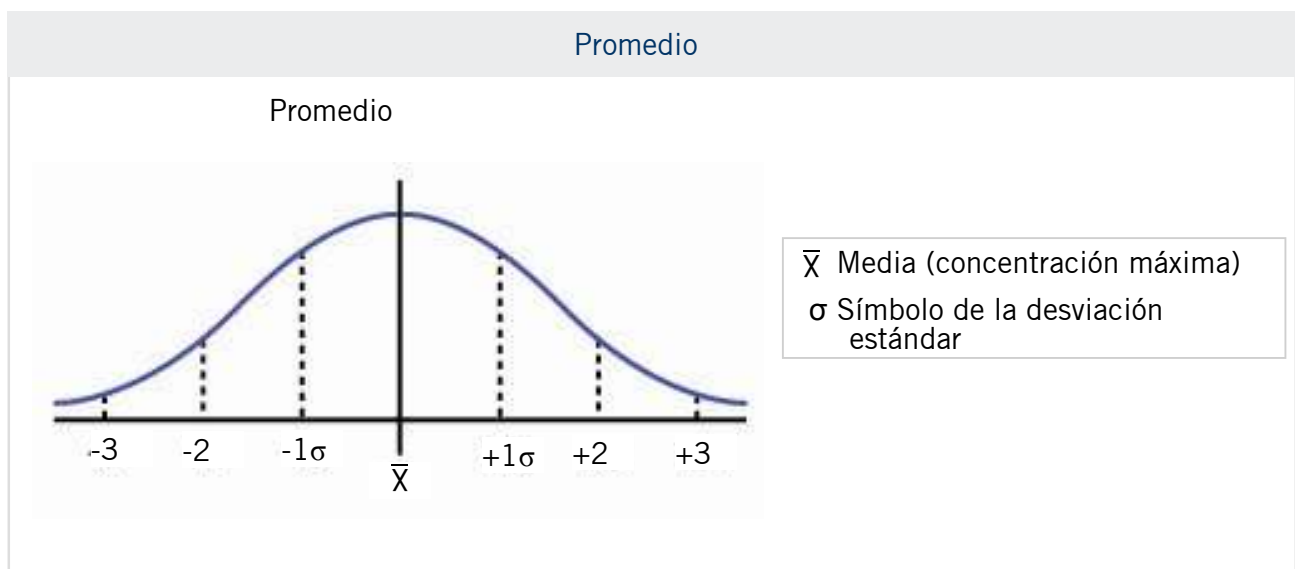
La media o promedio se obtiene sumando todos los valores y dividiendo el total por la cantidad de valores contabilizados:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Donde:

Σ	Símbolo que indica la sumatoria de valores.
X_i	Valor individual.
n	Número de valores en el grupo.

Tiene la siguiente representación gráfica:



La mediana es el valor de la variable que separa por la mitad los datos que definen los valores. O sea que la mitad de los datos de la población o muestra están a la derecha de la mediana y la otra mitad, a la izquierda.

La moda es el valor de la variable que posee una mayor frecuencia en la distribución de datos. En un histograma, la moda corresponde al valor de la variable donde hay un pico o máximo.

1.3.4 Desviación estándar y varianza

La desviación estándar caracteriza la dispersión de los resultados obtenidos en una serie de n mediciones del mismo valor de una magnitud medida.

Esta desviación es un número: cuanto mayor es el valor, más grande es la dispersión, y viceversa. La desviación estándar indica cómo se agrupan todos los datos alrededor de la media mediante la fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

Σ	Símbolo que indica la sumatoria de valores.
X_i	Valor individual.
\bar{X}	Media aritmética del grupo.
N	Número de valores en el grupo.

La varianza es una medida del grado de dispersión de los diferentes valores tomados por una variable. La varianza es el cuadrado de la desviación estándar y está representada por S^2 .

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

Por lo cual, el desvío estándar puede definirse como la raíz cuadrada de la varianza:

$$S = \sqrt{S^2}$$

1.3.5 Percentiles

Los percentiles son cada uno de los 99 segmentos que tomamos al dividir una muestra o un conjunto de elementos ordenados por 100 partes de igual frecuencia. Se representan con la letra P.

A su vez, el percentil k-ésimo de una muestra es el valor por debajo del cual se encuentra el porcentaje k de las observaciones.

Por su parte, los cuartiles dividen a un conjunto de datos en cuatro partes iguales. Si se piensa en un conjunto de datos ordenados de menor a mayor, el valor del medio es la mediana. Esto significa que el 50% de los datos son mayores que la mediana y el 50% son menores. De manera similar, los cuartiles dividen a un conjunto de datos en cuatro partes iguales.

El primer cuartil, al que se le llama Q1, es el valor por debajo del cual se encuentra el 25% de los datos, y el tercer cuartil, usualmente llamado Q3, es el valor por debajo del cual se encuentra el 75% de los datos. Q2 es la mediana.

A la hora de calcular los percentiles, si L_p es la posición del percentil deseado:

$$L_p = (n) \frac{p}{100}$$

Donde:

n	Número de datos.
p	Percentil.

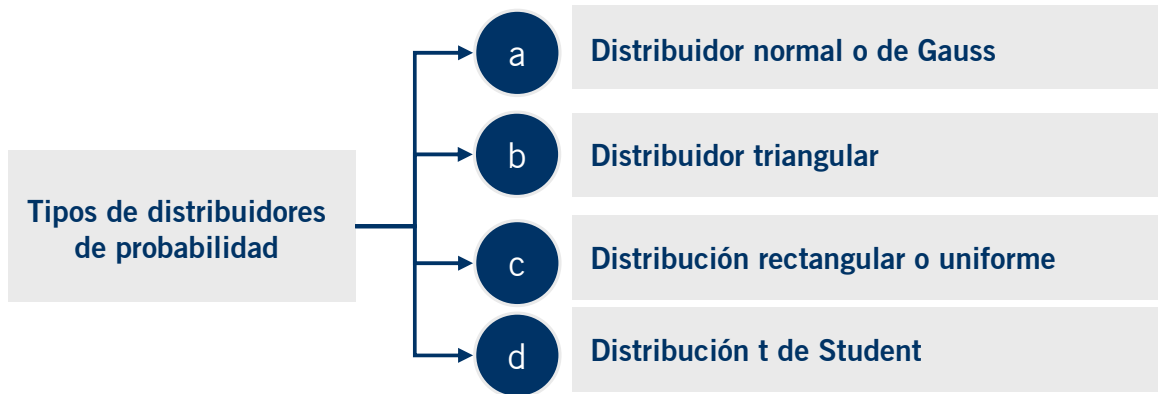
EJEMPLO

El percentil 33 es P33, el percentil 50 es el P50, que es también la mediana o Q2. El percentil 25 es el P25=Q1 y el percentil 75 es el P75=Q3.



1.3.6 Distribuciones de probabilidad

La distribución de probabilidad es una función que indica la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor determinado cualquiera o que pertenezca a un determinado conjunto de valores.



a Distribuidor normal o de Gauss

En estadística y probabilidad se llama distribución normal o de Gauss a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece en fenómenos reales.

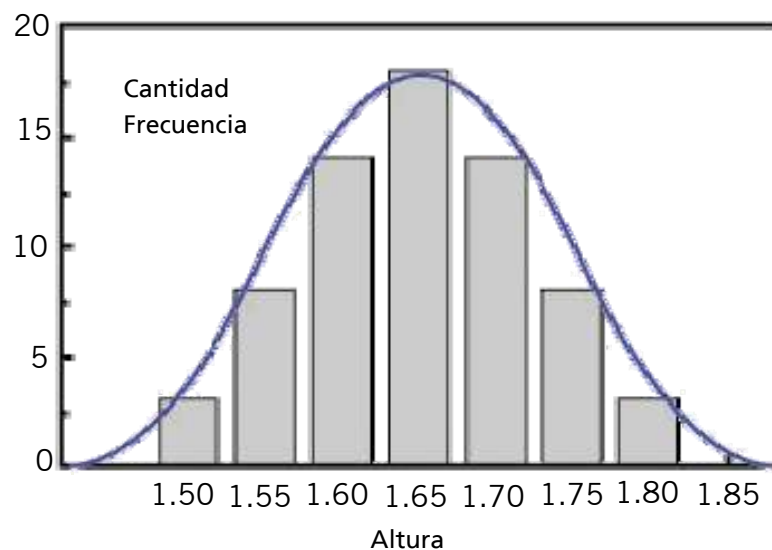
La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos naturales, sociales y psicológicos.

EJEMPLO



Si se quiere conocer como se distribuyen las alturas de una población, se puede utilizar un histograma, como se muestra a continuación:

Campana de Gauss



Este gráfico está compuesto por dos ejes. En el eje “x” (o de abscisas) se grafica la altura en forma de intervalos, y sobre el eje “y” se indica la cantidad de personas del conjunto que se encuentran dentro de cada intervalo (también llamado frecuencia). Uniendo los puntos medios superiores de las columnas del histograma se obtiene una curva que se denomina curva normal o Campana de Gauss.

¿Por qué se produce esta curva?

Se produce porque es normal encontrar personas de alrededor de 1.60 m o 1.70 y no lo es tanto hallar a gente que mida menos de 1.50 m o más de 1.80 m. Es decir, los “basquetbolistas” y la “gente pequeña” son pocos. Por lo tanto, la distribución se acerca más al eje X a medida que se aleja de la altura normal de la mayoría de las personas.

La campana se denomina “normal” porque estas variaciones ocurren con normalidad.

b

Distribuidor triangular

La distribución triangular es una distribución de probabilidad continua con:



El límite inferior a



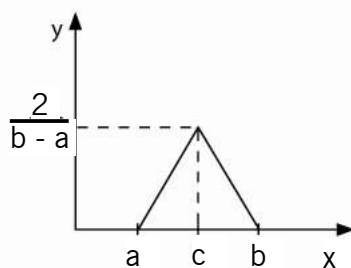
Un modo c



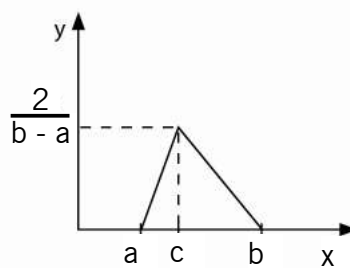
Un límite superior b

La distribución de probabilidad indica el rango de posibles valores que una variable aleatoria puede alcanzar. Variando la posición del valor más probable con relación a los extremos, esta distribución puede ser simétrica o no.

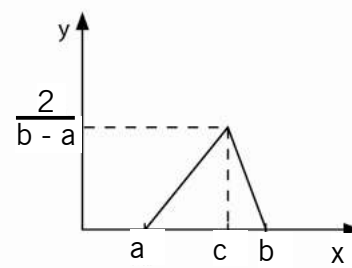
Gráficas de distribución triangular



Simétrico



Asimétrico positivo



Asimétrico negativo

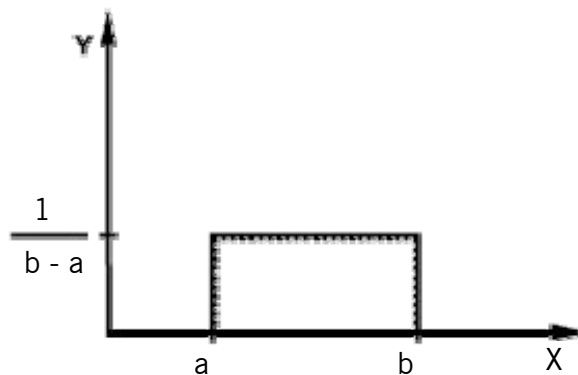
La distribución triangular se utiliza como una aproximación de otras distribuciones, como la normal, o ante la ausencia de información más completa. Dado que depende de tres parámetros simples y puede tomar una variedad de formas, se trata de una distribución muy flexible para modelizar una amplia variedad de supuestos.

c

Distribución rectangular o uniforme

Este tipo de gráfico se caracteriza por el hecho de que todos los resultados posibles entre un cierto mínimo y máximo son igualmente probables.

Gráficas de distribución uniforme



El mínimo es el parámetro de ubicación, mientras que la diferencia entre el máximo y el mínimo es el parámetro de escala.

La distribución uniforme se utiliza cuando hay muy poca información disponible sobre la variable. Por lo tanto, los parámetros mínimo y máximo se fijan para reflejar la mejor estimación del rango de valores que ésta puede tomar.

d

Distribución t de Student

Para poder utilizar la distribución normal es necesario que las muestras sean grandes ($n > 30$). Si la muestra es pequeña, los resultados no serán satisfactorios, por lo que en estos casos se utiliza la distribución t de Student.

La distribución t de Student es una distribución de probabilidad que surge al tener que estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño.

Gráficas de distribución t de Student



Las características de la distribución t son las siguientes:



Es continua



Tiene forma de campana y es simétrica



Es más baja y dispersa que la distribución normal. Cuando el tamaño de la muestra se incrementa, la distribución t se aproxima a la normal

1.3.7 Grados de libertad

Se puede definir a los grados de libertad como el número de valores que se puede elegir libremente.

EJEMPLO



Si se tienen dos valores de muestra, a y b, que tienen una media de 18, simbólicamente la situación es:

$$\frac{a + b}{2} = 18$$

De modo que: $10 + b = 36$

Por lo tanto: $b = 26$

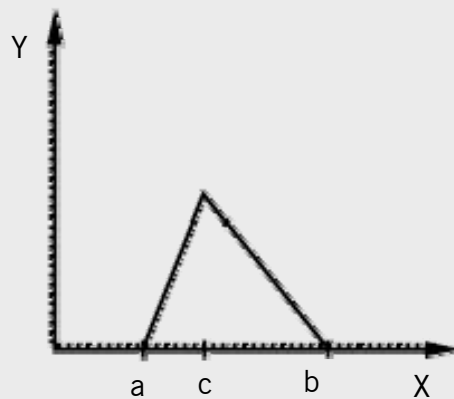
Este ejemplo se puede generalizar para cualquier medición en donde, dada la media de los valores, sólo quedan $(n - 1)$ elementos que pueden definirse libremente y uno es función de la media y el resto de los elementos.

ACTIVIDAD 2: Top 10 estadístico

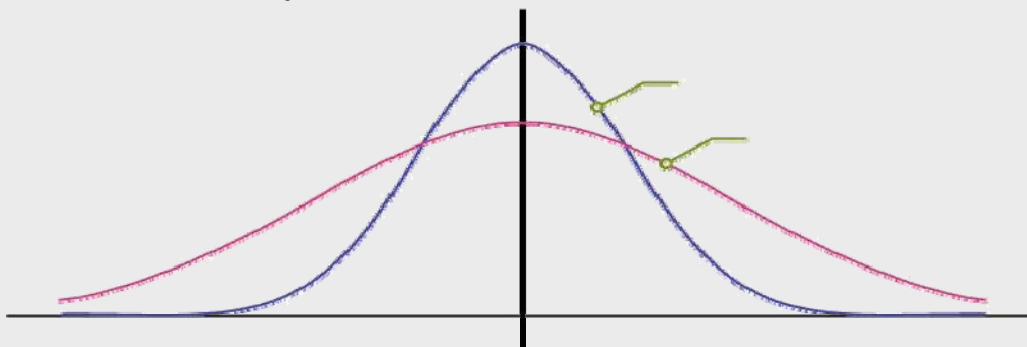
Esta actividad permitirá reforzar los conocimientos estadísticos trabajados hasta el momento

Responder las siguientes preguntas

- 1- ¿Para que se utilizan los gráficos de dispersión?
- 2- ¿Cuál es la diferencia entre un gráfico de dispersión y uno de línea?
3. ¿Para que se utilizan los muestreos de un laboratorio?
- 4- ¿Cuál es la moda en un histograma?
- 5- ¿Qué es un percentil?
- 6- ¿Qué es una distribución de probabilidad?
- 7- ¿Para qué se utilizan la distribución normal o de Gauss?
- 8- ¿Qué tipo de gráfico es el siguiente?



- 9- Qué caracteriza a la distribución rectangular o uniforme?
- 10- En el siguiente gráfico ¿Cuál es la distribución t de Student?



ACTIVIDAD 2: Top 10 estadístico (continuación)



A large area with a dark blue header bar and a light gray background containing horizontal lines for writing.

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 1 .
A continuación se desarrollará el capítulo Las mediciones.



Las mediciones

TEMAS DEL CAPÍTULO 2

2.1 Error en las mediciones	25
2.2 Errores sistemáticos y accidentales	28
2.3 Error absoluto y relativo	31
2.4 Ley de propagación de errores	34
2.5 Límite de confianza	36

En este capítulo se detallan los distintos tipos de errores que puede presentar una medición, así como el concepto de límite de confianza.



2.1 Error en las mediciones

2.1.1 Introducción

La medición es el conjunto de operaciones que tienen como fin determinar el valor de una magnitud.

Sistemas que intervienen en una medición

En el proceso de medición intervienen:



Un sistema objeto de la medición: la cantidad por medir



Un sistema de medición: el equipo p aparato de medición y la teoría según la cual se fundamenta su funcionamiento



Un sistema de referencia: la unidad empleada, con su definición y su patrón



El operador: responsable de decidir si se han cumplido los criterios de operación para realizar las lecturas del instrumento

EJEMPLO



Medición:

Si se quiere medir la longitud de una pieza con un calibre de apreciación $A = 0,1 \text{ mm}$ entonces

Sistema objeto	La longitud de la pieza.
Sistema de medición	El calibre y su teoría.
Sistema de referencia	El metro.

EJEMPLO (Continuación)



Para medir esta pieza, se debe tener en cuenta lo siguiente:



Qué esté apoyada de modo que la longitud sea paralela al eje longitudinal del calibre



Que la presión nos sea excesiva



Que las superficies de la pieza y del calibre estén limpias



Que la iluminación de la escala sea correcta



Que la posición del observador con respecto a la escala no provoque errores de paralaje, etc.

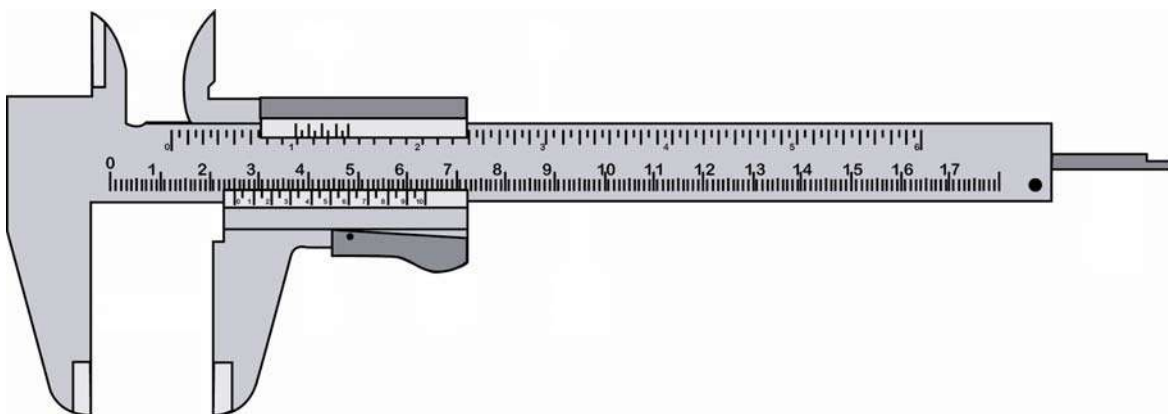
GLOSARIO



Calibre o pie de rey.

Después de la regla, es el instrumento de medición más ampliamente difundido y antiguo en mediciones. El calibre consiste en una regla rígida graduada de una longitud que, en los modelos más comunes es de unos 200 mm (u 8 pulgadas), aunque los hay disponibles de mayor longitud. Dicha regla posee un tope fijo y sobre ella se desliza otra regla o cursor, también llamado vernier, al que va unido otro tope o punta móvil. Ambos topes constituyen las mandíbulas del calibre.

Calibre o pie de rey



La operación de medición debe ser consistente consigo misma; es decir que cada vez que se mida la misma cantidad en las mismas condiciones, los resultados se reproducirán (dentro de ciertos límites). Para lograr esto, se deben definir los criterios del procedimiento de interacción entre los sistemas y el observador.

2.1.2 Error en las mediciones

Un error de medición es la diferencia entre el valor medido o entregado por un equipo y el valor convencionalmente aceptado como verdadero (entregado por el patrón de medición). Es decir, es el corrimiento que tiene un instrumento frente al valor de referencia de la medición.

Los errores de medición tienen distintas fuentes:



La imperfección propia de los instrumentos de medición (errores en el trazado de escalas de calibres, errores de paso en los micrómetros, etc.).



Inapropiado posicionamiento y manejo del instrumento durante la medición.



Incidencia de factores ambientales (fundamentalmente, la temperatura).



Interferencias de factores humanos, como la agudeza visual, la práctica, la concentración, etc.

EJEMPLO



Si el extensómetro mide 1 cm. ¿está midiendo realmente 1 cm. o está midiendo 1,01 cm.? Esta comprobación sólo se consigue si estamos midiendo un “patrón” sobre el cual conocemos su medida. Este patrón debe estar calibrado con un patrón nacional, que a su vez debe estarlo frente a patrones internacionales y estos, frente al patrón primario.

ATENCIÓN



Más adelante se tratarán en detalle los distintos tipos de patrones.

2.2 Errores sistemáticos y accidentales

Atendiendo a las causas que los producen, los errores se pueden clasificar en dos grandes grupos: sistemáticos y accidentales.

2.2.1 Errores sistemáticos

Los errores sistemáticos son componentes del error de medición que en mediciones repetidas se mantienen constantes o varían de una manera predecible.

Estos errores son causados por una característica identificable del proceso de medición y, por ende, se repite del mismo modo al volver a realizar la medición. De este modo, el error sistemático es un tipo de error que permanece constante:



En valor absoluto



En signo



Durante el transcurso de varias mediciones de un mismo valor de cierta magnitud .

Para detectar el error sistemático, las mediciones deben efectuarse siempre en las mismas condiciones. No obstante, puede ocurrir que cuando las condiciones cambian, el error varíe de acuerdo con una ley definida.

Los errores sistemáticos son, a veces, fácilmente corregibles. Para ello, basta conocer su magnitud.

RECUERDE

Magnitud.

Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, donde la propiedad tiene una magnitud que puede ser expresada como un número y una referencia.



EJEMPLO



La aparición de un error de cero de un instrumento es un ejemplo de un error causado por operar bajo temperaturas más altas de lo normal.

Se puede cuantificar este error de cero del instrumento midiendo con éste último una magnitud conocida (patrón). Si sabemos que la magnitud de este patrón es 0,25 mm y la medición acusa 0,27, podemos conjeturar que el error de cero del instrumento es -0,02 mm. Por lo tanto, al medir cualquier magnitud con dicho instrumento deberemos restarle a la lectura 0,02 mm.

Del mismo modo, si la temperatura del laboratorio es de 25 °C en lugar de 20 °C (y no se la puede bajar) los instrumentos pueden acusar lecturas mayores a las correctas. En consecuencia, se deberá corregir esas lecturas mediante el método ya mencionado.

GLOSARIO



Corrección.

Compensación para el efecto de un error sistemático. Valor que debe sumarse algebraicamente al valor indicado de la medición para obtener el resultado corregido.

Error de cero.

Error de medición donde el valor de la cantidad medida es cero. Aparece en un instrumento de medida cuando éste muestra una lectura x en lugar del cero que debería marcar en su ausencia de la magnitud física a medir. Las lecturas realizadas con este instrumento exigen una corrección de $-x$.

2.2.2 Errores accidentales

Los errores accidentales o aleatorios son componentes del error de medición que, en mediciones repetidas, varían de manera impredecible, tanto en valor absoluto como en signo, cuando se efectúa un gran número de mediciones del mismo valor en condiciones prácticamente idénticas. Se trata de pequeñas variaciones en las mediciones y se estudian desde el punto de vista estadístico.

Este tipo de errores no está regido por una característica tan definida como las que se dan en los errores sistemáticos. De hecho, los errores accidentales constituyen la suma de muchos factores que son imposibles de estudiar por separado. Por lo tanto, se deben analizar sus efectos para tratar de corregirlos globalmente.

ATENCIÓN



No se puede tratar el error aleatorio como una corrección del valor indicado de la medición. Si es posible, al término de una serie de mediciones realizadas en condiciones prácticamente idénticas (un mismo observador, que emplea el mismo instrumento de medición, en iguales condiciones ambientales, etc.), se debe fijar los límites entre los cuales se encontrará el error con una probabilidad determinada.

2.3 Error absoluto y relativo

Antes de realizar una medición con un grupo de instrumentos, es importante determinar qué tipos de errores pueden presentarse. En este sentido, los errores pueden ser absolutos y relativos.

2.3.1 Error absoluto

El error absoluto es la diferencia algebraica entre el resultado de la medición y el valor de comparación:

$$\text{Error absoluto} = \text{resultado de la medición} - \text{valor de comparación}$$

El error absoluto se expresa a través de la siguiente fórmula:

$$E_{\text{abs}} = V_m - V_v$$

Este valor de comparación puede ser el valor verdadero, el valor convencionalmente verdadero o la media aritmética de los resultados de una serie de mediciones.

EJEMPLO



El problema con los errores absolutos es que no todos tienen la misma importancia. Por ejemplo, un error de 1 mm. en el diámetro de un pistón es muy significativo, ya que si tuviera 1 mm. menos tendría un juego excesivo, y si tuviera 1 mm. más ni siquiera se lo podría introducir en el cilindro. No obstante, un error de la misma magnitud en la longitud de un puente de 2 km. de largo sería absolutamente despreciable.

2.3.2 Error relativo

El error relativo es el cociente entre el error absoluto y el valor real de la medida.

$$\varepsilon = E_{\text{rel}} = \frac{E_{\text{abs}}}{V_v} = \frac{V_m - V_v}{V_v}$$

El error relativo también se suele expresar en forma de porcentaje:

$$\varepsilon \% = E_{\text{rel}} 100 = \frac{E}{V_v} * 100$$

Este valor de comparación puede ser el valor verdadero, el valor verdadero convencional o la media aritmética de una serie de mediciones.

EJEMPLO



Se ha determinado el valor verdadero convencional de una longitud $\zeta = 15,20$ mm. y se encontró como resultado de la medición $\zeta = 15,07$ mm., y el error absoluto real $e = (15,07 - 15,20)$ mm. = - 0,13 mm.

El error relativo es:

$$\varepsilon = \frac{e}{l} = - \frac{0,13}{15,2} = - 0,0086 = - 0,86 \%$$

ACTIVIDAD 3: Error en las mediciones



Se propone la siguiente actividad para verificar la comprensión de los conceptos relativos a los errores en las mediciones

Responder las siguientes preguntas

1. ¿Cuáles son los sistemas que intervienen en una medición?

2. ¿Cuáles son las fuentes de errores en una medición?

3. ¿Qué es un error sistemático? ¿Cuál es el requisito necesario para corregirlo?

4. ¿Qué es un error accidental? ¿Cómo se corrige?

2.4 Ley de propagación de errores

Hay magnitudes que no se miden directamente, sino que se derivan de otras que sí son medidas en forma directa. Se hace evidente, entonces, que los valores obtenidos por cálculo estarán afectados por los errores cometidos en las mediciones. No obstante, la influencia que los errores de cada medición tiene en los resultados no es la misma.

Si las magnitudes componentes se miden con un cierto error, la magnitud resultante también lo poseerá en mayor o menor grado. Aquí se debe considerar el “arrastre” de errores, que se estudia a partir de la llamada Ley de propagación de los errores.

Esta ley indica la forma de calcular el error de una magnitud $L = f(X, Y, Z, \dots, W)$ cuando se conocen:

$$X = \bar{X} - E_x \quad \dots \quad \therefore \varepsilon_x = \frac{E_x}{\bar{X}}$$

$$Y = \bar{Y} - E_y \quad \dots \quad \therefore \varepsilon_y = \frac{E_y}{\bar{Y}}$$

$$Z = \bar{Z} - E_z \quad \dots \quad \therefore \varepsilon_z = \frac{E_z}{\bar{Z}}$$

$$W = \bar{W} - E_w \quad \dots \quad \therefore \varepsilon_w = \frac{E_w}{\bar{W}}$$

Es decir, se pueden calcular los valores de una magnitud L cuando se conocen los errores de las magnitudes de las que L es función. A continuación se presentan dos formas de calcular la propagación de errores de una magnitud L .

1

Se quiere calcular el error de una magnitud que es función de otras magnitudes medidas. Si el error es suma algebraica de éstas, el error absoluto de la magnitud es la suma de los errores absolutos de las mediciones realizadas, es decir:

$$L = a * X \pm b * Y \pm \dots \pm k * W$$

Donde: a, b, c, \dots, k son coeficientes numéricos reales.



EJEMPLO

Para conocer el área de un rectángulo se miden las longitudes de sus lados, y para determinar el volumen de una esfera se debe medir el diámetro

RECUERDE

E = Error absoluto.
 e = Error relativo



En este caso, el error absoluto de la magnitud L (E_L) se determina mediante la fórmula:

$$E_L = \pm \sqrt{a^2 * E_x^2 + b^2 * E_y^2 + c^2 * E_z^2 + \dots + k^2 * E_w^2}$$

2 Se quiere calcular la Función L desarrollable por logaritmos:

Si la expresión general es:

$$L = X^a * Y^b * Z^c \dots W^k$$

Donde: a , b , c y k son coeficientes numéricos reales.

Ahora el cálculo del error absoluto E_L no es tan inmediato como en el caso anterior. Lo que se determina, en primer lugar, es el error relativo de L (ϵ_L) mediante la fórmula:

$$\epsilon_L = \pm \sqrt{a^2 * \epsilon_x^2 + b^2 * \epsilon_y^2 + c^2 * \epsilon_z^2 + \dots + k^2 * \epsilon_w^2}$$

siendo suficientemente aproximada la fórmula:

$$\epsilon_L = \pm (a * \epsilon_x + b * \epsilon_y + c * \epsilon_z + \dots k \epsilon_w)$$

Luego, teniendo en cuenta la definición de error relativo:

$$\epsilon_L = \frac{E_L}{L}$$

resulta el error absoluto:

$$E_L = \epsilon_L * \bar{L}$$

con el valor más probable:

$$\bar{L} = \bar{X}^a * \bar{Y}^b * \bar{Z}^c \dots \bar{W}^k$$

ATENCIÓN

Las magnitudes consideradas deben ser independientes; es decir: las mediciones que conduzcan a determinar cualquiera de ellas no deben depender de las que conduzcan a la determinación de las restantes.



2.5 Límite de confianza

El nivel de confianza es la probabilidad de que el parámetro poblacional se encuentre dentro de un intervalo de valores. El nivel de confianza se denota por $(1 - \alpha)$, aunque suele expresarse con un porcentaje $((1 - \alpha) * 100\%)$. Es habitual tomar como nivel de confianza un 95% o un 99%, que se corresponden con valores α de 0,05 y 0,01, respectivamente.

Los límites de confianza del intervalo de confianza son los errores extremos (en más o en menos), cuya probabilidad de no ser sobrepasados por el error de la media aritmética de una serie de mediciones, tiene un valor α , tal que se puede estimar que la diferencia $(1 - \alpha)$ es despreciable.



El límite inferior se obtiene restando a la media de la muestra el error máximo de estimación.



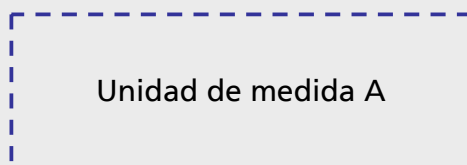
El límite superior se obtiene sumando a la media de la muestra el error máximo de estimación.

ACTIVIDAD 4: El desafío de medir

Esta actividad permitirá ampliar la comprensión del concepto de propagación de errores

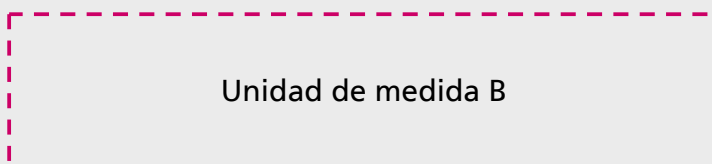
Llevar a cabo paso a paso las mediciones que se solicitan y sacar conclusiones

- 1 Tome una regla y recorte la unidad de medida A.

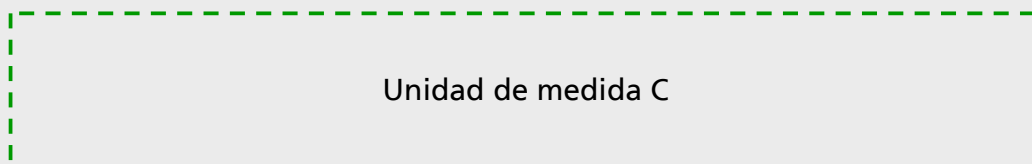


- 2 Mida la Unidad A con la regla y tome nota en la planilla de registro que encontrará en la página siguiente.

- 3 Mida la Unidad B utilizando la Unidad A. Al finalizar, registre dicha medida nuevamente en la planilla de registro.



- 4 Mida la Unidad C utilizando la Unidad B. Al finalizar, registre dicha medida nuevamente en la planilla de registro y, utilizando la unidad C, mida algún objeto.



- 5 Vuelva a medir el objeto que midió con la unidad C, pero esta vez hágalo con la regla. Compare los resultados.
- 6 Saque conclusiones acerca de cómo cada error en las mediciones se traslada a la siguiente y relacione esto con la Ley de Propagación de errores.

Planilla de registro	
Medida Unidad A	
Medida Unidad B	
Medida Unidad C	
Medida objeto con unidad C	
Medida objeto con regla	

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 2 .
A continuación se desarrollará el capítulo Incertidumbre .



Incertidumbre

TEMAS DEL CAPÍTULO 3

3.1 La incertidumbre	40
3.2 Conceptos generales	44
3.3 Fuentes de incertidumbre y coeficientes de sensibilidad	60
3.4 Métodos de estimación de incertidumbre	63
3.5 Cálculo de incertidumbre	76
3.6 Resultado de una medición	81

En este capítulo se brinda la definición actual de incertidumbre, sus diferencias con un enfoque anterior, y conceptos generales relacionados la medición. A su vez, se describen las fuentes de incertidumbre, sus métodos de estimación y el modo de expresar el resultado de una medición.



3.1 La incertidumbre

Por lo general, el resultado de una medición no es sólo un valor, sino un rango disperso de valores; una aproximación o estimación del valor de la magnitud en cuestión. Este resultado sólo está completo cuando va acompañado por una declaración de la incertidumbre de dicha medición.

GLOSARIO



Incertidumbre.

Es la cuantificación de la duda que se tiene sobre el resultado de una medición.

Error.

Resultado de una medición menos el valor verdadero del mensurando.

La incertidumbre permite determinar, cuantitativamente:



La calidad de los ensayos y mediciones



La adecuación de métodos de medición y ensayo a los propósitos de LABO.

Tradicionalmente, esta duda se expresaba mediante el concepto de error, definiéndolo como la diferencia entre un valor verdadero de la magnitud y el valor medido. El problema de este enfoque es que está basado en algo abstracto e inobservable.

Se reflexionará sobre la existencia misma de ese valor verdadero mediante un ejemplo:

EJEMPLO



El error:

Imaginemos un caso muy sencillo de medición, en el cual se debe medir el diámetro de un eje cilíndrico mediante un calibre pie de rey. ¿Cuál sería el valor verdadero de este diámetro? Si tal cosa existiera, tendría que ser único; el diámetro medido debería ser constante no sólo para cualquier ángulo en que se midiera el diámetro de una sección, sino también para todas y cada una de las secciones. Este único diámetro constituiría el valor verdadero del diámetro del eje.



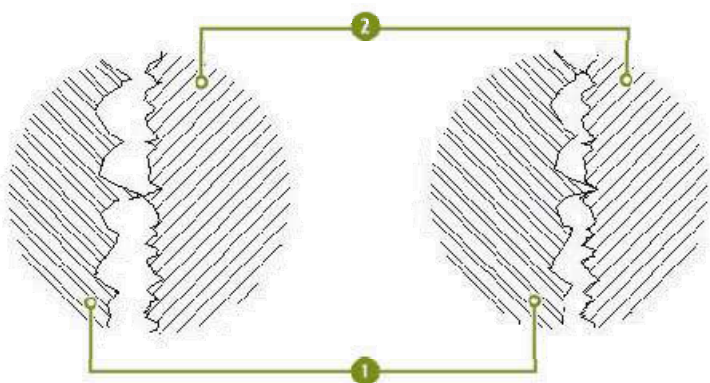
EJEMPLO

Pues bien, tal cosa no es posible porque no existe la tecnología capaz de lograrlo. Aún el más preciso de los mecanizados no permite hacer cilindros perfectos, pues si se ampliara la imagen de la superficie (por ejemplo, mirándola a través de un microscopio) se podrá observar una rugosidad superficial, con depresiones o “valles” y protuberancias o “picos”.

Si además se tiene en cuenta que tampoco es posible lograr superficies planas perfectas, (como las de los filos de las puntas de un calibre o las caras de los palpadores de un micrómetro), habría infinitas combinaciones de picos, valles de instrumento y piezas a medir, y cada una arrojaría una medida distinta.

Las siguientes figuras dan una idea aproximada de esto. En ellas, la superficie con rayado simple representa el instrumento de medición, mientras que la de rayado doble representa la pieza a medir.

Instrumento de medición y pieza



1. Pieza a medir
2. Instrumento de medición

En la figura de la izquierda hay contacto entre “picos”, mientras que en la figura de la derecha, un “pico” de la pieza hace contacto con el fondo de un “valle” del instrumento. En cada caso de los mostrados habrá una medición diferente y ¿cuál de todas ellas sería la verdadera? Ninguna, ya que no existe un valor verdadero; es imposible determinarlo.

ACTIVIDAD 5: Error de incertidumbre

Se propone la siguiente actividad para afianzar la comprensión de los conceptos de error e incertidumbre

Armar un grupo de 3 o 4 personas y seguir las siguientes instrucciones

Disponer de un lápiz o lapicera. Cada miembro del equipo debe:

1. Medir el largo de la lapicera y anotar en la tabla el resultado de dicha medición.
2. Registrar en la fila RD el rango de diferencia que encuentre entre su medición y la del participante que haya realizado una medición previa.

PARTICIPANTES	LARGO DE LA LAPICERA
P1	
RD	
P2	
RD	
P3	
RD	
P4	

Definición actual de incertidumbre

Cuando efectuamos cualquier tipo de medición es importante tener en cuenta que ningún valor obtenido de un parámetro dado es perfectamente exacto. Los instrumentos no miden el “valor verdadero” del parámetro, sino que brindan una estimación de éste. Por lo tanto, al realizar cada medición debemos tratar de responder una pregunta muy importante: ¿qué tan exacta es la medición?

Actualmente, se considera que la incertidumbre es un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza a la dispersión de los valores que podrían ser atribuibles al mensurando.

Los resultados de una medición y los componentes de incertidumbre (causada por el operador, los instrumentos, el método, etc.) son considerados variables aleatorias. Por lo tanto, se combinan entre sí cuadráticamente, no linealmente.

A continuación, se presentan las diferencias entre los conceptos de error e incertidumbre:

Error	Incertidumbre
Diferencia respecto de un valor de referencia.	Intervalo o rango de valores.
Posibilidad de corrección.	Imposibilidad de corrección.
Estimado como valor medio.	Estimado como desvío estándar.
Se combina linealmente.	Se combina cuadráticamente.
Presupone el conocimiento de un valor (convencionalmente) verdadero, nominal o de referencia.	Variación en torno al valor medio de la medición, sin significado físico.
Concepto determinístico.	Concepto no-determinístico.

GLOSARIO

Determinístico.
Se puede prever el resultado.



Como conclusión, se puede afirmar que los ensayos y mediciones no pueden realizarse en perfectas condiciones, ya que:



Es imposible conocer el valor real del mensurando



Toda medición y/o ensayo está sujeto a incertidumbre .

3.2 Conceptos generales

En este apartado se detallarán los conceptos clave que se utilizan durante el proceso de medición.

3.2.1 Patrones

Patrón

Medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición, cuyo objetivo es definir, realizar, conservar o reproducir una unidad, o uno o varios valores de una magnitud para usar como referencia.

Patrón internacional

Patrón reconocido mediante un acuerdo internacional, empleado como base para la asignación de valores a otros patrones de la misma magnitud.

Patrón nacional

Patrón reconocido por una decisión nacional, empleado en un país como base para la asignación de valores a otros patrones de la misma magnitud.

Patrón primario

Patrón que es designado o ampliamente reconocido como poseedor de la más alta calidad metrológica y cuyo valor es aceptado sin referirse a otros patrones de la misma magnitud.

Patrón secundario

Patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud.

Patrón de referencia

Patrón que tiene, generalmente, la mejor calidad metrológica disponible en un lugar u organización, a partir del cual se derivan las mediciones realizadas en dicho lugar.

Patrón de trabajo

Patrón que se utiliza para calibrar o verificar medidas materializadas, instrumentos de medición o material de referencia. Un patrón de trabajo se calibra, generalmente, por comparación con un patrón de referencia.

Materiales de referencia (MR)

Material o sustancia en la cual uno o más valores de sus propiedades son lo suficientemente homogéneos y están bien definidos como para utilizarlos al calibrar instrumentos, evaluar un método de medición o asignar valores a otros materiales.

Material de referencia certificado (MRC).

Material de referencia acompañado por un certificado. Este material posee los valores de una o más propiedades. A su vez, estas últimas están certificadas por un procedimiento que establece su trazabilidad. Cada valor certificado está acompañado de su incertidumbre, con un nivel de confianza establecido.

EJEMPLO



Un material de referencia puede hallarse en estado gaseoso, líquido o sólido y ser puro o no.

Ejemplo de ello son:

- El agua para la calibración de viscosímetros.
- El zafiro para calibrar la capacidad calorífica en calorimetría.
- Las soluciones de calibración en el análisis químico instrumental.



GLOSARIO

Calibración.

Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los siguientes dos factores: los valores de magnitudes indicados por un instrumento o sistema de medición, o representados por una medida materializada o un material de referencia y los valores realizados por patrones.

Verificación.

Suministro de evidencia objetiva que un determinado artículo cumple los requisitos específicos definidos en una norma, especificación o Regulación del Manejo del Equipo de Medición.

3.2.2 Trazabilidad

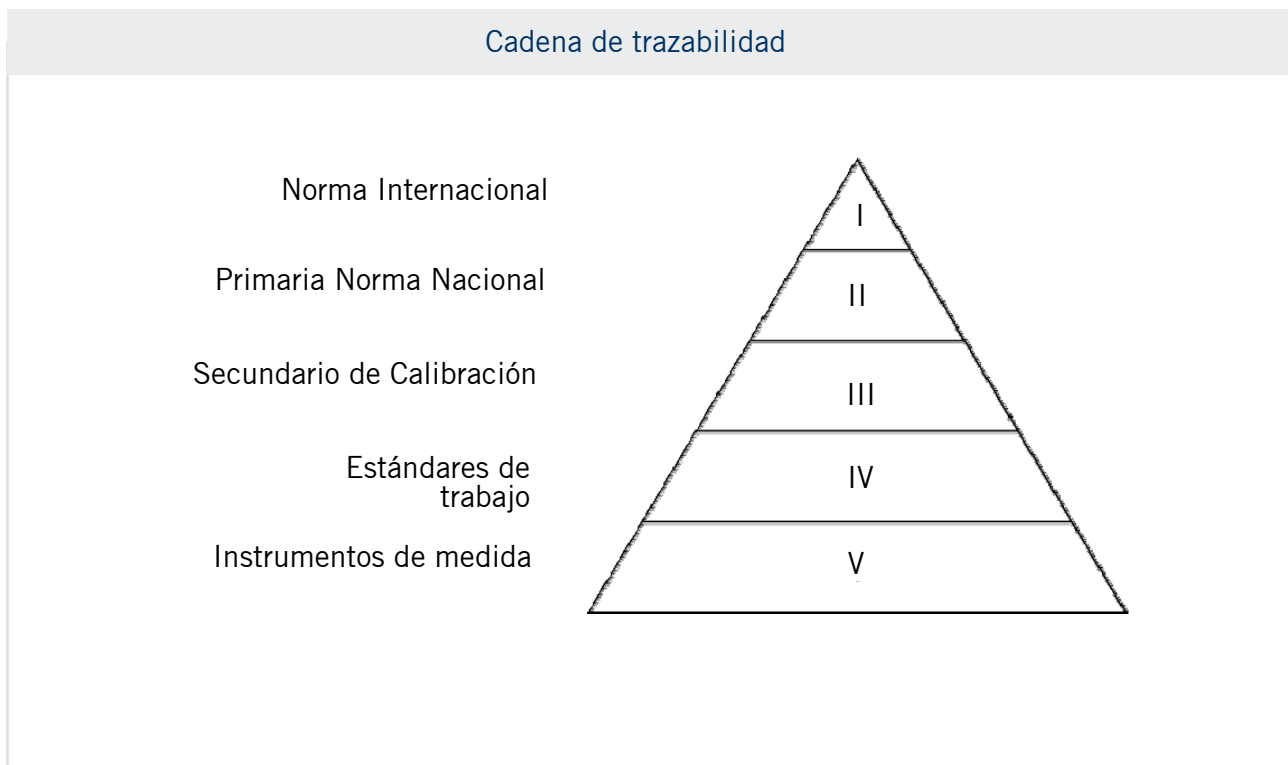
La **trazabilidad**, también llamada **serialización**, se refiere a la forma de rastreo en la que cada pieza es identificada individualmente o en grupo, de modo que un tramo particular de la pieza puede relacionarse con los distintas etapas del proceso por los que fue siendo procesada. Por requisitos de norma o solicitud del cliente se debe tener bajo control la información de cada pieza en los diferentes procesos de fabricación.

El término abreviado trazabilidad se utiliza a veces en el sentido de trazabilidad metrológica, así como para conceptos como la trazabilidad de la muestra o trazabilidad de materiales, donde se la interpreta como la historia ("huella") de un tema. Por lo tanto, para evitar confusiones, se prefiere utilizar el término completo de trazabilidad metrológica.

La trazabilidad metrológica es una propiedad de un resultado de la medición. Un resultado puede estar relacionado con una referencia a través de una cadena ininterrumpida de calibraciones documentadas, cada una de las cuales contribuyen a la incertidumbre de medición.

La cadena de trazabilidad es una secuencia de patrones de medición y de calibración. Se utiliza para relacionar un resultado de la medición con una referencia. Una cadena de trazabilidad metrológica se define a través de una jerarquía de calibración.

A continuación se representan esquemáticamente los distintos tipos de norma y el nivel de disminución de precisión a lo largo de la cadena de responsabilidades.



3.2.3 Calibración

La calibración es el procedimiento metrológico que permite determinar con suficiente exactitud cuál es el valor de los errores de los instrumentos de medición. Es decir, es el conjunto de operaciones que relaciona, bajo condiciones específicas, los valores de magnitudes indicados por un instrumento de medición o representados mediante patrones por una medida materializada o material de referencia.

El resultado de una calibración permite estimar los errores de indicación del instrumento de medición, del sistema de medición o de la medida materializada. Además, permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando, o bien determinar las correcciones aplicables a las indicaciones.

Constancia de calibración de un instrumento

El instrumento de calibración debe ser calificado como apto para el uso mediante una etiqueta, que indique el número de control del equipo, fecha de calibración, fecha de la próxima calibración, cédula de identidad y siglas del responsable que realizó la actividad.

ATENCIÓN



Antes de usar un instrumento, siempre se debe verificar que no haya vencido la fecha de calibración

Ajuste metrológico

El ajuste metrológico es una serie de operaciones que se llevan a cabo en un sistema de medición para proporcionar indicaciones prescritas correspondientes a los valores determinados de una cantidad que debe medirse.

La operación de ajuste consiste en llevar un instrumento de medición a un estado de funcionamiento adecuado para su uso. No debe confundirse con la calibración, que es simplemente una comparación del equipo de medición respecto de uno o varios patrones y el registro de las diferencias surgidas de esa comparación.

GLOSARIO



Equipo de medición.

Abarca todos los instrumentos de medición, los patrones de medición, los materiales de referencia, los aparatos auxiliares y las instrucciones que sean necesarias para efectuar una medición. También incluye el equipo de medición utilizado para el desarrollo del ensayo y la inspección, así como el equipo utilizado en la calibración.

Confirmación metrológica

La confirmación metrológica es el conjunto de operaciones requeridas para asegurar la conformidad de un equipo de medición con los requisitos prescritos para la utilización prevista.

La confirmación metrológica suele incluir:



Calibración o verificación



Cualquier ajuste necesario o reparación y posterior recalibración



Comparación con los requisitos metrológicos para el uso previsto de los equipos .

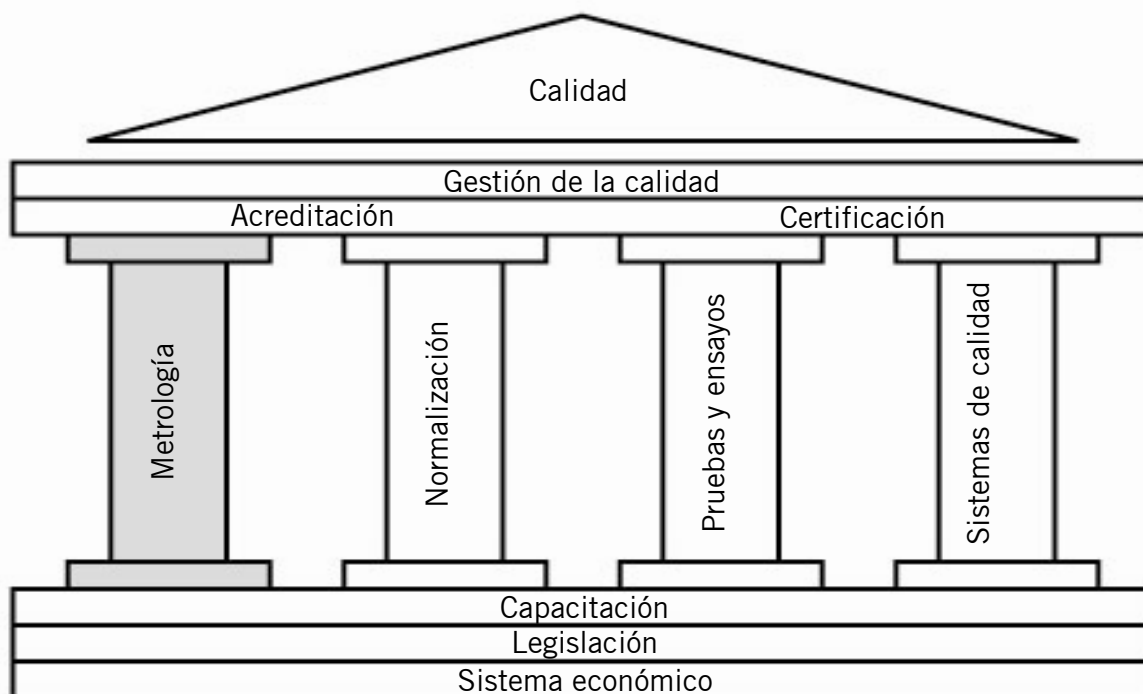


Los sellados y etiquetados requeridos .

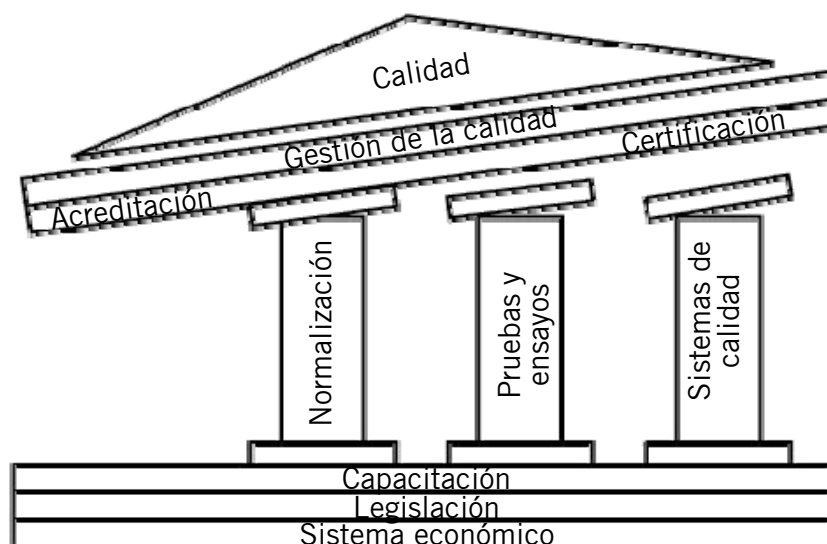
La confirmación metrológica no se alcanza hasta que la aptitud del equipo de medición para el uso previsto se haya demostrado y documentado. Esta confirmación es el camino más rápido para asegurar la calidad del producto. Los requisitos para el uso previsto incluyen consideraciones tales como el rango, la resolución, los errores máximos permitidos, etc

Por lo general, los requisitos metrológicos de confirmación son distintos y no se especifican en los requisitos del producto.

Factores que aseguran la calidad de un producto



Menor calidad del producto por ausencia del factor metrológico



3.2.4 Mensurando

Los mensurandos son las magnitudes particulares objeto de una medición. En un proceso de 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.

$$Y = f (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

La función modelo f representa el procedimiento de medición y el método de evaluación, y describe cómo se obtienen los valores de la magnitud de salida Y a partir de los valores de las magnitudes de entrada.

En la mayoría de los casos, la función modelo corresponde a una sola expresión analítica. En otros casos, se requieren varias expresiones que incluyan correcciones y factores de corrección de los efectos sistemáticos. Esto implica que existe una relación más complicada, que no se expresa explícitamente como una función. Aun más: f puede determinarse experimentalmente, existir sólo como un algoritmo de cálculo que deba evaluarse numéricamente, o ser una combinación de todo ello.

El conjunto de 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 a él:

1

Magnitudes cuyo valor estimado e incertidumbre asociada se determinan directamente en la medición.

Estos valores pueden obtenerse, por ejemplo, a partir de una única observación, observaciones reiteradas o juicios basados en la experiencia. Pueden exigir la determinación de correcciones de las lecturas del instrumento y de las magnitudes de influencia, como la temperatura ambiental, la presión barométrica o la humedad relativa.

2

Magnitudes cuyo valor estimado e incertidumbre asociada se incorporan a la medición desde fuentes externas.

Estas magnitudes pueden estar asociadas a patrones de medida calibrados, materiales de referencia certificados o datos de referencia obtenidos de manuales.

GLOSARIO



Magnitud de entrada.

Es la cantidad que se debe medir, o una cantidad cuyo valor puede ser obtenido de otra manera para calcular el valor del mensurando.

Magnitud de salida.

Es el valor medido. Se calcula utilizando los valores de las cantidades de entrada en un modelo de medición.

3.2.5 Unidad

A continuación se detallan las nociones básicas relacionados con el concepto de unidad:

Símbolo de una unidad

Magnitud en un subconjunto elegido de un sistema de magnitudes dado, donde ningún subconjunto de magnitudes puede expresarse en términos de los otros. El subconjunto mencionado en la definición se denomina conjunto de magnitudes base.

EJEMPLO

m es el símbolo del metro
A es el símbolo del ampere

Sistema de unidades

Conjunto de unidades base y sus derivadas, junto a sus múltiplos y submúltiplos, definidas de acuerdo a las normas establecidas para un sistema de magnitudes dado.

EJEMPLO

Sistema Internacional de Unidades (SI).

Sistema Internacional de Unidades (SI)

Sistema de unidades basado en el sistema de magnitudes internacional, sus nombres y símbolos. Incluye una serie de prefijos y sus normas de uso adoptadas por la Confederación General de Pesos y Medidas.

Unidad de base

Unidad de medición de una magnitud de base, en un determinado sistema de magnitudes. Un sistema coherente de unidades tiene sólo una unidad de base por cada magnitud de base.

Número de magnitud	Símbolo de la magnitud	Unidad	Símbolo de la unidad
1. Longitud	l	metro	m
2. Masa	m	kilogramo	kg
3. Tiempo	t	segundo	S
4. Corriente eléctrica	l	ampere	A
5. Temperatura termodinámica	T	kelvin	K
6. Cantidad de materia	n	mol	mol
7. Intensidad luminosa	L _v	candela	cd

Unidad derivada

Unidad de medición de una magnitud derivada, en un sistema determinado de magnitudes.

Número de magnitud	Símbolo de la magnitud	Unidad	Símbolo de la unidad
1. Frecuencia	hertz	Hz	1/s
2. Fuerza	newton	N	Kg x m/s ²
3. Presión, tensión, mecánica	pascal	Pa	n/M ²
4. Energía, trabajo, cantidad de calor	Joule	J	Nm
5. Potencia, flujo energético	watt	W	J/s
6. Potencial eléctrico, diferencia de potencial, fuerza electromotriz, tensión	Volt	V	W/A
7. Resistencia eléctrica	ohm	Ω	V/A
8. Flujo magnético	weber	Wb	V.S
9. Iluminancia	Lux	Lx	Lm/m ²
10. Actividad (de un radionucleido)	becquerel	Bq	l/s
11. Dosis equivalente	sievert	Sv	J/kg

3.2.6 Exactitud

La exactitud es el grado de acuerdo entre el valor de una cantidad medida y el valor verdadero del mensurando.

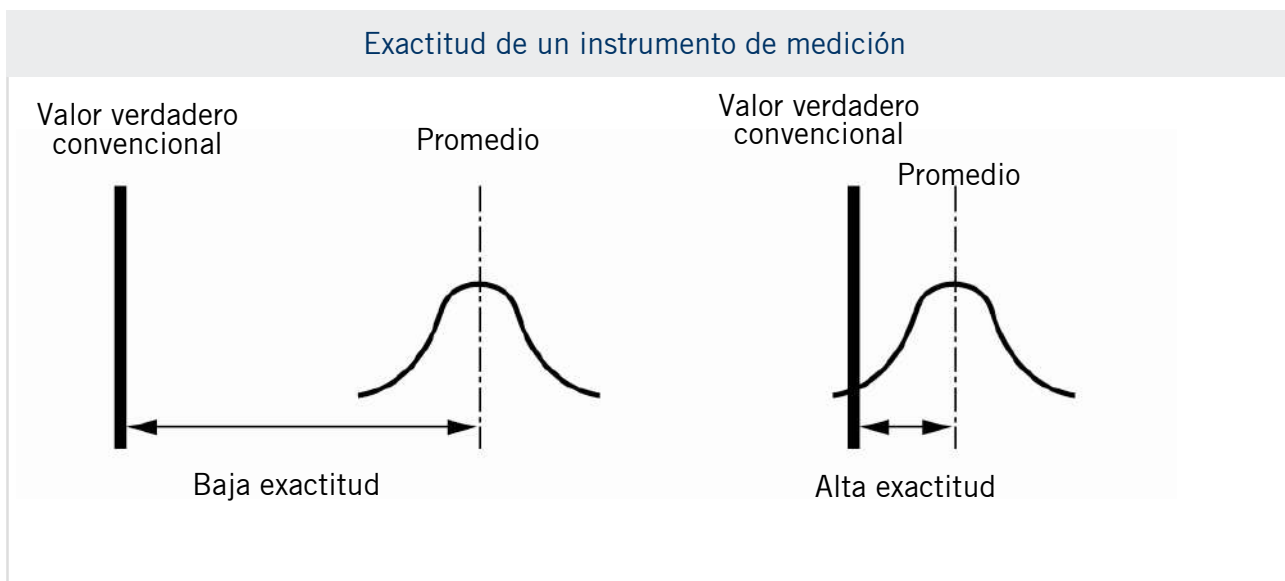
Una medición es exacta cuando hay una proximidad entre su resultado y el valor verdadero del mensurando. La falta de exactitud de un instrumento es originada por el error sistemático y por lo tanto, puede ser corregida con un correcto ajuste del instrumento.



GLOSARIO

Exactitud de un instrumento de medición.

Aptitud de un instrumento de medición para dar respuestas cercanas al valor verdadero.



La exactitud de los resultados no debe ser demasiado baja ni demasiado alta, ya que esto incrementaría los costos. Por lo tanto, debería ajustarse al propósito perseguido.

Para asegurar exactitud y confiabilidad de los resultados, el Laboratorio tiene en cuenta los siguientes factores en los procedimientos de ensayo y calibración:



Personal (factores humanos)



Instalaciones y condiciones ambientales



Métodos de ensayo y calibración.



Validación de los método.



Equipos.



Trazabilidad de las mediciones.



Muestreo y manipulación de las muestras



Preparado de las probetas de ensayo

3.2.7 Repetibilidad y reproducibilidad

En todos los casos, los ensayos deben ser repetibles y reproducibles.

Repetibilidad

La repetibilidad es la proximidad entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando, realizadas bajo las mismas condiciones de medición. Estas condiciones se denominan condiciones de repetibilidad, y contemplan:



El mismo procedimiento



El mismo operador



El mismo instrumental de medición, usado en las mismas condiciones .



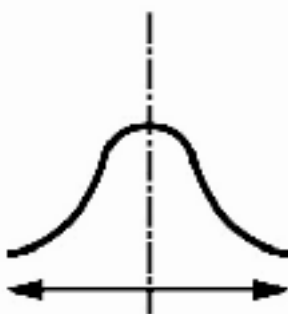
El mismo lugar .



Repetición efectuada en lapso breve

Repetibilidad de un instrumento de medición

Valor verdadero
convencional

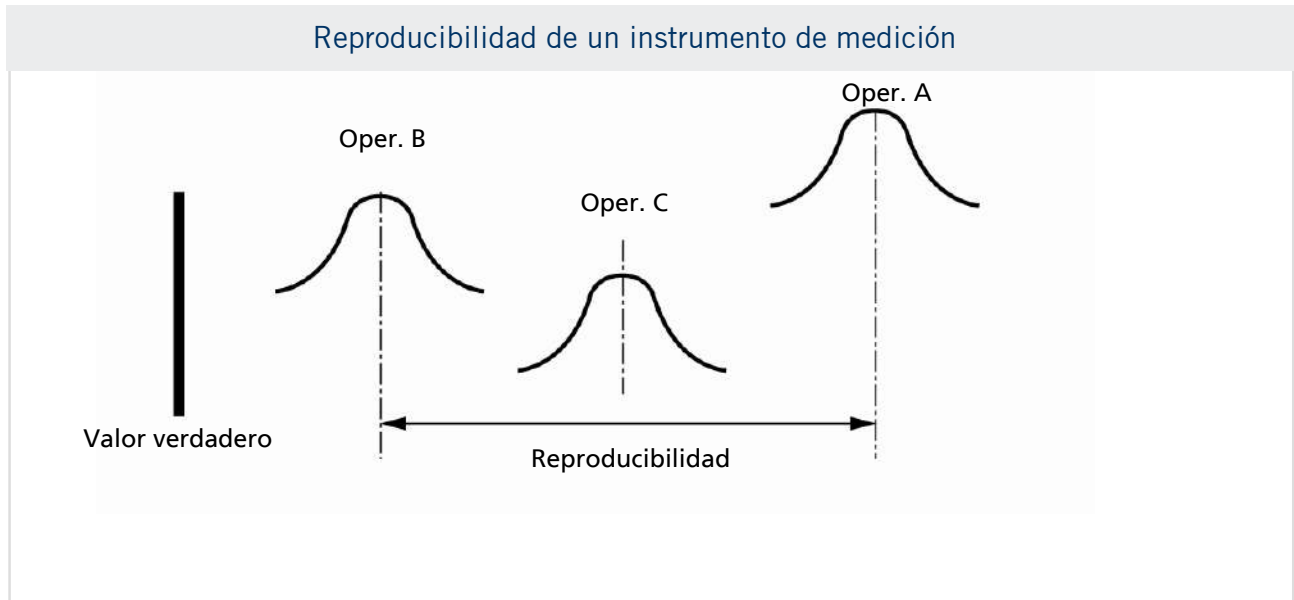


Oper. A

Repetibilidad

Reproducibilidad

La reproducibilidad es la proximidad entre los resultados de mediciones de un mismo mensurando, realizadas bajo distintas condiciones de medición.



Para que una expresión de reproducibilidad sea válida, deben indicarse las condiciones que se han cambiado. Las condiciones cambiadas pueden ser:



El patrón de referencia



El método de medición



El lugar.



El operador .



Las condiciones de uso.



El instrumental de medición



El tiempo .

ATENCIÓN



La reproducibilidad y la repetibilidad pueden expresarse cuantitativamente, en función de parámetros característicos de la dispersión de los resultados.

3.2.8 Resolución

La resolución es el cambio más pequeño en una magnitud que está siendo medida, y que causa una modificación perceptible en el indicador correspondiente. Para un dispositivo indicador digital, la resolución es el cambio en la indicación cuando el dígito menos significativo cambia en un paso.

3.2.9 Guía de incertidumbre ISO-GUM

La metodología general para la evaluación y expresión de incertidumbres de medición en calibraciones deberá seguir los lineamientos de la Guía para la Expresión de Incertidumbres de Medición (Guía ISO-GUM).

La Guía ISO-GUM indica cómo puede evaluarse y expresarse la incertidumbre de medición. Brinda al usuario una explicación teórica y los lineamientos sobre cómo pueden clasificarse y combinarse las fuentes de incertidumbre de medición. La ISO-GUM se ha convertido en un requisito para diferentes sistemas de calidad, y tiene un impacto significativo en la metrología, normalización, acreditación y evaluación de la conformidad.

Conceptos básicos

A continuación se listan las características básicas de la Guía ISO-GUM:



Aprecia la incertidumbre como un aspecto siempre positivo .



Aporta calidad al resultado



Considera todas las magnitudes que pueden influir en el mensurando.



Es un procedimiento simple y estandarizado de evaluación.



Utiliza evaluaciones Tipo A y Tipo B (no usa errores aleatorios y sistemáticos). Las características de estas evaluaciones se detallarán más adelante.



Contempla la incertidumbre estándar combinada (u_c) y la incertidumbre expandida (U). Estos dos tipos de incertidumbre se analizarán posteriormente

Procedimiento de evaluación

A continuación, se listan las tareas básicas que contempla la Guía ISO-GUM:



Definir el mensurando..



Desarrollar el modelo de medida (magnitudes, ecuación, diagrama causa-efecto, etc.).



Identificar todas las posibles fuentes de incertidumbre.



Estimar el valor de las magnitudes que influyen en el mensurando



Evaluar la incertidumbre estándar asociada a cada magnitud ($u_i = SD_i$).



Calcular el valor del mensurando (ecuación modelo)..



Combinar las u_i (ley de propagación: $u_c = (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots)^{1/2}$..



Calcular e informar la incertidumbre expandida ($U = k \times u_c$)..

ATENCIÓN



Muchos de estos conceptos serán detallados en las siguientes secciones.

ACTIVIDAD 6 Conceptos generales

Se propone la siguiente actividad para verificar la comprensión sobre los conceptos generales relativos a la incertidumbre

Leer los encabezados y escoger la opción adecuada para cada caso

- 1 Un patrón primario es:

<input type="checkbox"/> Un patrón cuyo valor es aceptado sin referirse a otros patrones de la misma magnitud.	<input type="checkbox"/> Un patrón que tiene la mejor calidad metrológica disponible en una organización.
--	---
- 2 La trazabilidad:

<input type="checkbox"/> Permite relacionar referencias (generalmente patrones nacionales o internacionales) mediante una cadena continua de comparaciones.	<input type="checkbox"/> Permite relacionar referencias (generalmente patrones primarios o de trabajo) mediante una cadena continua de comparaciones.
---	---
- 3 Las magnitudes cuyo valor estimado e incertidumbre asociada se incorporan a la medición desde fuentes externas:

<input type="checkbox"/> Pueden obtenerse a partir de una única observación, observaciones reiteradas o juicios basados en la experiencia.	<input type="checkbox"/> Pueden ser magnitudes asociadas a patrones de medida calibrados, materiales de referencia certificados o datos de referencia obtenidos de manuales.
--	--
- 4 La exactitud de los resultados de un cálculo de incertidumbre:

<input type="checkbox"/> No debe ser demasiado baja ni demasiado alta, para evitar incrementar los costos.	<input type="checkbox"/> Debe ser alta, para evitar incrementar los costos.
--	---

3.3 Fuentes de incertidumbre y coeficiente de sensibilidad

3.3.1 Fuentes de incertidumbre

A continuación se detallarán los diferentes factores que generan incertidumbre en una medición:

El instrumento de medición

Los instrumentos pueden tener errores, como la tendencia a dar resultados mayores o menores, sufrir cambios por envejecimiento, presentar una escala poco legible, desgastes y mala repetibilidad, así como muchos otros problemas funcionales.

El objeto a medir

Éste puede no estar en condiciones estables, como ocurre al medir un cubo de hielo en una habitación a temperatura ambiente.

El proceso de medición

La medición en sí misma puede resultar una tarea difícil de llevar a cabo.

Habilidad del operador

Algunas mediciones dependen de la habilidad y juicio del operador. El uso de una herramienta como el cronómetro también depende del tiempo de reacción de cada operador; por ello, él es responsable de medir y ensayar el producto lo más sistemáticamente posible.

EJEMPLO

El ajuste de un instrumento



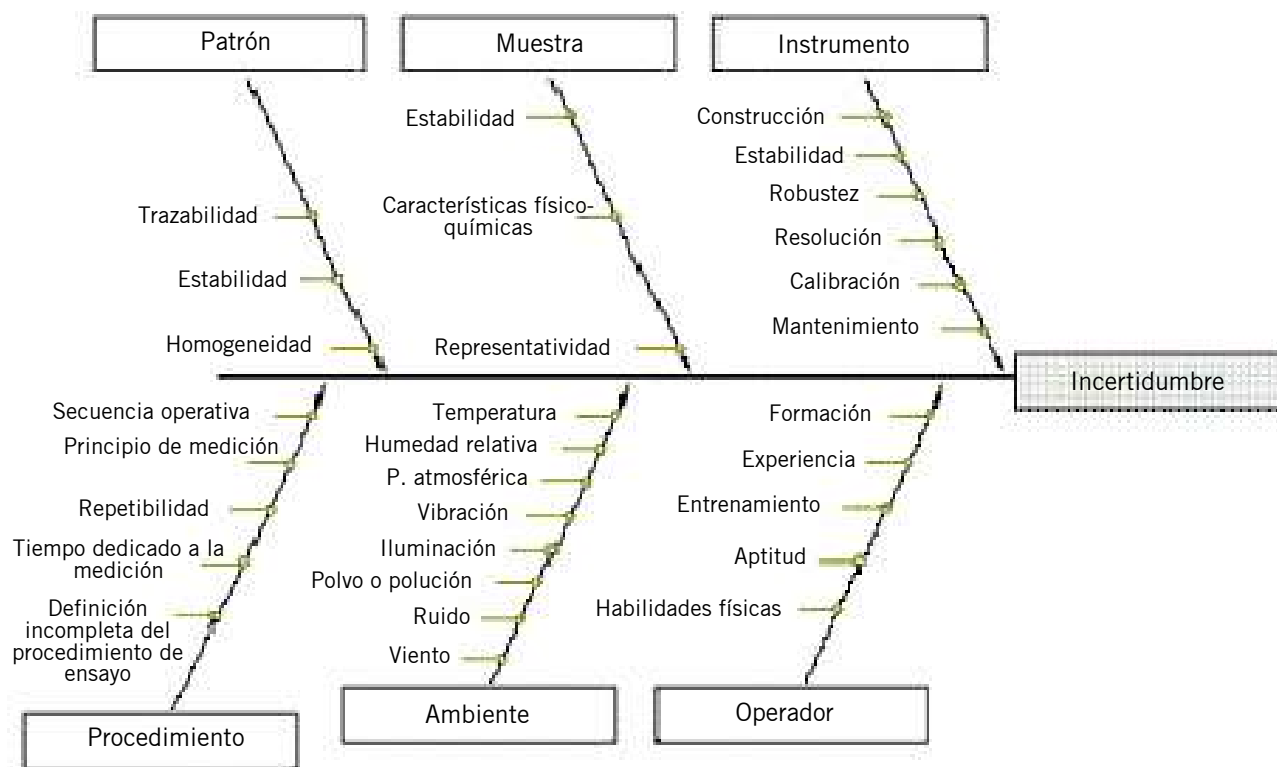
Muestreo adecuado

Las mediciones deben ser representativas del proceso que se desea determinar.

Condiciones ambientales

La temperatura, presión atmosférica, humedad del ambiente y otras condiciones, pueden afectar al instrumento de medida o al objeto que se mide.

Parámetros que influyen en la certidumbre



3.3.2 Coeficiente de sensibilidad

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 .

$$u_i(y) = c_i u(x_i)$$

$$u_i(y) = c_i u(x_i)$$

ATENCIÓN

La incertidumbre típica de medida, asociada a la estimación de salida o al resultado de la medición y , expresada por $u(y)$, es la desviación típica del mensurando Y . Se determina a partir de los valores estimados x_i de las magnitudes de entrada x_i y sus incertidumbres típicas asociadas $u(x_i)$. La incertidumbre típica asociada a un estimado tiene la misma dimensión que éste.

El 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 , según la siguiente ecuación, o utilizando métodos numéricos.

$$c_i = \frac{df}{dx_i} = \left. \frac{df}{dX_i} \right|_{x_i = x_i \dots x_N = x_N}$$

c_i es la derivada parcial de la función modelo f con respecto a X_i , evaluada para las estimaciones de entrada x_i .

3.4 Métodos de estimación de la incertidumbre

En lugar de utilizar el concepto de los errores aleatorios y sistemáticos, la Guía ISO-GUM ha adoptado el criterio de agrupar los componentes de incertidumbre en dos categorías en función de cómo se evalúan, tipo A y tipo B, donde:


Evaluación de tipo A

Se realiza mediante el cálculo de una serie de observaciones repetidas, utilizando métodos estadísticos.

Evaluación de tipo B

Se efectúa por medios de evaluación distintos de los utilizados para las de tipo A.

EJEMPLO



Utilizando los datos de: certificados de calibración, las especificaciones del fabricante, los datos de medición anterior, la experiencia con el comportamiento de los instrumentos, y toda la información pertinente

Pasos para la estimación de la incertidumbre

Los pasos a seguir son:

Paso 1

Identificar el procedimiento de ensayo y cantidades por las que las incertidumbres se vayan a estimar.

Paso 2

Identificar todas las fuentes pertinentes de las incertidumbres.

Paso 3

Evaluar las incertidumbres estándar:

- Análisis de tipo A - utilizando métodos estadísticos.
- Análisis de tipo B – utilizando otros medios más allá de los datos estadísticos.

Paso 4

Calcular la incertidumbre típica combinada u_c .

Paso 5

Determinar la incertidumbre expandida U (95% nivel de confianza).

3.4.1 Incertidumbres de tipo A

Son aquellas incertidumbres que se obtienen mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones.

Bajo condiciones de repetibilidad, la mejor estimación del valor esperado de una magnitud x (que varía aleatoriamente y de la cual se han obtenido n mediciones independientes x_i) es el promedio:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Los valores obtenidos en una serie de mediciones difieren entre sí debido a efectos aleatorios. A partir de las observaciones de esa serie, es posible calcular el desvío estándar experimental como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Por una serie de n lecturas repetidas, la incertidumbre estándar estimada de la media aritmética \bar{x} , u , se calcula a partir de:

$$u = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

donde s es el desvío estándar estimado.

A pesar de que esta corrección no se puede hacer para un componente aleatorio de la incertidumbre, la ecuación muestra el beneficio de incrementar el número de mediciones. Sin embargo, no siempre puede ser práctico repetir la medición varias veces. El beneficio se vuelve progresivamente menor que el número se incrementa, y normalmente no es necesario hacer más de 10 mediciones. De hecho, 5 medidas suelen ser suficientes, siempre que el nivel requerido de confianza se mantenga.

Desvío estándar de la media

¿Qué significado tiene el desvío estándar de la media? La respuesta es que, si tomáramos las medidas de infinitos valores, obtendríamos siempre la misma media. Sin embargo, al tomar sólo algunos datos experimentales veríamos que diferentes experimentos darían como resultado valores de la media diferentes en cada caso.

RECUERDE

El desvío estándar es la raíz cuadrada de la varianza $s = \sqrt{S^2}$



El desvío estándar de la media refleja el hecho de que no hay total certeza sobre el valor de la media, y se lo debe considerar como una **medida de la incertidumbre de la media**. Nótese que, a medida que el número de datos n aumenta, la incertidumbre disminuye, y que a medida que n tiende a infinito, tiende a cero.

EJEMPLO

Imagine que desea determinar la altura promedio de los alumnos de 3er año de una escuela, pero no desea o no tiene tiempo de medirlos a todos y procede a tomar una muestra seleccionando sólo algunos alumnos. Es obvio que, según qué alumnos seleccione, el promedio de las alturas cambiará.



Cálculo de la incertidumbre tipo A

Se quiere determinar el espesor de una chapa delgada. Para ello se realizan 10 mediciones en diferentes puntos de la chapa, y se supone distribución normal para los resultados obtenidos (en mm), a saber:

x_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
5.1	0,09	0,0081
5.3	0,29	0,0841
4.9	-0,11	0,0121
5,1	0,09	0,0081
4,7	-0,31	0,0961
5,2	0,19	0,0361
4,9	-0,11	0,0121
5,0	-0,01	0,0001
5,1	0,09	0,0081
4,8	-0,21	0,0441
50,1	SUMAS	0,4174

$$\bar{x} = \frac{50,1}{10} = 5,01$$

$$S = \sqrt{\frac{0,4174}{9}} \cong 0,19$$

Ahora debemos calcular la **incertidumbre de tipo A** y la **incertidumbre**:

Incertidumbre
de tipo A

$$u = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0,19}{\sqrt{10}} \cong 0,06 \text{ mm}; \text{ con } 10 - 1 = 9 \text{ grados de libertad}$$

Incertidumbre

$$u_A = t_{.975\%} \cdot S_{\bar{x}} = 2,26 \cdot 0,06 \cong 0,14$$

Cálculo de la incertidumbre tipo A

t.975 es un factor de corrección adicional, necesario por tratarse de una muestra pequeña ($n < 30$), que se obtiene de la **tabla de distribución t de Student**, similar a la de la **curva normal**. La **media**, con su incertidumbre asociada, resulta:

$$\bar{x} = 5,010 \pm 14 \text{ mm}$$

Finalmente, se puede informar el resultado: el espesor de la chapa es de 5,01 mm, incertidumbre tipo A: 0,14 mm (para 9 grados de libertad y un nivel de confianza del 95%).

3.4.2 Incertidumbres de tipo B

La incertidumbre típica de una magnitud de entrada que no se ha obtenido de repetidas mediciones debe ser evaluada por el juicio científico basado en toda la información disponible de los factores contribuyentes.

Las incertidumbres tipo B se calculan a través de medios diferentes al análisis estadístico. Se basan generalmente en toda la información disponible, que puede incluir:



Datos de mediciones previas..



Conocimientos sobre instrumentos y demás elementos de medición



Documentación (certificados, especificaciones de los fabricantes, tablas y referencias).

La evaluación tipo B de la incertidumbre típica consiste en calcular la incertidumbre asociada a un estimado x_i de una magnitud de entrada x_i por medios distintos al análisis estadístico de una serie de observaciones. La incertidumbre típica $u(x_i)$ se evalúa aplicando un juicio científico basado en toda la información disponible sobre la posible variabilidad de x_i .

RECUERDE

La incertidumbre típica de medida, asociada a la estimación de salida o al resultado de la medición y, expresada por $u(y)$, es la desviación típica del mensurando Y .



Tipos de distribución

Se aplicará la distribución normal cuando es razonable suponer que los desvíos menores son más probables que los mayores, o cuando está explícita o implícitamente declarado que así lo es. Sin embargo, en muchos casos como los siguientes se aplicará distribución rectangular:

EJEMPLO

En un certificado de calibración.



Resolución de equipos



Apreciación de lecturas .



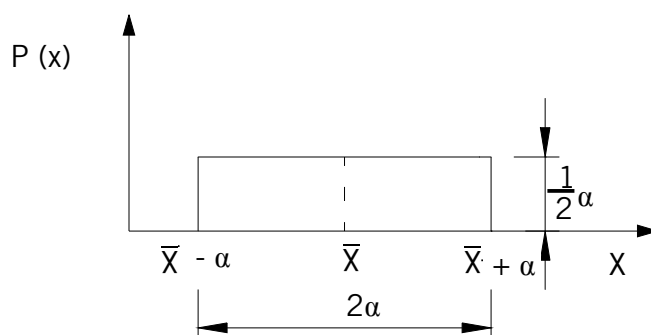
Pureza de materiales de referencia .



Toda situación en las que no hay motivo para suponer que el valor central es “más probable” que los extremos

De aquí surge el criterio de que, cuando no se tiene ninguna información sobre la naturaleza de una incertidumbre de Tipo B, se asume la **distribución rectangular**.

Distribución rectangular o uniforme



Para estos casos, la estandarización de la incertidumbre se realiza de la siguiente manera:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Donde a es el valor del punto medio entre los límites superior e inferior.

Las distribuciones rectangulares son bastante comunes, pero también pueden darse otras distribuciones.

EJEMPLO



La incertidumbre que suele declararse en un certificado de calibración de instrumentos es por lo general una distribución normal. En este caso, la incertidumbre típica es:

u = incertidumbre expandida U / k , donde k es el factor de cobertura.

Cálculo de la incertidumbre tipo B

Se calculan las incertidumbres tipo B de un calibre digital, cuya resolución es 0,01 mm. A su vez, la incertidumbre asociada a la falta de exactitud obtenida de un certificado de calibración es $\pm 0,03$ mm, al nivel de un desvío estándar.

Solución:

Primero se calcula la incertidumbre asociada con la falta de exactitud, como es al nivel de un desvío estándar:

$$u_{\text{exact}} = 0,03 \text{ mm} / 1 = 0,03 \text{ mm}.$$

A continuación calcularemos la incertidumbre asociada con la resolución, según la fórmula:

$$u_{\text{resol}} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \cong 0,006 \text{ mm}.$$

3.4.3. Incertidumbre estándar

La incertidumbre estándar es cada componente de las incertidumbres obtenidas mediante evaluaciones de tipo A y tipo B. Se representa por $u(x_i)$.

GLOSARIO



Incertidumbre estándar.

Incertidumbre de medición expresada como un desvío estándar.

Incertidumbre estándar combinada.

Incertidumbre de medición estándar que se obtiene usando las incertidumbres individuales de medida estándar y asociada a la entrada de magnitudes en un modelo de medición.

Incertidumbre combinada

La incertidumbre estándar combinada es el parámetro que expresa cuantitativamente la incertidumbre del resultado de una medición

Cuando tenemos más de una incertidumbre, se las combina cuadráticamente según la siguiente fórmula:

$$u_c = \sum_{i=1}^n u_i^2$$

En la determinación de la incertidumbre estándar combinada de mediciones directas existen casos en los cuales todos los argumentos son independientes entre sí.

Esto se obtiene calculando la raíz cuadrada de la suma cuadrática de las diversas incertidumbres estándar (u_i) no correlacionadas, que intervienen en el proceso de medición:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_i^2}$$

EJEMPLO



Calculemos la incertidumbre del ejemplo anterior sobre incertidumbre tipo B, combinando la incertidumbre asociada con la falta de exactitud con la asociada a la resolución:

$$u_c = \sqrt{u_{\text{exact}}^2 + u_{\text{resol}}^2} = \sqrt{0,03^2 + 0,006^2} \approx 0,031 \text{ mm.}$$

3.4.4 Incertidumbre expandida

En algunas aplicaciones industriales es necesario indicar una medida de la incertidumbre que defina un intervalo alrededor del resultado de medición, donde se espera esté incluida una fracción considerable de la distribución de valores que podrían ser atribuidos al mensurando.

Esta medida adicional de incertidumbre se denomina incertidumbre expandida, y se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada por un factor de cobertura K:

$$U = \pm k * u_c$$

Donde:

K	= 2, si las incertidumbres de tipo B son predominantes.
	Proviene de la tabla de la t de Student, si predominan las incertidumbres de tipo A.
	Puede ser aproximado por 2, si las incertidumbres de tipo A han sido evaluadas sobre la base de un gran número de observaciones ($n > 10$).

GLOSARIO



Incertidumbre expandida.

Producto de una incertidumbre de medida estándar combinada y un factor mayor que el número uno.

Factor de cobertura (k).

Representa el nivel de confianza requerido para una determinada distribución de probabilidad de ocurrencia. Para obtener un nivel de confianza del 95% en los resultados, se adoptan los siguientes valores de k:

- Distribución normal: $k = 2$
- Distribución rectangular: $k = \sqrt{3}$

La incertidumbre expandida (U_p) informada en los certificados de calibración se transforma en incertidumbre estándar $u(x_i)$ dividiendo U_p/K :

$$u(x_i) = \frac{U_p}{K}$$

Donde:

K	= 2 para probabilidad
	= 3 para probabilidad = 99%

EJEMPLO



Un certificado de calibración indica que la masa de un patrón de masa de acero inoxidable de valor nominal 1 kg es 1.000,000 325 g y que la “incertidumbre de este valor es 240 mg al nivel de tres desvíos estándar”. La incertidumbre estándar del patrón de masa es, entonces, simplemente:

$$U = 240\mu\text{g} / 3 = 80 \mu\text{g}$$

ACTIVIDAD 7: Olimpiada de mediciones

Se propone la siguiente actividad para ampliar la comprensión del concepto de cálculo de incertidumbre

Armar un grupo de 3 o 4 personas y seguir las siguientes instrucciones

Disponer de una moneda, un lápiz o lapicera, una carpeta y un borrador. Si no se consiguen estos elementos, pueden reemplazarse por otros.

1. Cada miembro del equipo debe calcular:

- El diámetro de la moneda, su dispersión y desvío estándar.
- El largo de la lapicera, su dispersión y desvío estándar.
- El ancho del borrador, su dispersión y desvío estándar.
- La superficie la carpeta, su dispersión y desvío estándar.

2. Todo el equipo debe completar las tablas de registro con los resultados que obtuvo cada participante (en las celdas P1, P2, P3, etc.).

PARTICIPANTES	MONEDA		
	Diámetro	Dispersión	Desvío estándar
P1			
P2			
P3			
P4			

ACTIVIDAD 7: Olimpiada de mediciones (continuación)

PARTICIPANTES	LAPICERA		
	Largo	Dispersión	Desvío estándar
P1			
P2			
P3			
P4			

PARTICIPANTES	BORRADOR		
	Ancho	Dispersión	Desvío estándar
P1			
P2			
P3			
P4			

ACTIVIDAD 7: Olimpiada de mediciones (continuación)

PARTICIPANTES	CARPETA		
	Superficie	Dispersión	Desvío estándar
P1			
P2			
P3			
P4			

3.5 Cálculo de incertidumbre

3.5.1 Cálculo basado en modelos matemáticos

A continuación, se explica a través de un ejemplo la forma de calcular la incertidumbre a partir de modelos matemáticos:

EJEMPLO



Se tiene un calibre cuya resolución es de 0,02 mm y la incertidumbre asociada a la falta de exactitud obtenida de un certificado de calibración es $\pm 0,03$ mm. Al nivel de un desvío estándar, se obtuvieron los siguientes valores de mediciones independientes repetidas:

1	2	3	4	5	6	7	8
15,22	15,28	15,30	15,26	15,22	15,28	15,32	15,26

Primero calculamos los parámetros estadísticos de la muestra con los métodos conocidos y obtenemos:

$$\bar{X} = 15,255 \text{ mm.}$$

$$S = 0,046 \text{ mm.}$$

Se obtendrán diferentes resultados con respecto a la incertidumbre:

Incertidumbre experimental

$$u = \frac{0,046}{\sqrt{8}} \cong 0,016 \text{ mm.}$$

Incertidumbre asociada a la falta de exactitud

$$u_{\text{exact}} = 0,03 \text{ mm.}$$

Incertidumbre asociada a la resolución

$$u_{\text{resol}} = \frac{0,02 \text{ mm.}}{\sqrt{3}} \cong 0,012 \text{ mm.}$$

EJEMPLO (Continuación)



Incertidumbre combinada

$$u_c = \sqrt{u^2 + u_{exact.}^2 + u_{resol.}^2} = \sqrt{0,016^2 + 0,03^2 + 0,012^2} \cong 0,036 \text{ mm}$$

Incertidumbre expandida

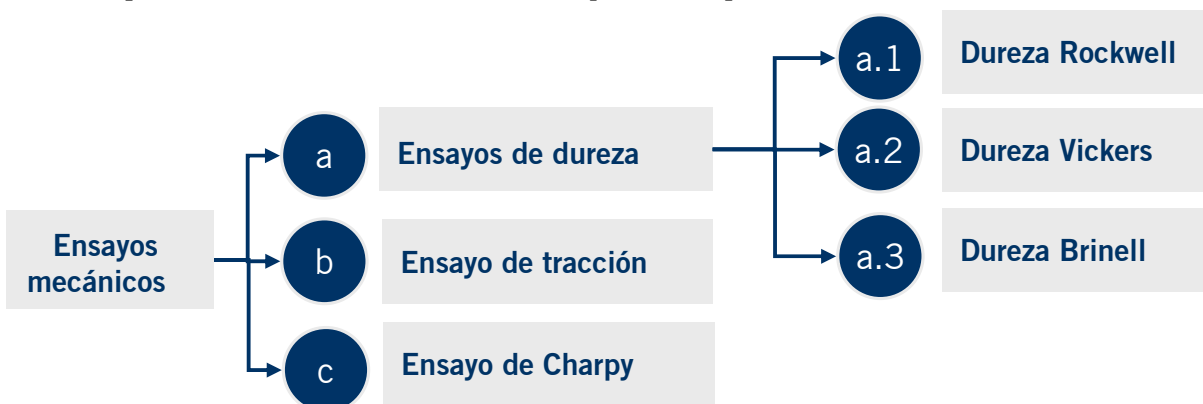
Como predominan las incertidumbres del tipo B, usaremos $k = 2$

$$U = \pm 2 \cdot 0,036 = \pm 0,072 \text{ mm}$$

De este modo, el valor medido es $15,255 \pm 0,072 \text{ mm}$, con un nivel de confianza del 95%.

3.5.2 Cálculo basado en ensayos mecánicos

A continuación se detallan las fórmulas de cálculo para realizar distintos tipos de ensayos mecánicos, y las correspondientes fuentes de incertidumbre que contemplan.



a

Ensayos de dureza

En este tipo de ensayo se evalúa la performance de la máquina a partir de las desviaciones observadas en un bloque patrón y una probeta.

A.1 Dureza Rockwell

Emplea como punta un cono de diamante (en algunos casos bola de acero). Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella.

A.2 Dureza Vickers

Emplea como penetrador un diamante con forma de pirámide cuadrangular. Para materiales blandos, los valores Vickers coinciden con los de la escala Brinell. Mejora del ensayo Brinell para efectuar ensayos de dureza con chapas de hasta 2mm de espesor.

A.3 Dureza Brinell

Emplea como punta una bola de acero templado o carburo de W. Para materiales duros, es poco exacta pero fácil de aplicar. Además, es poco precisa con chapas de menos de 6mm de espesor.

En los tres ensayos de dureza se contemplan las siguientes fuentes de incertidumbre:

Incertidumbre estándar de la dureza del bloque patrón	u_{CRM}	$U_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2}$
Incertidumbre estándar de la máquina al medir el CRM	$u_{\bar{H}}$	$u_{\bar{H}} = \frac{t_{1 \times S_H}}{\sqrt{n_H}}$
Incertidumbre estándar de la máquina de dureza al medir la probeta	$u_{\bar{x}}$	$u_{\bar{x}} = \frac{t_{2 \times S_x}}{\sqrt{n_x}}$
Incertidumbre estándar de la resolución de la máquina	u_{ms}	$u_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}}$
Incertidumbre estándar del error medio de la desviación de la máquina	u_b	$u_b = \frac{t_{3 \times 5_b}}{\sqrt{3}}$
Incertidumbre combinada	u_i	$u_i = \sqrt{u_{CRM}^2 + u_{\bar{H}}^2 + u_{\bar{x}}^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$
Incertidumbre expandida	u_{corr}	$u_{corr} = k \times u_i$

b

Ensayo de tracción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

Cada resultado del ensayo de tracción presenta diferentes incertidumbres. Esto se debe a que en el ensayo influyen menor cantidad de factores externos.

A continuación se detallan las incertidumbres que contempla este ensayo:

Parámetros influyentes		Tensión de fluencia		Tensión de rotura	Elongación después de rotura	Reducción de área
		OffSet	EUL			
		R_p	R_t	R_m	A	Z
Parámetros metrológicos	Error de indicación de la Fuerza	X	X	X		
	Velocidad de aplicación de la fuerza	X	X		X	
	Medición de la longitud inicial de la probeta	X	X		X	
	Medición de la longitud final de la probeta				X	
	Sección transversal inicial de la probeta	X	X			X
	Sección transversal final de la probeta					X*

C

Ensayo de Charpy

El ensayo Charpy es un ensayo de impacto, y mide una propiedad compleja de los materiales: La resiliencia. Esencialmente, se trata de medir la energía absorbida para conseguir la fractura de la probeta.

Las incertidumbre contempladas en este tipo de ensayo son las siguientes:

Incertidumbre estándar de la energía del bloque patrón	U_{CRM}	$U_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2}$
Incertidumbre estándar de la máquina al ensayar el CRM	$U_{\bar{H}}$	$U_{\bar{H}} = \frac{t_{H \times S_H}}{\sqrt{n_H}}$
Incertidumbre estándar de la máquina de impacto al ensayar la probeta	$U_{\bar{x}}$	$U_{\bar{x}} = \frac{t_{x \times S_x}}{\sqrt{n_x}}$
Incertidumbre estándar de la resolución de la máquina	U_{ms}	$U_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}}$
Incertidumbre estándar de las dimensiones de la probeta	U_d	$U_d = \frac{\bar{x} \times 1\%}{\sqrt{3}}$
Incertidumbre combinada	U_k	$U_k = \sqrt{U_{CRM}^2 + U_{\bar{H}}^2 + U_{\bar{x}}^2 + U_{ms}^2 + U_b^2}$
Incertidumbre expandida	U_k	$u_k = k \times u_k$

3.6 Resultado de una medición

El resultado de una medición es el valor atribuido a un mensurando obtenido por una medición.

RECUERDE

Los mensurandos son las magnitudes particulares objeto de una medición



3.6.1 Expresión del resultado de una medición

Cuando se informa un resultado, deben quedar claros los siguientes datos:



La indicación



El resultado sin corregir .



El resultado corregido .



Los valores que se han prometido

GLOSARIO

Indicación.

Valor de una magnitud dado por un instrumento.



La expresión completa del resultado de una medición incluye información sobre la incertidumbre de la medida.

EJEMPLO



Valor de referencia (mm)	Corrección (mm)	Incertidumbre (mm)
1	0,0029	0,0002

La incertidumbre se especifica mediante:



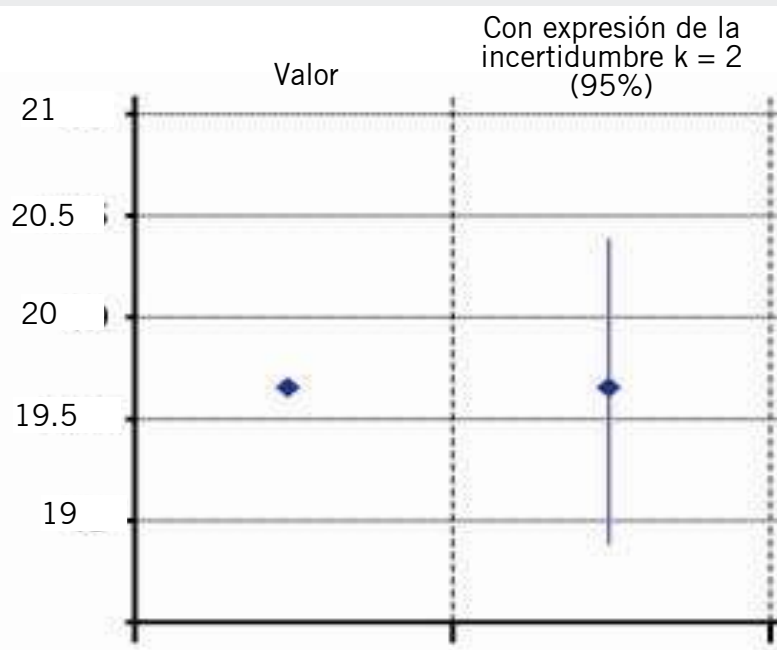
Intervalo en el que suponemos que se encuentra el valor real del mensurando .



El nivel de confianza de la afirmación anterior

Cuando los resultados van seguidos por indicaciones de incertidumbre, se presentan como intervalos en los que se espera se encuentren los valores verdaderos, con un determinado nivel de confianza (usualmente el 95%).

Formas de expresar un resultado

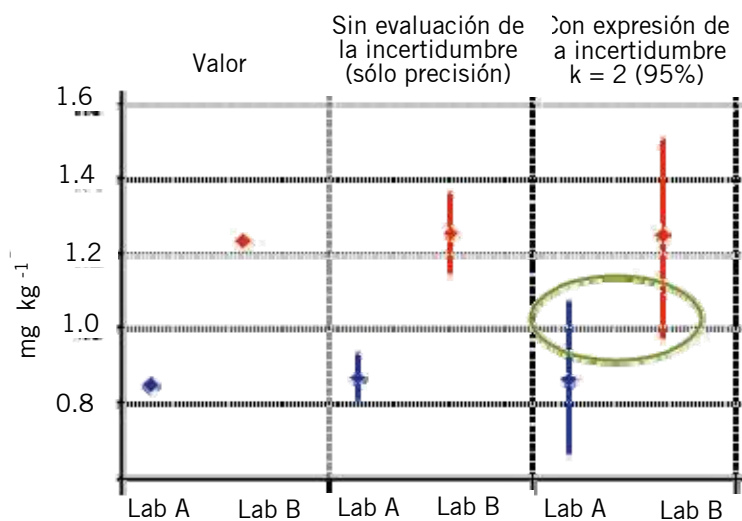


EJEMPLO



¿Son estos resultados diferentes?

Se tiene un calibre cuya resolución es de 0,02 mm y la incertidumbre asociada a la falta de exactitud obtenida de un certificado de calibración es $\pm 0,03$ mm. Al nivel de un desvío estándar, se obtuvieron los siguientes valores de mediciones independientes repetidas:



ATENCIÓN



Los resultados expresados de la tercera columna del gráfico son parcialmente compatibles.

3.6.2 Budget de medición y planilla de registros

El cálculo de incertidumbre puede mostrarse en forma de planilla o balance de incertidumbres (uncertainty budget), que agrupa sintéticamente a todos los elementos:

Magnitud	Valor estimado	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución
Componente 1	X1	U(x1)	C1	$u_1 = c_1 \cdot u(x_1)$
Componente 2	X2	U(x2)	C2	$u_2 = c_2 \cdot u(x_2)$
...
Componente k	xk	U(xk)	ck	$u_k = c_k \cdot u(x_k)$
Resultado	$Y=f(x_1, \dots, x_4)$			$u(y) = \sqrt{\sum_i u_i^2}$

En los certificados de calibración, la expresión de incertidumbre debe estar acompañada por una declaración del nivel de confianza de los mismos.

EJEMPLO



Podría indicar: “la incertidumbre de medición expandida informada fue calculada multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cubrimiento $k=2$, lo que corresponde a un nivel aproximado de confianza del 95% bajo distribución normal”.

ACTIVIDAD 8: posta de conceptos

Se propone la siguiente actividad para reforzar la comprensión de conceptos estadísticos útiles en metrología

Anotar en los círculos los números correspondientes a las características del concepto recuadrado

ERROR <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	INCERTIDUMBRE <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
MENSURANDO <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	EXACTITUD <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>
REPETIBILIDAD <input type="radio"/> <input type="radio"/>	REPRODUCTIBILIDAD <input type="radio"/> <input type="radio"/>
GUÍA ISO-GUM <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	

ACTIVIDAD 8: posta de conceptos (Continuación)

1 Tiene posibilidad de corrección.

2 Depende del proceso de medición.

3 Depende de la habilidad del operador.

4 Se especifica mediante el intervalo en que se encuentra el valor real de lo que se mide.

5 Depende de un muestreo adecuado.

6 Es la magnitud particular objeto de una medición.

7 Depende del instrumento de medición.

8 Depende del objeto a medir.

9 Es la diferencia entre un valor verdadero de la magnitud y el valor medido.

10 La falta de ella se origina mediante un error sistemático.

11 Puede obtenerse a partir de una única observación, observaciones reiteradas o de la experiencia.

12 No puede ser demasiado baja ni demasiado alta.

13 Puede estar asociado a patrones de medida calibrados, materiales de referencia certificados.

14 Proximidad entre resultados de mediciones de una misma magnitud, bajo iguales condiciones de medición.

15 Implica una proximidad entre el resultado de la medición y el valor verdadero de lo que se mide.

16 Para que se produzca, se debe emplear el mismo procedimiento, operador e instrumental, entre otros.

ACTIVIDAD 8: posta de conceptos (Continuación)

- 17 Es un concepto determinístico.
- 18 No puede ser demasiado baja ni demasiado alta.
- 19 Es la proximidad entre resultados de mediciones de una misma magnitud, bajo distintas condiciones de medición.
- 20 Presupone el conocimiento de un valor verdadero, nominal o de referencia.
- 21 Para que se dé, se debe cambiar el fundamento de la medición, el patrón de referencia y el operador.
- 22 Aprecia a la incertidumbre como un aspecto positivo.
- 23 Aporta calidad al resultado.
- 24 Considera a todas las magnitudes que pueden influir en el mensurando.

En este punto finaliza la explicación sobre La incertidumbre
¡Felicitaciones! Ha finalizado el curso *Cálculo de incertidumbre y propagación de errores*.



Capítulo 3: Incertidumbre

PLANILLA DE REGISTRO Incertidumbre expandida - Ensayo de dureza Brinell

Material:	Grado del acero:	
Probeta:	ID:	
Ensayo:	ID:	
Penetrador:	Serie N°	
CRM:	Serie N°	
	Escala de dureza	

Información para el cálculo:

	k	2
Factor estadístico 1:	t1	1.14
Factor estadístico 2:	T2	1.31
Factor estadístico 3:	t3	1.84
Mediciones en CRM:	nh	5
Serie de mediciones en CRM	nm	2
	nX	3

Certificado CRM:

XCRM (mm)		UCRM (mm)	
(HBW)		(HBW)	

Resolución de la máquina:

d _{ms} :	
-------------------	--

HBW

Mediciones en el CRM:	
Primera serie de mediciones	
L1	HBW
L2	HBW
L3	HBW
L4	HBW
L5	HBW
Segunda serie de mediciones	
L1	HBW
L2	HBW
L3	HBW
L4	HBW
L5	HBW

Mediciones en probeta	
L1	HBW
L2	HBW
L3	HBW
L4	HBW
L5	HBW

Datos de salida			
Incertidumbre estándar de la dureza del bloque patrón	u_{CRM}	$U_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2}$	(1)
Incertidumbre estándar de la máquina al medir el CRM	$u_{\bar{H}}$	$u_{\bar{H}} = \frac{t_{1 \times S_H}}{\sqrt{n_H}}$	(2)
Incertidumbre estándar de la máquina de dureza al medir la probeta	$u_{\bar{x}}$	$u_{\bar{x}} = \frac{t_{2 \times S_x}}{\sqrt{n_x}}$	(3)
Incertidumbre estándar de la resolución de la máquina	u_{ms}	$u_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}}$	(4)
Incertidumbre estándar del error medio de la desviación de la máquina	u_b	$u_b = \frac{t_b \times S_d}{\sqrt{n_m}}$	(5)
Incertidumbre combinada	u_i	$u_i = \sqrt{u_{CRM}^2 + u_{\bar{H}}^2 + u_{\bar{x}}^2 + u_{ms}^2 + u_b^2}$	(6)
Incertidumbre expandida	u_{corr}	$u_{corr} = k \times u_k$	(7)

Informe final	
Error de desviación de la máquina	$\bar{b} =$
Incertidumbre expandida	$u_{corr} =$
Dureza media de la probeta	$\bar{x} =$