

**Curso práctico en
cálculo de
incertidumbres**

**De la calibración
al ensayo**

Caltex Sistemas S.L.
www.caltex.es

Enero 2025

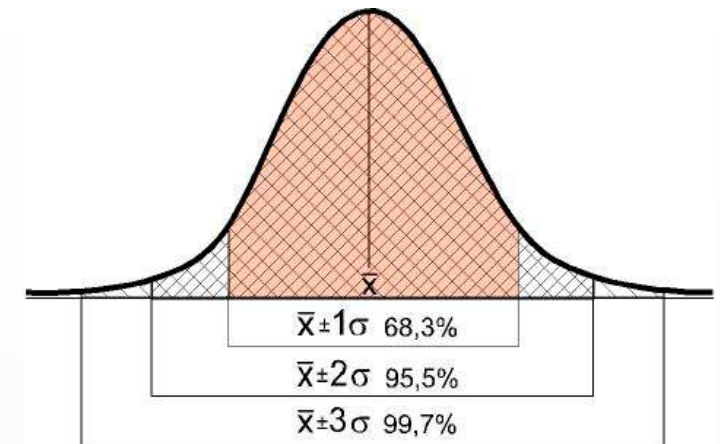
Nombre PABLO JIMÉNEZ

Cargo Coordinador de operaciones

E-mail pablo.jimenez@caltex.es

ÍNDICE DE CONTENIDOS

- La metrología en los laboratorios de ensayo
 - Introducción
 - Sistema Internacional de Unidades
- Conceptos de estadística
 - Distribuciones de probabilidad
- Cuantificación de la incertidumbre de medida en ensayos
 - El proceso de medida
 - Cuantificación de la incertidumbre
 - Calibración. Incertidumbre de calibración
 - Incertidumbre de uso
 - Incertidumbre de ensayo
- Evaluación de la conformidad. Equipos de medida y resultados de ensayo
 - Conformidad metrológica
 - Tolerancia y su verificación



**Curso práctico en
cálculo de
incertidumbres**

**LA METROLOGÍA EN LOS
LABORATORIOS DE ENSAYO**

INTRODUCCIÓN

1. METROLOGÍA

La Metrología es la ciencia que tiene por objeto el estudio de las propiedades medibles, las escalas de medida, los sistemas de unidades, los métodos y técnicas de medición, así como la evolución de lo anterior, la valoración de la calidad de las mediciones y su mejora constante, facilitando el progreso científico, el desarrollo tecnológico, el bienestar social y la calidad de vida.

Cubre tres actividades principales:

1. La definición de las unidades de medida internacionalmente aceptadas.
2. La realización de las unidades de medida por métodos científicos.
3. El establecimiento de las cadenas de trazabilidad, determinando y documentando el valor y exactitud de una medición y diseminando dicho conocimiento.

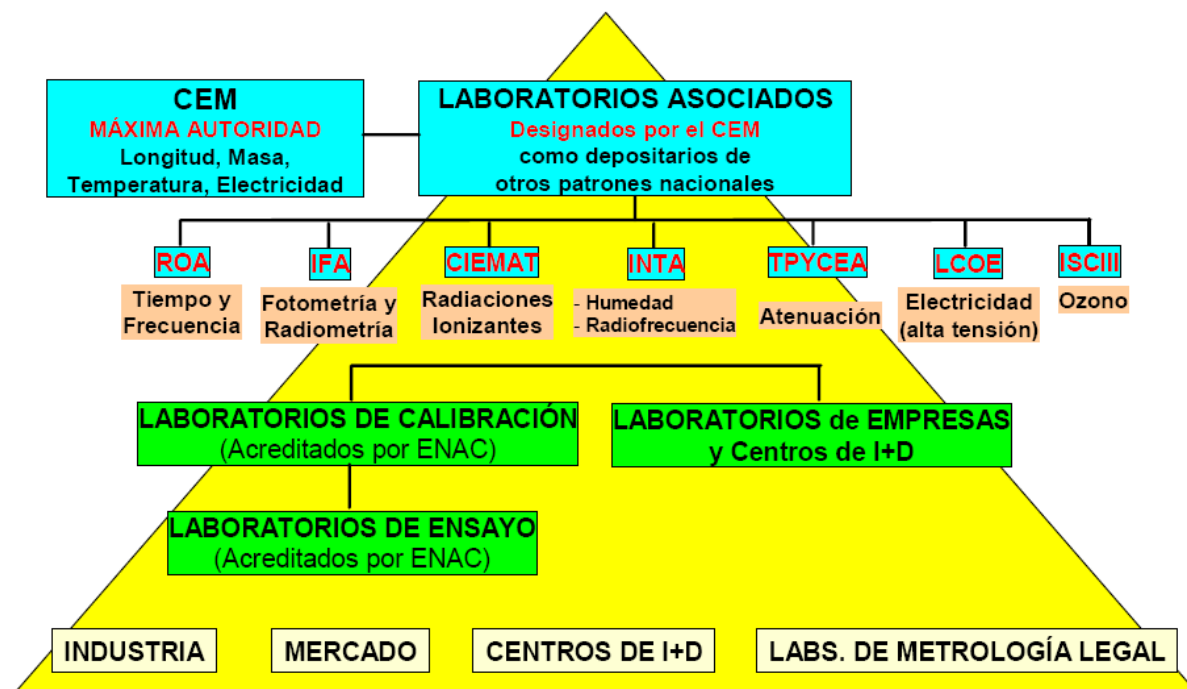
INTRODUCCIÓN

Dividida en tres categorías

1. **Metrología científica:** se ocupa de la organización y el desarrollo de los patrones de medida y de su mantenimiento (el nivel más alto).
2. **Metrología industrial:** asegura el adecuado funcionamiento de los instrumentos de medida empleados en la industria y en los procesos de producción y verificación
3. **Metrología legal:** se ocupa de aquellas mediciones que influyen sobre la transparencia de las transacciones comerciales, la salud y la seguridad de los ciudadanos.

INTRODUCCIÓN

Organización nacional de la Metrología



INTRODUCCIÓN

Organización internacional de la Metrología



INTRODUCCIÓN

Enlaces de interés



INTRODUCCIÓN

EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

En 1960 en la 11ª CGPM se definen las siete unidades básicas que forman el SI

Kilogramo (kg). Masa del prototipo internacional del kilogramo conservado en el BIPM.

Metro (m). Longitud recorrida por la luz en el vacío durante $1/299\,792\,458$ s.

Segundo (s). Duración de $9\,192\,631\,770$ periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cs 133.

Amperio (A). Intensidad de una corriente eléctrica constante que, mantenida en dos conductores paralelos rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y colocados en el vacío a una distancia de un metro uno de otro, produce sobre estos dos conductores una fuerza igual a $2 \cdot 10^{-7}$ newtons por metro de longitud.

Kelvin (K). Fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

Mol (mol). Cantidad de sustancia o de materia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en $0,012$ kg de carbono 12.

Candela (Cd). Intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ Hz y cuya intensidad energética en esta dirección es de $1/683$ W/sr.

Sistema Internacional de unidades revisado

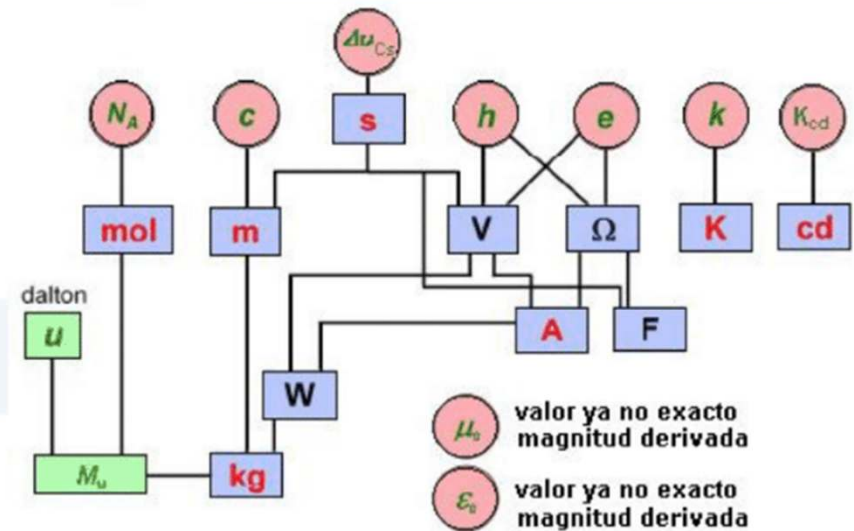
Basado en los valores de 7 constantes universales

(en vigor desde el 20 de mayo de 2019)

Un SI para el siglo XXI



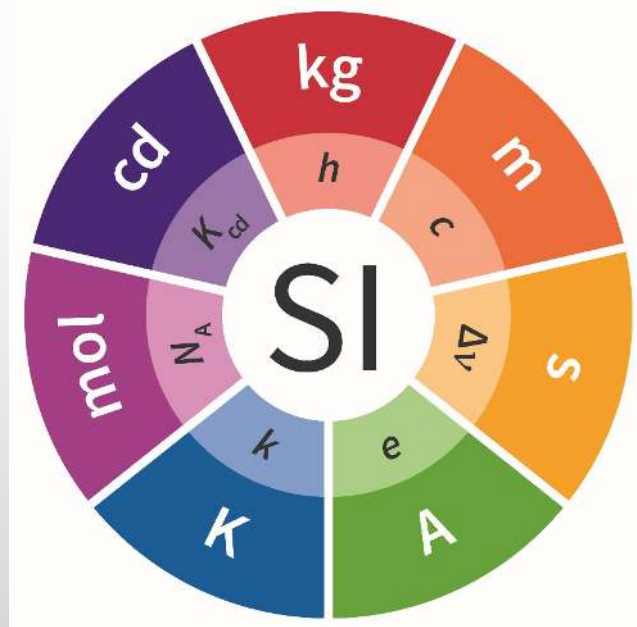
Referencias más universales y estables, que permiten mayor número de realizaciones prácticas, con menor incertidumbre, para que el SI siga respondiendo a las necesidades de la ciencia, la tecnología y el comercio en el siglo XXI, aunque manteniendo la continuidad histórica.



[Adaptado de B. M. Wood (NRC), Fundamental Constants - The Ultimate Metric, 978-1-4673-0442-9/12 ©2012 IEEE]

INTRODUCCIÓN

En noviembre de 2018, en la 26ª CGPM se aprobaron las nuevas definiciones de KILOGRAMO, KELVIN, AMPERIO y MOL. Se hizo efectivo en mayo de 2019



ALL CHANGE

Under the revised SI system, every unit will be defined in relation to a constant, whose value will become fixed. Many of the units will be defined in relation to each other: for example, definition of the kilogram requires Planck's constant, and definitions of the second and metre.

→ Dependency

SECOND (s)

Measures: Time
Requires: Hyperfine-transition frequency of the caesium-133 atom
Definition: Duration of 9,192,631,770 cycles of the radiation corresponding to the transition between two hyperfine levels of caesium-133

KILOGRAM (kg)

Measures: Mass
Requires: Planck's constant
Definition: One kilogram is Planck's constant divided by $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{s}$

METRE (m)

Measures: Length
Requires: Speed of light
Definition: Length of the path travelled by light in a vacuum in $1/299,792,458$ seconds

AMPERE (A)

Measures: Current
Requires: Charge on the electron
Definition: Electric current corresponding to the flow of $1/(1.602\,176\,634 \times 10^{-19})$ elementary charges per second

MOLE (mol)

Measures: Amount of substance
Requires: Avogadro's constant
Definition: Amount of substance of a system that contains $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ specified elementary entities

KELVIN (K)

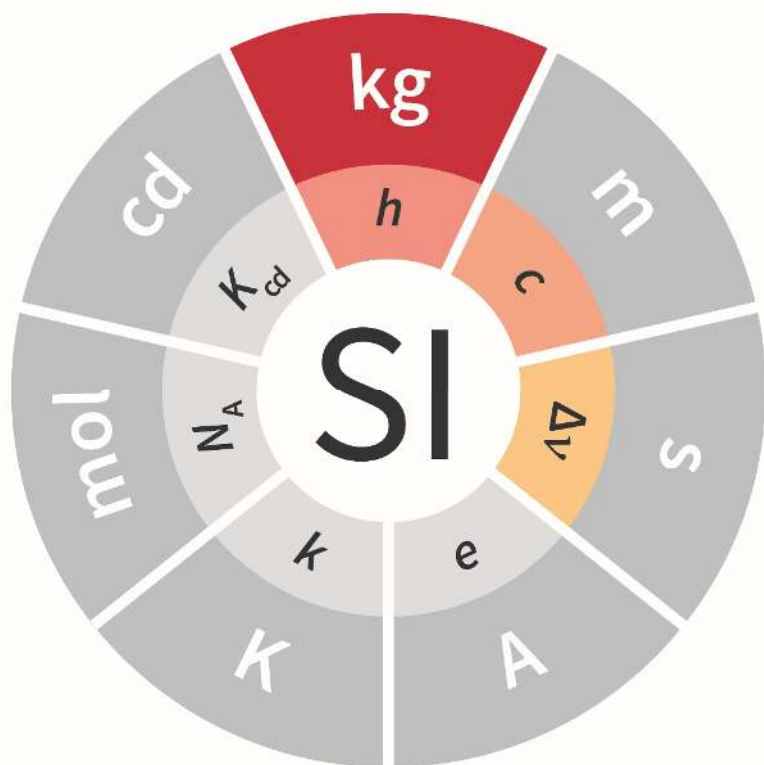
Measures: Temperature
Requires: Boltzmann's constant
Definition: Equal to a change in thermal energy of $1.380\,649 \times 10^{-23}$ joules

CANDELA (cd)

Measures: Luminous intensity
Requires: Luminous efficacy of monochromatic light of frequency $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$
Definition: Luminous intensity of a light source with frequency $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ and a radiant intensity of $1/683$ watts per steradian

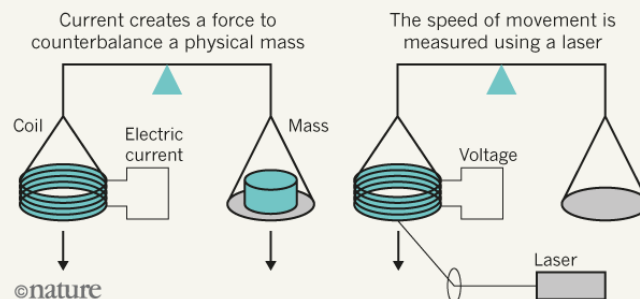
©nature

INTRODUCCIÓN



KILOGRAM: THE WATT BALANCE

The Watt balance compares mechanical power with electromagnetic power using two separate experiments. First, a current is run through a coil in a magnetic field to create a force that counterbalances a known physical mass. Then, the coil is moved through the field to create a voltage. By measuring the speed as well as experimental values that relate the voltage and current to Planck's constant, scientists can precisely determine the weight of a mass in kilograms.



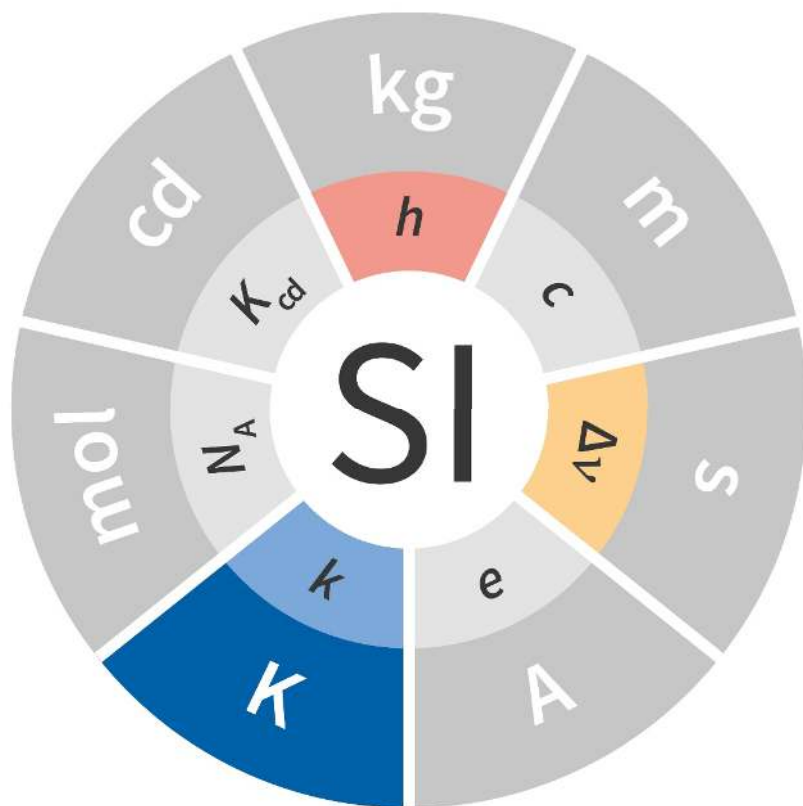
masa

kg

La nueva definición del kilogramo, basada en la constante de Planck h , invariante de la naturaleza, asegura la estabilidad a largo plazo de la unidad SI de masa (y otras unidades mecánicas del SI), permitiendo su realización en cualquier instante y lugar

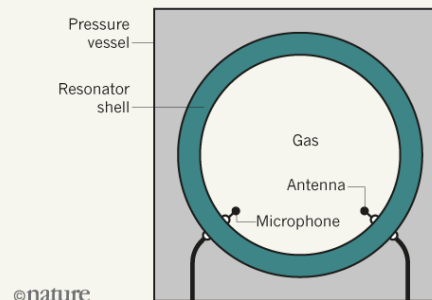
$$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

INTRODUCCIÓN



KELVIN: ACOUSTIC THERMOMETRY

This technique could be used to derive precise temperature measurements. The speed of sound in a gas-filled sphere (which is proportional to the average speed of the atoms in it) can be determined at a fixed temperature, by analysing the frequency of sound waves that resonate within in it and measuring the sphere's volume.



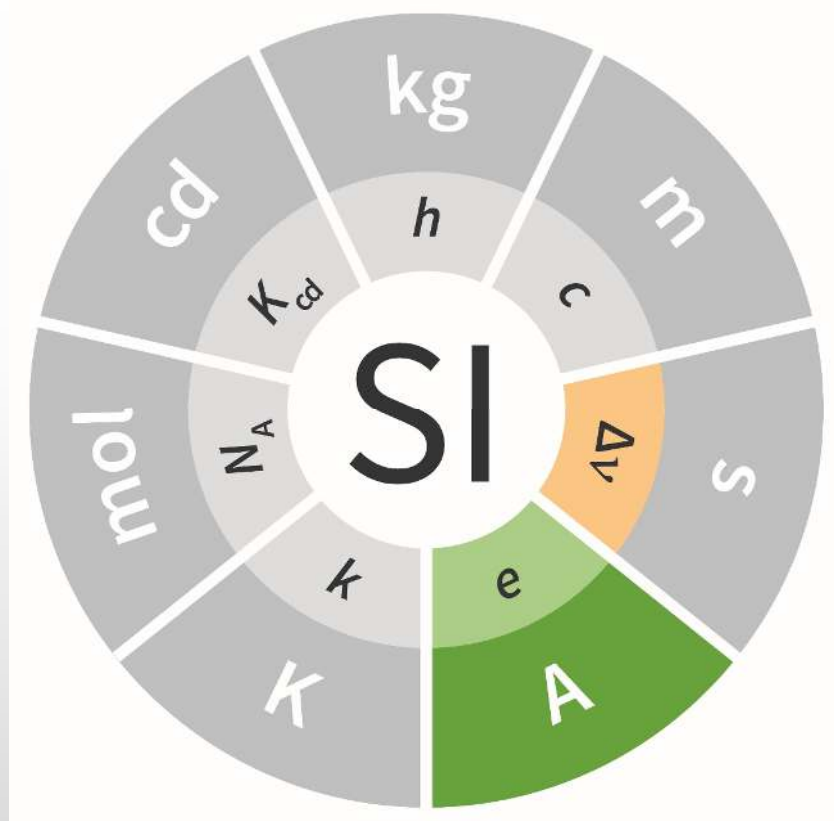
temperatura termodinámica

K

La redefinición del kelvin respecto a un valor numérico exacto de la constante de Boltzmann k , invariante de la naturaleza, mejora la actual definición, basada en el punto triple del agua, dependiente en la práctica de su pureza y composición isotópica.

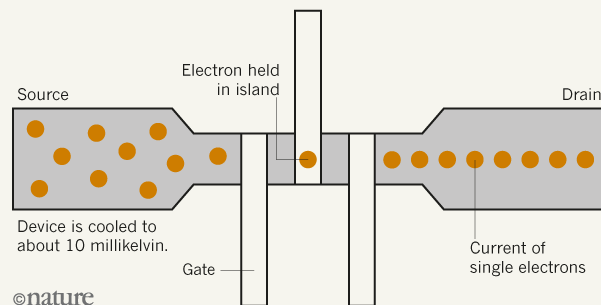
$$k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

INTRODUCCIÓN



AMPERE: THE SINGLE-ELECTRON PUMP

Used to measure the charge of an electron, an electron pump could become one tool for determining the ampere. By trapping individual electrons as they travel rapidly across a conductor, the pump can generate a measureable current by counting single electrons.



corriente eléctrica

A

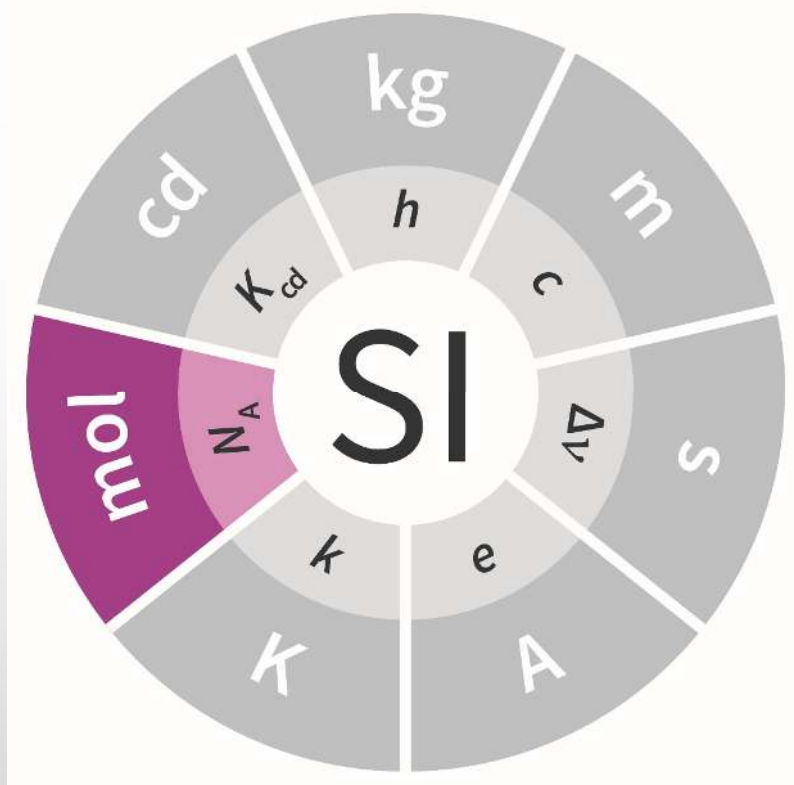
La redefinición del kilogr[Sin título]

partir de h , y del amperio a partir de la carga elemental e , reduce las incertidumbres de todas las unidades SI eléctricas.

Las constantes de Josephson ($K_J = 2e/h$) y de Von Klitzing ($R_K = h/e^2$) tiene valores exactos en el SI.

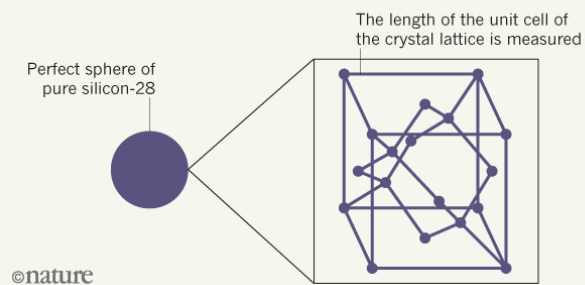
$$e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$$

INTRODUCCIÓN



MOLE: THE SILICON SPHERE

As the device that gives scientists Avogadro's constant, this silicon sphere offers a state-of-the-art way to measure a mole. It would determine the precise number of atoms in a perfect sphere of pure silicon-28. Researchers do this by using lasers to measure the length of a unit of the sphere's crystal lattice, and its mean diameter.



cantidad de sustancia

mol

La redefinición del mol respecto a un valor numérico exacto de la constante de Avogadro N_A , lo libera de su dependencia del kilogramo y enfatiza la distinción entre "cantidad de sustancia" y "masa".

$$N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

INTRODUCCIÓN

Permanecen

longitud

m

La definición del metro continua ligada al valor numérico exacto de la velocidad de la luz en el vacío c

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

tiempo

s

La definición del segundo continua ligada al valor numérico de la frecuencia de la transición entre los niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133.

$$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$$

intensidad luminosa

cd

La definición de la candela continua ligada al valor numérico de la eficacia luminosa K_{cd} de la radiación monocromática de $f = 540 \times 10^{12} \text{ Hz}$

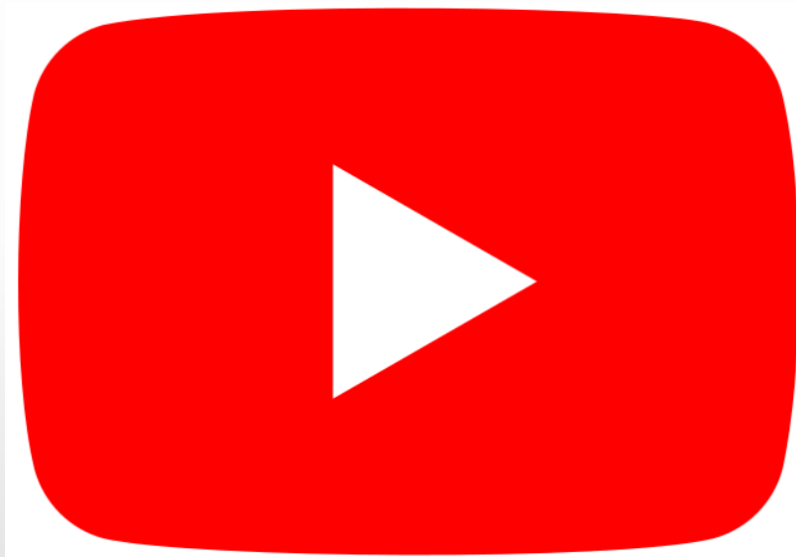
$$K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm/W}$$

El nuevo SI no supone cambio alguno en nuestra vida diaria, solo en las mediciones de gran exactitud y baja incertidumbre de los centros de metrología

Los libros de texto deben adaptarse al SI revisado, para la correcta formación de profesores y alumnos

VÍDEO

La redefinición de las Unidades del Sistema Internacional (CEM)



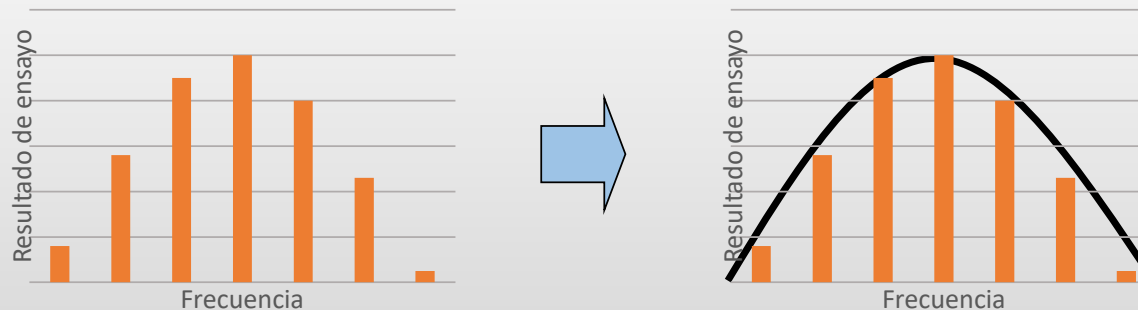
**Curso práctico en
cálculo de
incertidumbres**

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Con frecuencia los datos de un experimento pueden representarse en forma de histograma, representándolos en el eje de abscisas y, en el de ordenadas, el número de veces que se repite dicho valor. Idealmente, si el número de datos fuera infinito, la envolvente de dicha distribución tendría una forma característica dependiente de la naturaleza aleatoria del suceso bajo experimentación dando lugar así a diferentes distribuciones de probabilidad.



CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

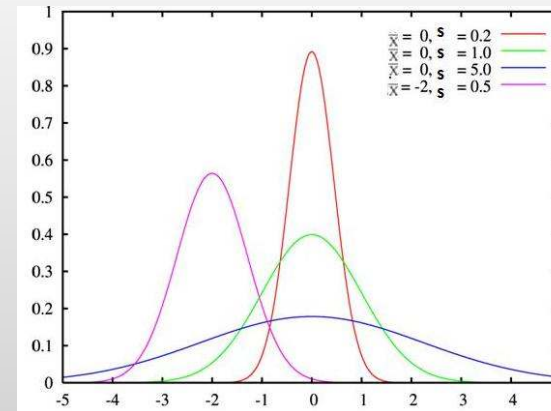
➤ DISTRIBUCIÓN NORMAL O DE GAUSS

Entre las distribuciones probabilísticas de variable continua, la más ampliamente utilizada es la llamada distribución normal, cuya representación gráfica tiene una forma muy conocida en el ámbito de la Estadística y las ciencias naturales: la campana de Gauss

Concepto y función de probabilidad

Dado un experimento de variable aleatoria continua X , se llama distribución normal a aquella que queda perfectamente descrita por su media aritmética \bar{X} y su desviación típica, s .

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s^2}}$$



CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN NORMAL O DE GAUSS

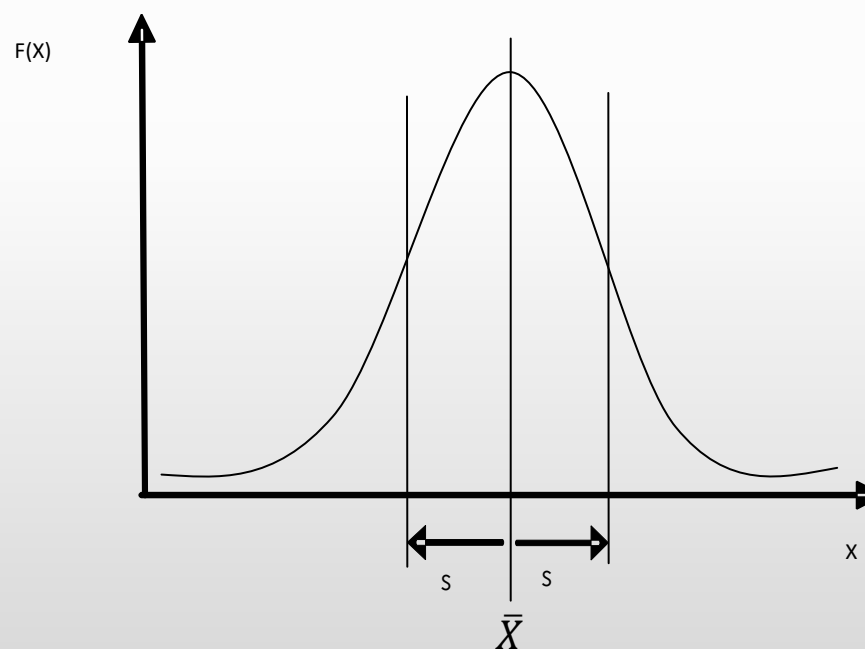
Propiedades de la campana de Gauss:

- i) Se define unívocamente mediante los parámetros \bar{X} y s .
- ii) La media indica la posición de la distribución respecto al eje X (que es asintótico) y la desviación estándar s determina la forma de la curva (cuanto mayor sea s , más achatada será la curva).
- iii) Es simétrica respecto a la recta $x = \bar{X}$.
- iv) Presenta puntos de inflexión en las abscisas $\bar{X} - s$ y $\bar{X} + s$, donde se modifica la concavidad de la curva.
- v) En los valores de la variable estadística que tienden a $-\infty$ y $+\infty$ la función tiende a cero.
- vi) Del total del área comprendida bajo la curva, los siguientes porcentajes están comprendidos entre los límites siguientes:

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN NORMAL O DE GAUSS

Porcentaje del área total	Intervalo
68,27	$\pm 1,00 s$
90,00	$\pm 1,64 s$
95,00	$\pm 1,96 s$
95,45	$\pm 2,00 s$
99,00	$\pm 2,58 s$
99,73	$\pm 3,00 s$
99,90	$\pm 3,29 s$



CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN NORMAL O DE GAUSS

Media aritmética:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum^n x_i}{n}$$

Desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_i - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Contribución a la incertidumbre: $u = \frac{s}{\sqrt{n}}$

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

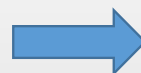
➤ DISTRIBUCIÓN t STUDENT

Distribución de probabilidad que surge del problema de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño.

✓ Grados de libertad

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

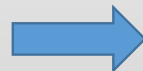
$$x_1 - \bar{x}, x_2 - \bar{x}, \dots, x_n - \bar{x}$$
$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0$$



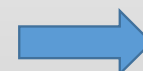
Especificar los valores de cualquier n-1 de las cantidades, determina el valor restante

Ejemplo:

$$n=4 \text{ y } x_1 - \bar{x} = 4; x_2 - \bar{x} = 2; x_3 - \bar{x} = -1$$



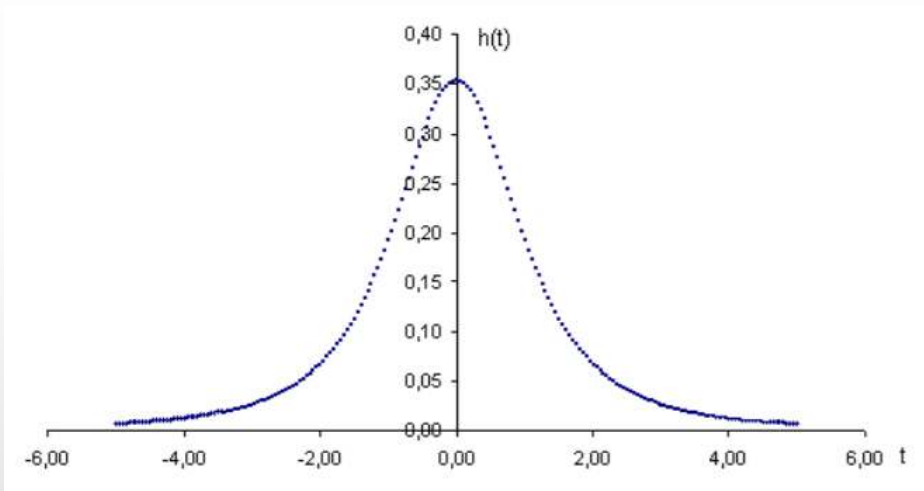
$$x_4 - \bar{x} = -5$$



Muestra con n elementos
tiene n-1 grados de libertad

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN t STUDENT

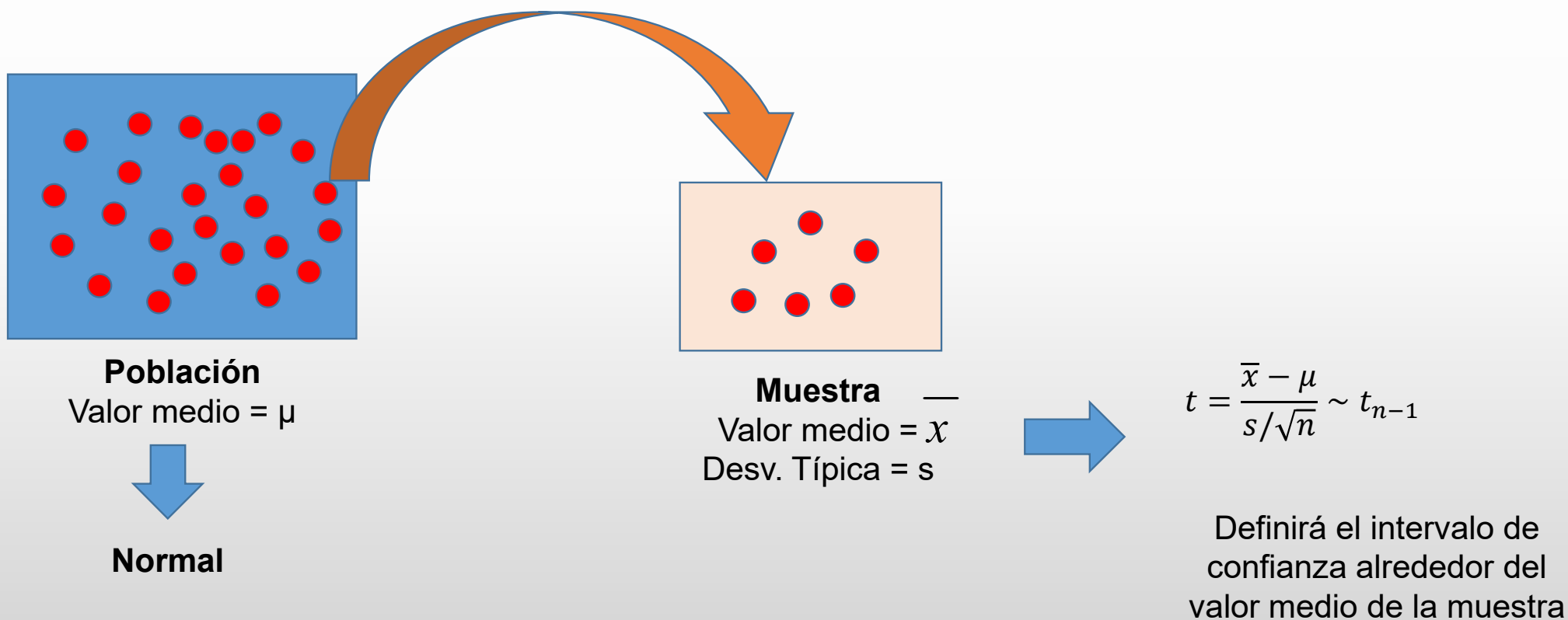


Propiedades de la t student

- ✓ Definida por t_v siendo $v=n-1$, los grados de libertad
- ✓ Muy similar a la normal pero mas ancha para un v pequeño
- ✓ Simétrica respecto a 0 (media=0)
- ✓ Cuando $v \rightarrow \infty$, t tiende a la normal estándar

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN t STUDENT vs NORMAL



CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN t STUDENT vs NORMAL

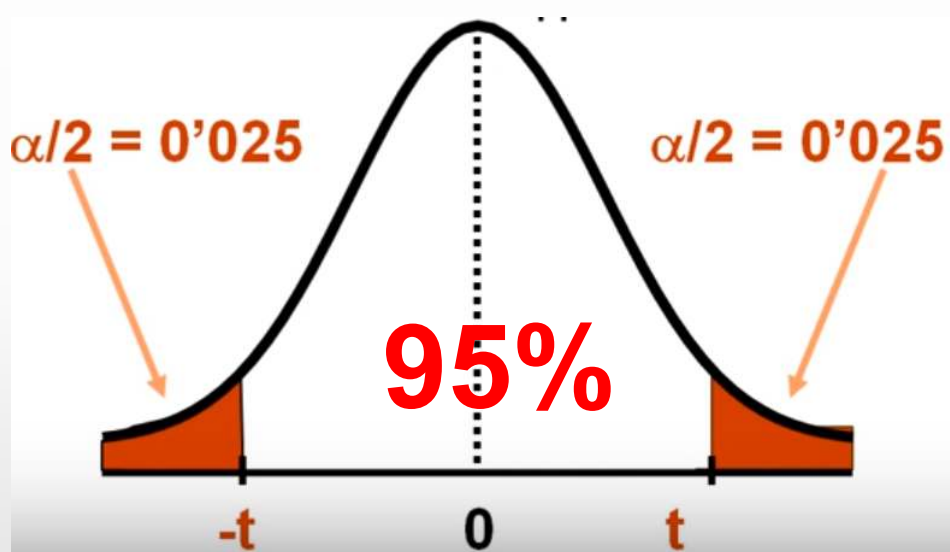
$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \mu = \bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Cuanto mayor sea el número de muestras (n), más se asemejará la media de la muestra a la media de la población (distribución normal).

En caso de tener pocas muestras, habrá que determinar el valor de t para asegurar un intervalo de confianza aceptable (95%).

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN t STUDENT



$$P(t_v > t) = \alpha / 2$$

Valores tabulados

Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693

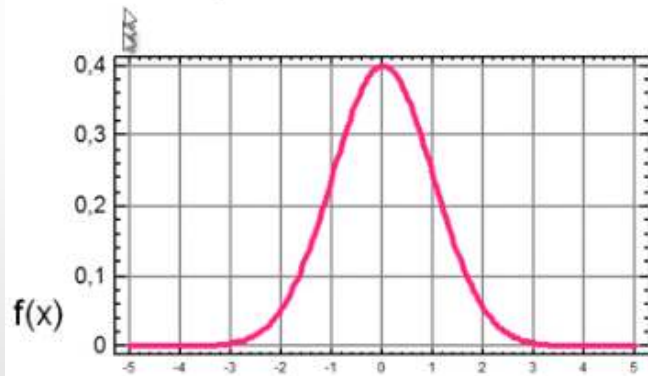
StatKey

Porcentaje del área total $\rightarrow \pm t \cdot s$

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

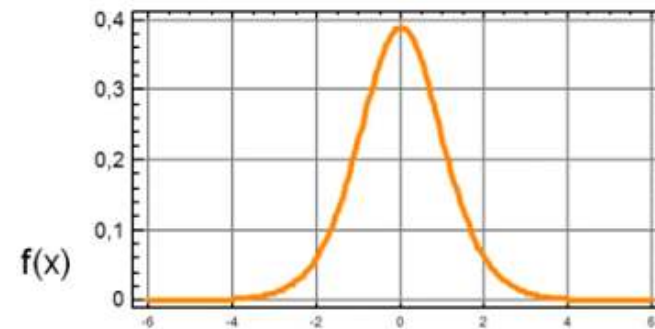
➤ DISTRIBUCIÓN t STUDENT vs NORMAL

$$\frac{\bar{X} - m}{\sigma / \sqrt{N}} \sim \text{N}(0,1)$$



Y

$$\frac{\bar{X} - m}{s / \sqrt{N}} \sim t_{N-1}$$



σ = desv. Típica de la población (teórica)

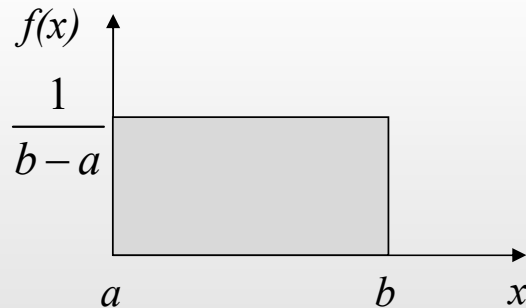
s = desv. Típica de la muestra (estimación de la desv. Típica de la población)

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN RECTANGULAR

Concepto y función de probabilidad

En la **distribución rectangular** (también llamada distribución cuadrada o uniforme) todos los valores posibles dentro del intervalo $[a, b]$ son equiprobables.



$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} ; a \leq x \leq b \\ 0 ; \text{resto intervalo} \end{cases}$$

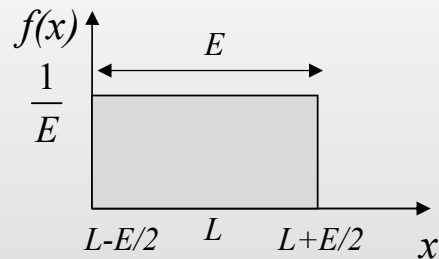
Media: $\bar{x} = \frac{(b+a)}{2}$ Desviación típica: $s = \frac{(b-a)}{2\sqrt{3}}$ Contribución a la incertidumbre: $u = \frac{(b-a)}{2\sqrt{3}}$

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN RECTANGULAR

Ejemplo:

Un ejemplo muy común de este tipo de distribución es la división de escala de un dispositivo de medida. En efecto, supongamos un equipo cuya división de escala es E ; cualquier lectura, L , mostrada externamente a través del indicador estará internamente (a nivel de señal electrónica) comprendida entre los extremos del intervalo $[L-E/2, L+E/2]$ y no hay razón para suponer que algún punto del intervalo sea más probable que otro. Su distribución de probabilidad será uniforme en todo el intervalo:



Valor medio: L

Semi-intervalo: $E/2$

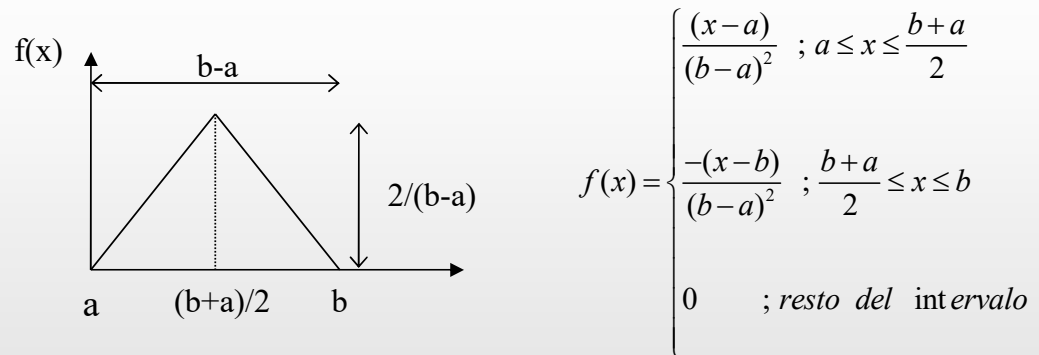
Contribución a la incertidumbre: $\frac{E/2}{\sqrt{3}}$

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

➤ DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR

Concepto y función de probabilidad

En la **distribución triangular** los valores centrales son más probables que los valores de los extremos del intervalo.



Media: $\bar{x} = \frac{(b+a)}{2}$

Desviación típica: $s = \frac{(b-a)}{2\sqrt{6}}$

Contribución a la incertidumbre: $u = \frac{(b-a)}{2\sqrt{6}}$

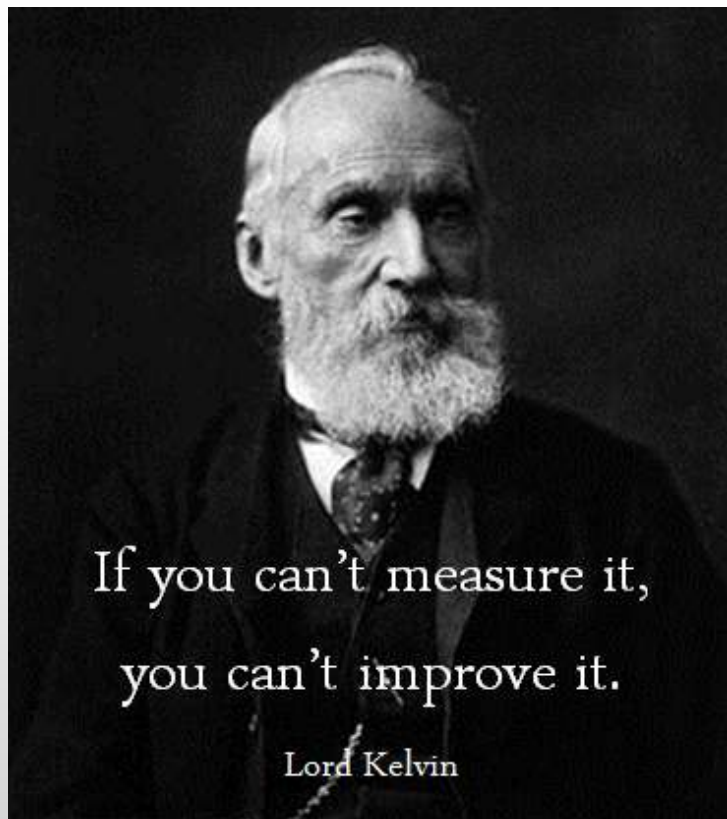
Un ejemplo común se da en un sala acondicionada térmicamente que dispone de una regulación de temperatura. Los valores de temperatura de la sala tienden a estar cerca del valor consignado (valor central) y es menos probable encontrarla en valores alejados de ella.

**Curso práctico en
cálculo de
incertidumbres**

**CUANTIFICACIÓN DE LA
INCERTIDUMBRE DE MEDIDA
EN ENSAYOS**

EL PROCESO DE MEDIDA

➤ LA MEDIDA



- ✓ Si no se puede medir algo, no se puede entender.
- ✓ Si no se puede entender, no se lo puede controlar.
- ✓ Si no se lo puede controlar, es imposible mejorarlo.
- ✓ No hay calidad sin control.
- ✓ No hay control sin mediciones confiables y uniformes.
- ✓ Y no existen mediciones confiables y uniformes sin la Metrología

EL PROCESO DE MEDIDA

➤ LA MEDIDA

La **medida** es un proceso de obtención experimental de uno o más valores de una magnitud dada que pueden ser razonablemente atribuidos a dicha magnitud.

(Vocabulario Internacional de Metrología, VIM 2.1.)

Medir es comparar la cantidad de magnitud a medir (mensurando), con otra cantidad de referencia de la misma clase que se adopta como unidad, siguiendo alguno de los siguientes procesos:



EL PROCESO DE MEDIDA

➤ LA MEDIDA

Método de medida diferencial o por comparación: intervienen directamente en el proceso patrones o materiales de referencia que proporcionan valores de la magnitud (medida materializada), empleando para ello un instrumento comparador.

Método de medida absoluta o directa: se aplica exclusivamente un instrumento de medida sobre el mensurando. Esta opción no es sustancialmente distinta de la primera. En efecto, aunque en este caso la comparación se realiza contra la escala del instrumento, tuvieron que utilizarse patrones o materiales de referencia para establecerla inicialmente en el instrumento y también se emplean patrones o materiales de referencia para comprobarla periódicamente (calibración).



EL PROCESO DE MEDIDA

➤ EXPRESIÓN DEL RESULTADO DE LA MEDIDA

El **resultado de una medida** es el valor atribuido a un mensurando, obtenido por medición. La expresión completa del resultado de una medición incluye información sobre la incertidumbre de medida.

(VIM 3.1.)

Medidas en condiciones de repetibilidad



Resultado de la medida: muestra de la población de una distribución estadística (generalmente normal)



$$\bar{x} \pm s$$

Solo válido para la muestra

Expresión adecuada para la población

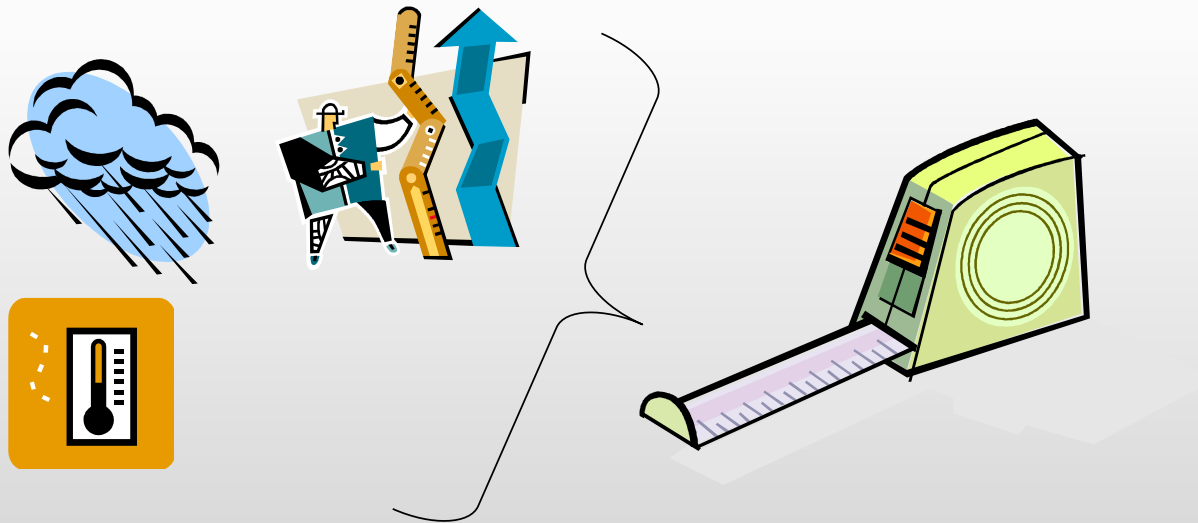


$$\bar{x} \pm \frac{s}{\sqrt{n}}$$

EL PROCESO DE MEDIDA

➤ EXPRESIÓN DEL RESULTADO DE LA MEDIDA

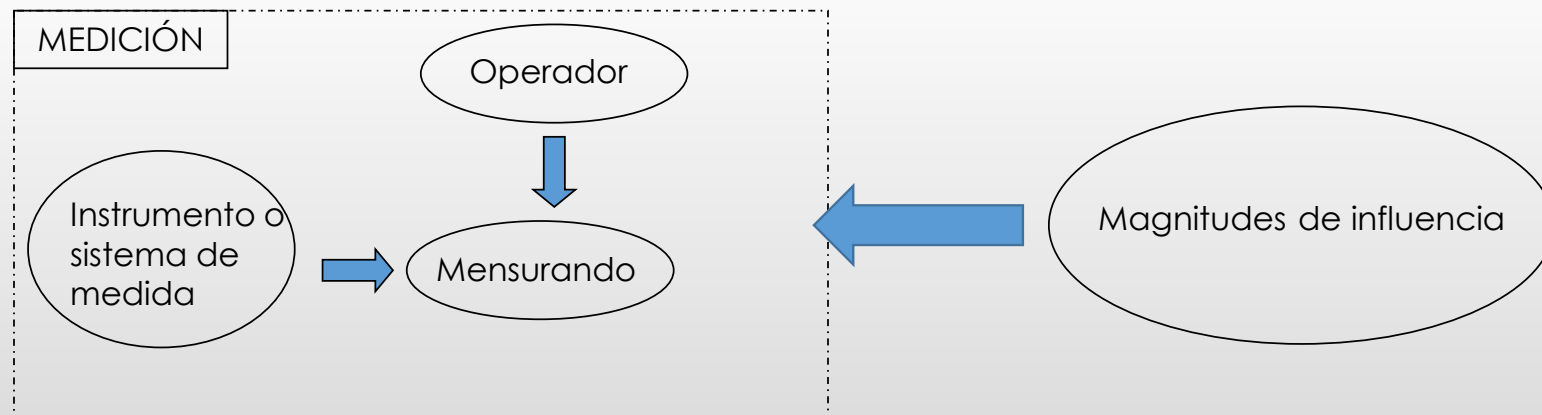
Este supuesto es meramente teórico puesto que las condiciones de repetibilidad siempre se encuentran moduladas por ciertas influencias externas que, inevitablemente, afectan al proceso de medida. Son las llamadas **MAGNITUDES DE INFLUENCIA**



EL PROCESO DE MEDIDA

➤ MAGNITUDES DE INFLUENCIA

Magnitud que no es el mensurando pero que tiene un efecto sobre el resultado de la medición
(VIM, 2.7)



EL PROCESO DE MEDIDA

➤ MAGNITUDES DE INFLUENCIA

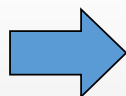
EJEMPLOS

- ✓ Efecto de la temperatura sobre las mediciones efectuadas con un micrómetro.
- ✓ Presión y humedad reinantes en un recinto donde se están efectuando mediciones de distancias mediante un sistema interferométrico láser.
- ✓ Las densidades de las masas que se comparan en una balanza, debido al empuje que estas experimentan en el aire según el principio de Arquímedes (efectos de convección).

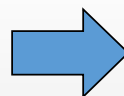
EL PROCESO DE MEDIDA

➤ MAGNITUDES DE INFLUENCIA

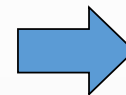
Si no es posible
controlar las
magnitudes de
influencia



Modificar valores
indicados

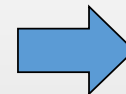


Leyes
empíricas o
matemáticas



Ley dilatación
lineal en medidas
dimensionales

Nuevas
mediciones



Medida de la
temperatura para
controlar el
efecto de la
convección en
pesaje

EL PROCESO DE MEDIDA

➤ MAGNITUDES DE INFLUENCIA

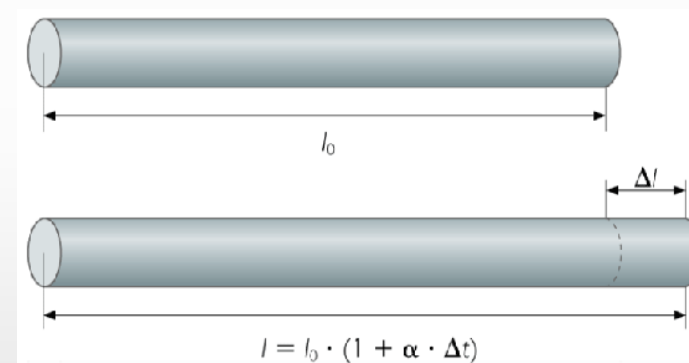
EJEMPLO

Longitud varilla de acero en un ambiente de $20 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ΔL debidas a ΔT ➡ $\pm 0,05 \text{ mm}$

Resultado en el orden de 1 mm ➡ No significativa

Resultado en el orden de $0,01 \text{ mm}$ ➡ Significativa



Solo deben considerarse aquellas realmente significativas, según el grado de exactitud requerido.

EL PROCESO DE MEDIDA

➤ MAGNITUDES DE INFLUENCIA

EJEMPLO

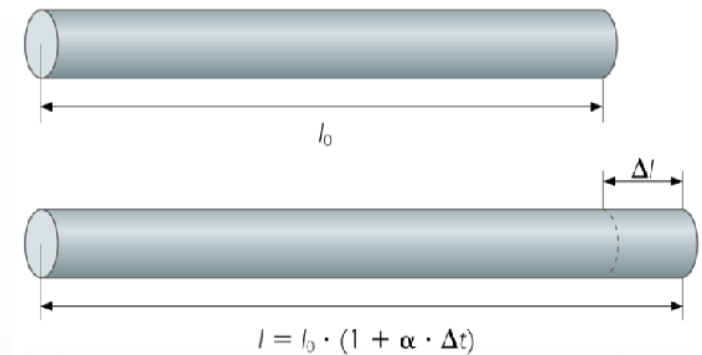
Si se mide la longitud de una barra de acero a la temperatura de θ °C, distinta de la de referencia, 20°C, cabría corregir las indicaciones mediante la ley de dilatación lineal

$$L'_{20} = L'_{\theta} [1 + \alpha(20 - \theta)]$$

donde L'_{20} es la lectura que cabría esperar si la temperatura fuera de 20°C, L'_{θ} es la lectura obtenida a la temperatura θ y α es el coeficiente de dilatación lineal del acero.

La modificación de las lecturas supone la toma en consideración de medidas de otras magnitudes (medidas adicionales)

- Medida de la temperatura de la barra
- Coeficiente de dilatación del acero (bibliografía)



EL PROCESO DE MEDIDA

➤ SIGNIFICADO FÍSICO DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

En todo proceso de medida es conveniente hacer un estudio previo de las magnitudes de influencia presentes y acotarlas en la medida de lo posible. Cuanto más las acotemos mayor será nuestra confianza en la medida realizada, es decir, menor nuestro desconocimiento de la magnitud o, dicho de otro modo, menor la **incertidumbre** de la medida.

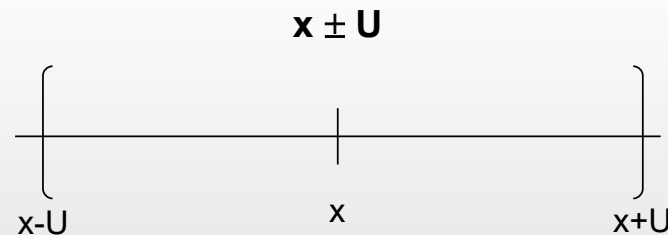
“...La evaluación de la incertidumbre no es una tarea rutinaria ni puramente matemática; depende del conocimiento detallado de la naturaleza del mensurando y de la medida...”

GUM 3.4.8

EL PROCESO DE MEDIDA

➤ SIGNIFICADO FÍSICO DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

La **incertidumbre de medida** (U) es el valor de la semiamplitud de un intervalo alrededor del valor resultante de la medida (valor convencionalmente verdadero). Dicho valor representa una estimación adecuada de una zona de valores entre los cuales es “casi seguro” que se encuentre el valor verdadero del mensurando.



La **incertidumbre de medida** es un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando (VIM 3.9.)

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ FUNCIÓN MODELO

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

Y: mensurando o magnitud de salida

X_i: magnitudes de entrada

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

Resultado de la medida: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

y: estimación de salida, resultado de la medición

x_i: estimación de entrada, con una incertidumbre típica asociada u(x_i)

Para obtener u(y) deberemos conocer los valores estimados de entrada, x_i, así como sus incertidumbres, u(x_i) y relacionarlos mediante la *ley de propagación de las varianzas*

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ EVALUACIÓN TIPO A DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA

Podrá aplicarse la evaluación Tipo A cuando se disponga de un conjunto de medidas independientes obtenidas en condiciones de repetibilidad, es decir, cuando la estimación \bar{x} de la magnitud de entrada X se ha obtenido a partir de observaciones repetidas.

Mejor estimación:
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

La **incertidumbre** asociada a este valor se evalúa como:

$$u(x) = s(\bar{X}) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}} \quad ; \text{ siendo } s(X) \text{ la desviación típica experimental}$$

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ EVALUACIÓN TIPO B DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA

La evaluación Tipo B de la incertidumbre típica es la evaluación de la incertidumbre asociada a un valor estimado x de una magnitud de entrada X por otros medios distintos al análisis estadístico de una serie de observaciones.

La información utilizable para una evaluación Tipo B puede proceder de muy diversas fuentes, por ejemplo:

- Datos de certificados de calibración
- Valores adoptados de manuales técnicos o tablas
- Datos obtenidos de mediciones anteriores
- Especificaciones de los fabricantes
- Experiencia o conocimientos generales sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos relevantes

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ EVALUACIÓN TIPO B DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA

Podemos encontrar los siguientes casos:

- **Se conoce un único valor de la magnitud de entrada X .**
 - Sólo se ha podido medir una vez
 - Resultado obtenido de documentación técnica
 - Valor obtenido de un certificado de calibración

Este valor debe utilizarse como valor del mensurando y como incertidumbre típica la facilitada por esas mismas fuentes.

- **Se supone una distribución de probabilidad para la magnitud de entrada X .**

Cuando pueda suponerse una distribución de probabilidad para la magnitud de entrada, ya sea basándose en la teoría o en la experiencia, se adoptará como valor del mensurando la media de dicha distribución y como incertidumbre típica asociada se tomará la desviación típica de su población.

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ EVALUACIÓN TIPO B DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA

En ocasiones sólo se conocen los **límites inferior y superior (a,b)** de la magnitud X (por ejemplo, especificaciones del fabricante, intervalo de temperaturas, redondeo de las indicaciones de un instrumento digital, etc.), puede suponerse en estos casos una distribución de probabilidad conocida.

Por ejemplo, si es razonable asignar una distribución de probabilidad constante entre dichos límites (**distribución de probabilidad rectangular**), resultaría:

Valor medio: $\bar{x} = \frac{1}{2}(b + a)$

Incertidumbre típica: $u(x) = \frac{(b - a)}{2\sqrt{3}}$

Si los valores centrales son más probables que los valores de los extremos del intervalo, es más lógico asignar una **distribución triangular**

Valor medio: $\bar{x} = \frac{1}{2}(b + a)$

Incertidumbre típica: $u(x) = \frac{(b - a)}{2\sqrt{6}}$

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ INCERTIDUMBRE TÍPICA RESULTANTE: LEY DE PROPAGACIÓN DE VARIANZAS

Si ya se tienen claras las magnitudes de entrada, se han evaluado como contribuciones tipo A o B y se sabe que son independientes, podemos reunir las mediante la **ley de propagación de las varianzas** para obtener la incertidumbre típica resultante:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

Magnitudes de entrada **no correlacionadas**

Magnitudes de entrada **correlacionadas**

$$u(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)$$

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ INCERTIDUMBRE TÍPICA RESULTANTE: LEY DE PROPAGACIÓN DE VARIANZAS

Considerando variables de entrada **INDEPENDIENTES** (NO CORRELACIONADAS)

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

La incertidumbre típica se deberá multiplicar por un **factor de cobertura**, k

$$U = k \cdot u(y)$$

Dos casos

Mensurando sigue una **distribución normal** (gaussiana) y la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida tiene la **suficiente fiabilidad**: k=2

la incertidumbre expandida asociada corresponde a una probabilidad de cobertura de, aproximadamente, un 95%.

No se cumplen condiciones de normalidad o fiabilidad suficiente (pocas medidas)

Calcular k para seguir garantizando el 95% de probabilidad

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{m=1}^M \frac{u_m^4(y)}{v_m}}$$

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

➤ ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

1. Identificar la **variable de salida**, Y , de la cual queremos conocer:
 - su valor, y ,
 - su incertidumbre típica, $u(y)$
2. Identificar las **variables de entrada**, X_i , que pueden ser:
 - magnitudes medibles
 - magnitudes de influencia
3. Identificar la **función modelo**, f . (Relación entre X_i e Y)
4. Cuantificar la **incertidumbre típica** de cada variable de entrada (contribuciones a la incertidumbre típica combinada). Podrán ser:
 - contribuciones tipo A (gaussiana)
 - contribuciones tipo B (cuadrada, triangular...)
5. Aplicar la **ley de propagación de varianzas** para obtener la incertidumbre típica combinada de la variable de salida, $u(y)$.
6. Expandir la incertidumbre, multiplicando por el **factor de cobertura**, k , adecuado. Obtenemos la incertidumbre expandida combinada de la variable de salida, $U(y)$.

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ DEFINICIONES

Calibración: Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida (o un sistema de medida, o valores representados por una medida materializada o por un material de referencia), y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.

(VIM 6.11)

Trazabilidad: propiedad del resultado de una medida o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

(VIM 6.10)

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ DEFINICIONES



CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ DEFINICIONES

Dos opciones para asegurar
la trazabilidad
de las medidas

Calibración interna

- Procedimientos de calibración
- Patrones (calibrados periódicamente por ENAC)
- Control de las condiciones ambientales, etc



En una AUDITORÍA también se evaluará la competencia técnica en las calibraciones

Calibración externa (ENAC)

La marca ENAC es garantía de que el Laboratorio es competente técnicamente para realizar la calibración y tiene asegurada la trazabilidad de sus patrones a la unidad del SI de la magnitud correspondiente

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ CALIBRACIÓN INTERNA

- Procedimientos de calibración
- Patrones (calibrados periódicamente por ENAC)
- Control de las condiciones ambientales, etc



A partir de 2024, todos los laboratorios acreditados que realicen calibraciones internas deberán realizar un análisis de riesgos que determine si es necesario participar en **ejercicios de intercomparación**

NT-03 : Política de ENAC sobre Intercomparaciones

G-ENAC-25 :Guía para el desarrollo de riesgos en relación con la participación en ejercicios de aptitud para calibraciones internas

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ CALIBRACIÓN INTERNA

G-ENAC-25 :Guía para el desarrollo de riesgos en relación con la participación en ejercicios de aptitud para calibraciones internas

Matriz de evaluación de riesgos

	Indicador
1.	Riesgo de la propia actividad del laboratorio en terceros
1.1	Afecta a la salud o seguridad física de terceros
1.2	Afectar al medioambiente
1.3	Actividad desarrollada para comprobar cumplimiento con requisitos reglamentarios
1.4	Actividad especialmente crítica por otros motivos
2.	Riesgo de no detectar calibraciones internas incorrectas
2.1	No existe ningún tipo de control con otros patrones o materiales de referencia sobre los equipos calibrados internamente
2.2	No existen ni solapes en rangos ni equipos similares que se hayan calibrado externamente
3	Riesgo de producir trabajos no conformes asociados a las calibraciones internas
3.1	Se han producido trabajos no conformes debidos al equipo
3.2	Se detecta mucha variabilidad de las medidas tomadas con el equipo
4.	Riesgo de que afecte de forma crítica a la incertidumbre del ensayo o calibración

Probabilidad	3	2	3	3
	2	1	2	3
	1	1	1	2
		1	2	3
	Impacto			

Una vez terminado el análisis de cada riesgo, se podrá asignar un nivel de riesgo global multiplicando las cuatro puntuaciones con el siguiente criterio:

- Producto de los resultados individuales menor o igual a 9: riesgo bajo
- Producto de los resultados individuales entre 10 y 27: riesgo medio
- Producto de los resultados individuales por encima de 27: riesgo alto

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ CALIBRACIÓN INTERNA

G-ENAC-25 :Guía para el desarrollo de riesgos en relación con la participación en ejercicios de aptitud para calibraciones internas

Con este resultado, el laboratorio puede optar por dos caminos o por la mezcla de ambos:

- Optar por participar en intercomparaciones para calibración interna en los casos de los equipos con riesgos medios o altos.
- Optar por aplicar acciones para disminuir los riesgos. Una vez aplicadas estas acciones, el laboratorio debería volver a evaluar los riesgos para comprobar si ya se encuentra en riesgo bajo.

Este análisis de riesgos debería realizarse periódicamente dado que depende de muchos factores que pueden variar en el tiempo. Además, cualquier cambio desarrollado en el sistema de gestión el laboratorio podría afectar para bien o para mal a este análisis.

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ CALIBRACIÓN INTERNA

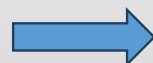
Ejemplo G-ENAC-25

La empresa dispone de una balanza para el pesaje de un reactivo.

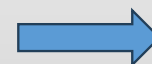
Consecuencias de un mal pesaje: Si la masa está por debajo de un umbral la reacción no tiene lugar y si está por encima, se desperdicia producto aunque la reacción si que tiene lugar.

1.	Riesgo de la propia actividad del laboratorio en terceros	➡	El laboratorio asigna una puntuación de 1
2.	Riesgo de no detectar calibraciones internas incorrectas	➡	El laboratorio asigna una puntuación de 3
3	Riesgo de producir trabajos no conformes asociados a las calibraciones internas	➡	El laboratorio asigna una puntuación de 2
4.	Riesgo de que afecte de forma crítica a la incertidumbre del ensayo o calibración	➡	El laboratorio asigna una puntuación de 1

ANÁLISIS DEL RIESGO = $1 \times 3 \times 2 \times 1 = 6$



RIESGO BAJO



No es necesario participar en ejercicio de intercomparación

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

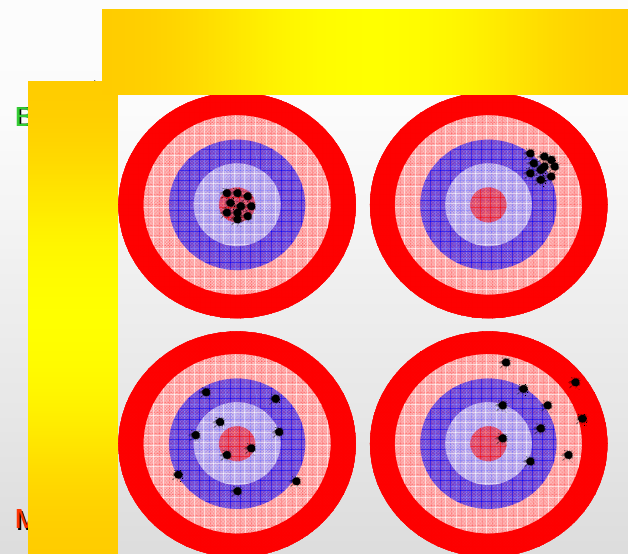
➤ DEFINICIONES

El **objetivo** que persigue la calibración es estimar la exactitud de los resultados de una medida

$$\text{EXACTITUD} = \text{VERACIDAD} + \text{PRECISIÓN}$$

Veracidad: grado de concordancia entre el resultado de una medida y el valor de referencia (patrón)

Precisión: grado de concordancia entre las medidas obtenidas cuando se reiteran mediciones sobre el mismo patrón en condiciones de repetibilidad.



CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ DEFINICIONES

Periodo de recalibración

Depende de:

- i) Frecuencia y severidad de uso
- i) Deriva inherente a determinados instrumentos y patrones

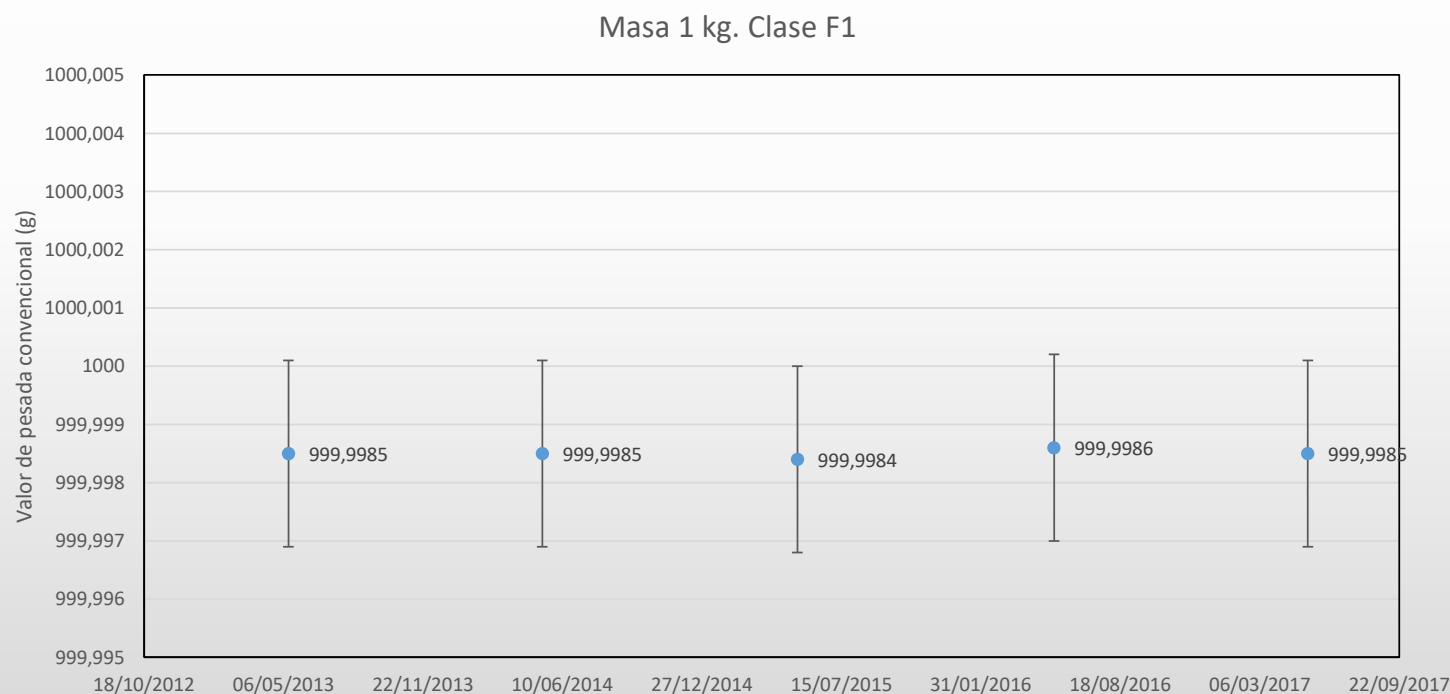
Recomendación:

- No establecer periodos de calibración elevados para equipos nuevos
- Es posible ampliar el periodo de calibración en aquellos equipos de los que se disponga un histórico adecuado de la deriva y no se haya variado sustancialmente la frecuencia y severidad de uso

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ DEFINICIONES

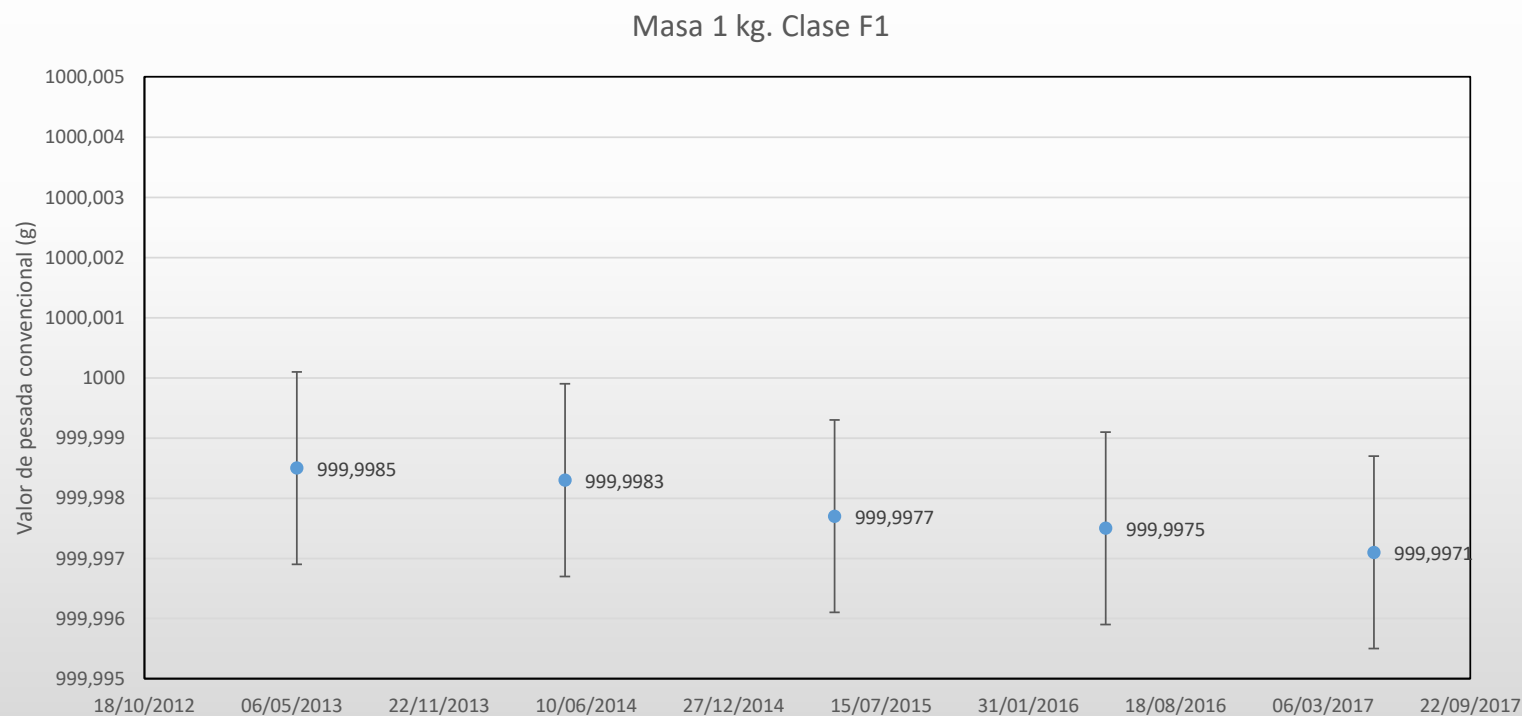
ESTUDIO DE LA DERIVA (I)



CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ DEFINICIONES

ESTUDIO DE LA DERIVA (II)



CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN (REQUISITOS ISO/IEC 17025)

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
Certificate of Calibration

Número
Number
3039-712

Página
Page
1 de 3 páginas
of pages

CALTEX SISTEMAS, S.L.
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
Av. Juan de La Cierva, Nº 10 (N 7), 46980 Paterna (VALENCIA)
Tel.: 96 182 99 02 – Fax: 96 143 82 72
e-mail: caltex@caltex.es Web: http://www.caltex.es

OBJETO
Item
TERMORESISTENCIA
PT100

MARCA
Mark
TC

MODELO
Model
R100 - 1/10

IDENTIFICACIÓN
Identification
CÓDIGO : 8037.01(LT-TRT_TA-19)
Nº SERIE : No consta

SOLICITANTE
Applicant
CALTEX SISTEMAS SL
AVDA JUAN DE LA CIERVA, 10, N-7
46980 PATERNA VALENCIA

FECHA/S DE CALIBRACIÓN
Date/s of calibration
30/01/2018 a 01/02/2018

Signatario/s autorizado/s
Authorized signatory/ies
Rafael Juan Jiménez Villar
Revisión
2018-02-05 14:45+02:00
lunes, 5 de febrero de 2018

Fecha de emisión
Date of issue

Responsable del centro

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC que ha comprobado las capacidades de medida y su trazabilidad a patrones nacionales o internacionales.
ENAC es el firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).
Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio de calibración CALTEX SISTEMAS.
This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.
ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).
This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory CALTEX SISTEMAS.

✓ CALTEX colabora con el medio ambiente. IMPRESIÓN A DOBLE CARA LT-FPC-03-01 Ver 3

a) título

c) identificación única del certificado de calibración

k) número de página y total de páginas

b) nombre y dirección del laboratorio

f) identificación no ambigua del equipo calibrado

n) evidencia de que las medidas son trazables

d) nombre y dirección del cliente


g) fecha de calibración

i) nombre, función y firma

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN (REQUISITOS ISO/IEC 17025)

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
3039-712

 **ENAC**
CALIBRACIÓN
Nº 113-1618-113

Página 2 de 3 páginas
Page of pages

El resultado de las medidas incluidas en el presente certificado ha sido obtenido aplicando el procedimiento N°. **LT-PC-03**
The measurement results reported in this certificate were obtained following procedures N°.

CONDICIONES AMBIENTALES DE CALIBRACIÓN:
Temperatura [21,5 ~ 22,5] °C Humedad Relativa [39,8 ~ 39,2] %Hr

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO:

Rango de Medida	-40 ~ 165 °C	Inmersión de calibración (mm)	120
Patrones utilizados	8026 8034 8035 8039 8040		

NOTAS:

Para valorar la repetibilidad de la termoresistencia bajo calibración se repite la medida sobre la misma temperatura al principio y final de la calibración, encontrando una diferencia de 0,005 °C

Para valorar el auto-calentamiento de la termoresistencia bajo calibración se realiza la medida en un punto a dos corrientes diferentes, encontrando una diferencia de 0,006 °C

Las medidas se han realizado utilizando corriente de 1 mA con conmutación de la polaridad a 1 Hz

INCERTIDUMBRES :

Las contribuciones consideradas para el cálculo de la incertidumbre han sido todas las que afectan al método de calibración, incluyendo la resolución y la estabilidad a corto plazo del instrumento en calibración. No ha sido considerada la componente relativa a la estabilidad a largo plazo.

La incertidumbre expandida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k que se indica en la tabla de resultados, que para una distribución t de Student con los grados efectivos de libertad que se indican en la tabla de resultados corresponde a una probabilidad de ~~aproximadamente el 95 %~~. ~~El cálculo se ha efectuado conforme a la guía europea EA-4/02-M:2013.~~

Los valores e incertidumbres reportados en este documento, corresponden al momento y condiciones de las medidas.

e) método utilizado

l) condiciones ambientales

j) declaración

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN (REQUISITOS ISO/IEC 17025)

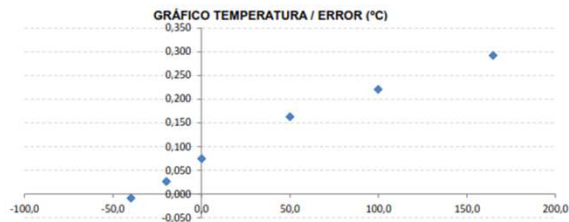


RESULTADOS OBTENIDOS

Temperatura	Temperatura	Valor	Error	Incertidumbre
Referencia	UNE-EN 60751:1996	Leído		expandida
t _{ref}	t _{ind}		t _{ind} -t _{ref}	U (k=2)
°C	°C	Ohm	°C	°C
-39,80	-39,81	84,35	-0,01	0,06
-19,85	-19,82	92,23	0,03	0,06
-0,01	0,07	100,03	0,07	0,07
49,85	50,01	119,40	0,16	0,08
99,60	99,82	138,44	0,22	0,07
164,53	164,82	162,85	0,29	0,08

m) incertidumbre de calibración

h) resultados de la calibración con sus unidades de medida (errores)



CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN

Función modelo:

$$X = X' + C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

X : Indicación del equipo calibrado

X' : Indicación del patrón de referencia

C_i : Correcciones no realizadas

- División de escala
- Falta de repetibilidad
- Histéresis
- Deriva de los patrones
- Condiciones ambientales
- ...

CALIBRACIÓN. INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN.

➤ INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN

$$X = X' + C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

$$u_{cal}^2(x) = \left(\frac{\partial X}{\partial X'} \cdot u(x') \right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial C_1} \cdot u(c_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial C_2} \cdot u(c_2) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial X}{\partial C_n} \cdot u(c_n) \right)^2$$

$$\frac{\partial X}{\partial X'} = \frac{\partial X}{\partial C_1} = \frac{\partial X}{\partial C_2} = \dots = \frac{\partial X}{\partial C_n} = 1 \quad \text{Coeficientes de sensibilidad}$$

$$u_{cal}(x) = \sqrt{u^2(x') + u^2(c_1) + u^2(c_2) + \dots + u^2(c_n)}$$

INCERTIDUMBRE DE USO

➤ DEFINICIONES

Contribuciones más importantes

- ✓ Incertidumbre de calibración
- ✓ Corrección de calibración residual no realizada
- ✓ Corrección de escala

Puede haber más contribuciones, dependiendo de las magnitudes de influencia presentes durante el uso habitual del instrumento

Función modelo:

$$X = X' + C_{\Delta} + C_E + \sum_{k=3}^K C_k$$

X : Indicación del equipo calibrado

X' : Indicación del patrón

C_D : Corrección residual no realizada correspondiente a cada punto de calibración

C_E : Corrección por redondeo a la división de escala correspondiente a cada punto de calibración

C_k : Correcciones provocadas por las magnitudes de influencia presentes en la medida durante el uso habitual del equipo

INCERTIDUMBRE DE USO

➤ DEFINICIONES

Aplicando la Ley de Propagación de varianzas a la función modelo se obtendrá una expresión genérica para la incertidumbre de uso

$$X = X' + C_{\Delta} + C_E + \sum_{k=3}^K C_k$$

$$u_{uso}^2(x) = \left(\frac{\partial X}{\partial X'} \cdot u(x') \right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial C_{\Delta}} \cdot u(c_{\Delta}) \right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial C_E} \cdot u(c_E) \right)^2 + \sum_k \left(\frac{\partial X}{\partial C_k} \cdot u(c_k) \right)^2$$

$$\frac{\partial X}{\partial X'} = \frac{\partial X}{\partial C_{\Delta}} = \frac{\partial X}{\partial C_E} = \frac{\partial X}{\partial C_k} = 1$$

$$u_{uso}^2(x) = u^2(x') + u^2(c_{\Delta}) + u^2(c_E) + \sum_k u^2(c_k)$$

Incertidumbre expandida (k=2)

$$U_{uso}(x) = 2 \cdot \sqrt{u^2(x') + u^2(c_{\Delta}) + u^2(c_E) + \sum_k u^2(c_k)}$$

INCERTIDUMBRE DE USO

➤ CONTRIBUCIÓN DEBIDA A LA INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN, $u(x')$

Para cada punto de calibración, la contribución debida a la calibración se estima dividiendo por el factor de cobertura la incertidumbre expandida obtenida del certificado de calibración del equipo

$$u(x') = \frac{U(x')}{k}$$

INCERTIDUMBRE DE USO

➤ CONTRIBUCIÓN DEBIDA A LAS CORRECCIONES DE CALIBRACIÓN, $u(c_{\Delta})$

Modelo		Corrección realizada		Corr. no realizada (residual) c_{Δ}	Incertidumbre típica $u_i(c_{\Delta})$
Correcciones puntuales	No nulas	Valor puntual de la corrección	c_{cl}	0	$\frac{ c_{\Delta\max} }{\sqrt{3}} = 0$
	Nula	Cero	0	c_{cl}	$\frac{ c_{\Delta\max} }{\sqrt{3}}$
Corrección global	No nula	Media	\bar{c}_c	$c_{cl} - \bar{c}_c$	$\frac{ c_{\Delta\max} }{\sqrt{3}}$
		Ajuste	c_l^{aj}	$c_{cl} - c_l^{aj}$	$\frac{ c_{\Delta\max} }{\sqrt{3}}$

Estos modelos se pueden aplicar, independientemente, a diferentes tramos.

INCERTIDUMBRE DE USO

➤ CONTRIBUCIÓN DEBIDA A LA DIVISIÓN DE ESCALA (RESOLUCIÓN), $u(c_E)$

Se considera una distribución rectangular. Si la resolución de un dispositivo indicador es E , el valor de la señal es igual de probable en cualquier punto dentro del intervalo $[X-E/2, X+E/2]$.

$$u(c_E) = \frac{E / 2}{\sqrt{3}}$$

INCERTIDUMBRE DE USO

➤ OTRAS CONTRIBUCIONES, $u(c_K)$

Acotar la variabilidad de la magnitud entre extremos conocidos o razonablemente imputables, asignando una distribución de probabilidad adecuada en cada caso.

Ejemplos:

- Deriva: $u(c_{k1}) = \frac{D}{\sqrt{3}}$
- Variabilidad nominal instrumento volumétrico: $u(c_{k2}) = \frac{\Delta V}{\sqrt{6}}$
- Tolerancia instrumento: $u(c_{k3}) = \frac{T}{\sqrt{3}}$
- ...

INCERTIDUMBRE DE USO

➤ CRITERIO GLOBALIZADOR DE LA INCERTIDUMBRE

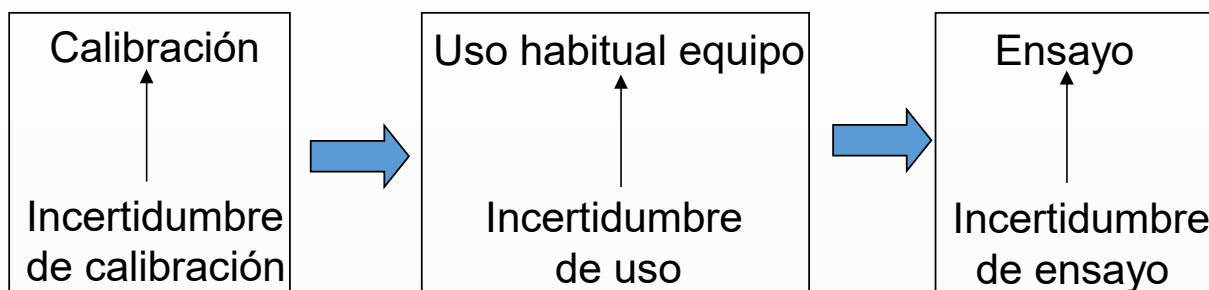
Con este desarrollo hemos obtenido una incertidumbre de uso para cada punto de calibración, aunque es mas cómodo trabajar con una única incertidumbre para todo el campo de medida.

Consideraremos este valor como el máximo de las incertidumbres obtenidas para cada punto de calibración:

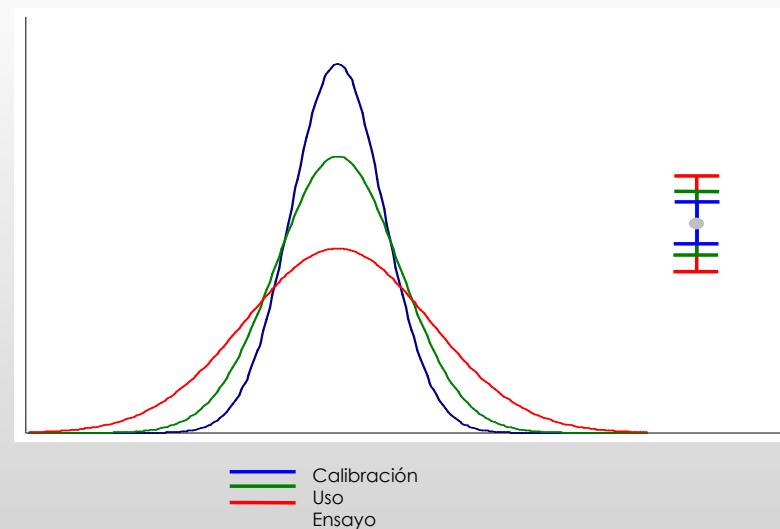
$$U_u = \max(U_{ui})$$

Es posible que de este modo estemos penalizando partes de la escala que tengan una incertidumbre de medida menor pero se simplifica el manejo de las incertidumbres puesto que un mismo valor es válido para toda la escala calibrada.

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO



A medida que se avanza en el proceso de confirmación metrológica, la incertidumbre correspondiente va aumentando



INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

¿Por qué necesitamos la incertidumbre?

- Acreditación. Lo requiere la ISO 17025
- La incertidumbre de un resultado demuestra la CALIDAD metrológica de las medidas
- Mejora el conocimiento del procedimiento de ensayo
- Para el usuario final → expresar un resultado de forma fiable
- Para permitir la comparación de los resultados
- Una declaración de incertidumbre bien documentada respalda los resultados del laboratorio y confiere transparencia
- Para demostrar cumplimiento con los requisitos, especificaciones o límites establecidos.

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Las fuentes de incertidumbre pueden incluir entre otras:

- ✓ Los métodos y equipos utilizados
- ✓ Las propiedades de las muestras
- ✓ El operador
- ✓ Condiciones ambientales

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN

Aproximaciones existentes para su cálculo

- ✓ Aproximación GUM
- ✓ Aproximación del método de la “caja negra”
- ✓ Aproximación basada en la información generada en la etapa de validación
- ✓ Métodos numéricos (método Montecarlo, suplemento 1 de GUM)

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN ISO-GUM

CONTRIBUCIONES A LA INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

LA MEDIDA

Suponiendo que se realiza una *medida indirecta* de la magnitud Y a través de medidas directas de M magnitudes X_1, X_2, \dots, X_M y que éstas se relacionan con aquella mediante la función:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_M)$$

La incertidumbre típica de Y vendrá dada como resultado de aplicar la ley de propagación de varianzas

$$u_y^2 = \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m} \right)^2 u^2(x_m)$$

Donde $u(x_m)$ será la incertidumbre de uso del equipo con el que se ha realizado la medida

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN ISO-GUM

CONTRIBUCIONES A LA INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

LA MUESTRA

Suponiendo que se realizan N medidas de la magnitud Y en condiciones de repetibilidad con el objetivo de dar cuenta de la heterogeneidad de la muestra, se tendrá que añadir otra componente debida a la falta de repetibilidad de las medidas obtenidas

$$u_r^2 = \left(\frac{s_{muestra}}{\sqrt{N}} \right)^2$$

Donde $s_{muestra}$ es la desviación típica de las N medidas

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN ISO-GUM

CONTRIBUCIONES A LA INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

EL OPERADOR

El operador que realiza las medidas y aplica el método puede introducir unos errores sistemáticos que sólo se evidencian al compararse con otro operario que realice el mismo ensayo en las mismas condiciones. De esta forma se evalúa la *reproducibilidad* de los resultados de un ensayo. Los resultados obtenidos por cada uno de los operarios tendrán asociada una desviación típica, llamada desviación típica de reproducibilidad, a partir de la cual obtendremos la componente de incertidumbre:

$$u_R^2 = s_{operarios}^2$$

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN ISO-GUM

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

La **incertidumbre típica** de ensayo será la siguiente:

$$u_E^2 = u_Y^2 + u_r^2 + u_R^2$$

La **incertidumbre expandida** será:

$$U_E = k \cdot u_E = k \cdot \sqrt{u_Y^2 + u_r^2 + u_R^2}$$

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN MÉTODO CAJA NEGRA



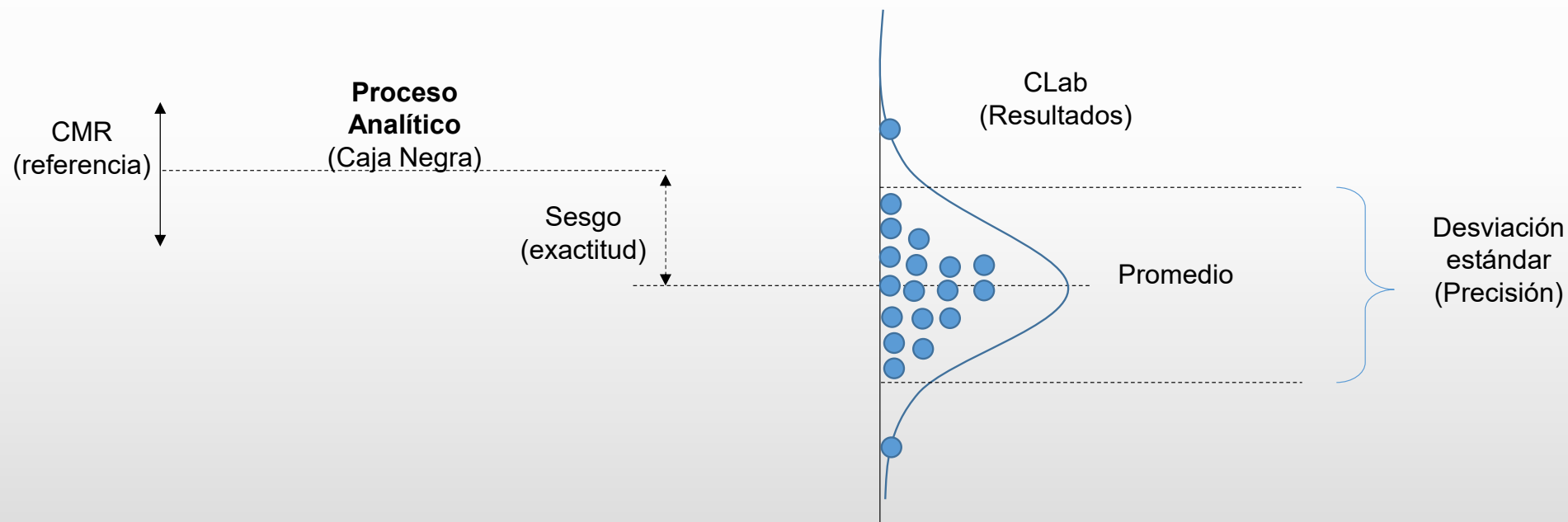
El modelo “caja negra” se basa en suministrar al método una muestra con un valor e incertidumbre conocidos

Del método, por alguna causa no sabemos o no es posible evaluar sus diversos componentes de variabilidad interna

Se puede conocer la incertidumbre del método analizando los resultados a la salida, evaluando su precisión y exactitud.

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN MÉTODO CAJA NEGRA



INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN CON DATOS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO (EURACHEM/CITAC)

Esta estrategia calcula la incertidumbre utilizando la información generada en el proceso de **verificación de la trazabilidad del método analítico**.

La **trazabilidad del método** debe verificarse con una muestra representativa. Es decir, debe ser una muestra que sea lo más parecida posible a las muestras de rutina que se analizarán con el método analítico. Sólo en el caso de que la muestra de referencia sea representativa, podremos asegurar la trazabilidad de los resultados obtenidos al analizar muestras de rutina. Además, la muestra de referencia debe analizarse en **condiciones intermedias de precisión**, es decir, variando todos aquellos factores que pueden influir en la variabilidad de los resultados. Por tanto, la muestra debería analizarse en diferentes días, por diferentes analistas, etc.

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN CON DATOS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO

$$U = k \sqrt{u_{precision}^2 + u_{trazabilidad}^2 + u_{heterogeneidad}^2 + u_{otros}^2}$$

Diagram illustrating the components of the uncertainty equation:

- $u_{precision}$: Verification of the traceability (information of the process of Validation)
- $u_{trazabilidad}$: Verification of the traceability (information of the process of Validation)
- $u_{heterogeneidad}$: Sampling and pre-treatment
- u_{otros} : Other components

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN CON DATOS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Incertidumbre del procedimiento (precisión)

Considera la variabilidad experimental del método analítico y corresponde a la **precisión intermedia del procedimiento**

$$u_{prec} = S_I$$

Considera la variabilidad experimental del método analítico y corresponde a la **precisión intermedia del procedimiento** (analizando varias series, por diferentes operarios, con diferentes equipos)

La precisión intermedia puede calcularse:

- ✓ Aprovechando la información de la verificación de la trazabilidad
- ✓ Utilizando estudios de precisión

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN CON DATOS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Incertidumbre de la verificación de la trazabilidad

Corresponde a la incertidumbre del sesgo calculado en la verificación de la trazabilidad

$$\text{sesgo} = |c_{ref} - c_{metodo}|$$

$$u_{trazab} = \sqrt{u(c_{ref})^2 + u(\bar{c}_{metodo})^2} = \sqrt{u(c_{ref})^2 + \frac{s_I^2}{n}}$$

Incertidumbre de la muestra de referencia
utilizada para verificar la trazabilidad

Incertidumbre del valor medio obtenido al
analizar la muestra de referencia con el
método analítico

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ APROXIMACIÓN CON DATOS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Incertidumbre del submuestreo y pretratamientos

Se analiza la muestra de rutina variando representativamente todos los factores que afectan al submuestreo y al pretratamiento

Una vez hecho el pretratamiento, las muestras se analizan en condiciones de repetibilidad (mismo operador, mismos equipos y en un corto periodo de tiempo).

$$u_{Heterogeneidad} = S_{Ipretratamiento}$$

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ MÉTODOS NUMÉRICOS. MÉTODO DE MONTECARLO (MMC)

- ✓ Suplemento 1 de la GUM (2010)

Es un método numérico (estadístico) empleado para generar expresiones matemáticas complejas. El MMC da soluciones aproximadas a problemas matemáticos complejos empleando números aleatorios y probabilidad.

Dado que el campo de validez del MMC es mayor que el enfoque GUM, se recomienda la aplicación de ambos métodos y la comparación de los resultados obtenidos. Si la comparación resulta favorable, podrá utilizarse el enfoque GUM tanto para el caso en cuestión, como para otros casos similares que se presenten en el futuro. En caso contrario, deberá darse prioridad al empleo del MMC u otra aproximación apropiada.

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

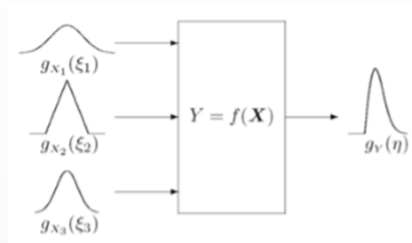
➤ MÉTODOS NUMÉRICOS. MÉTODO DE MONTECARLO (MMC)

El MMC es una alternativa práctica a la GUM cuando:

- La linealización del modelo (del mensurando) provee una inadecuada representación. En este caso la estimación de la magnitud de salida (mensurando) y su incertidumbre asociada provista por la GUM podría no ser adecuada
- La función densidad de probabilidad (FDP) para la magnitud de salida se aparta apreciablemente de una distribución gaussiana
- Es necesario validar los resultados obtenidos por el método GUM, en procesos críticos como puede ser la acreditación ISO/IEC 17025, ensayos de aptitud o comparaciones entre laboratorios

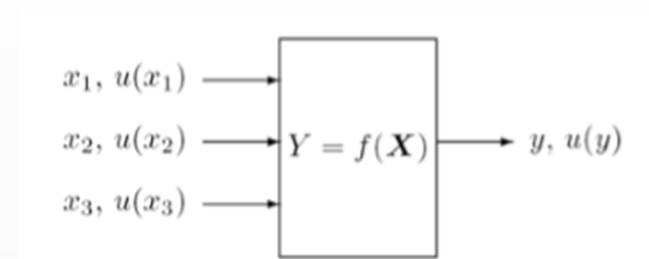
INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ MÉTODOS NUMÉRICOS. MÉTODO DE MONTECARLO (MMC)



MMC

- ✓ Conocimiento previo de FDP de las magnitudes de entrada
- ✓ Combinación de las FDP por simulación numérica probabilística
- ✓ Obtener la FDP de la magnitud de salida
- ✓ A partir de la FDP de salida obtener la magnitud de salida y su incertidumbre

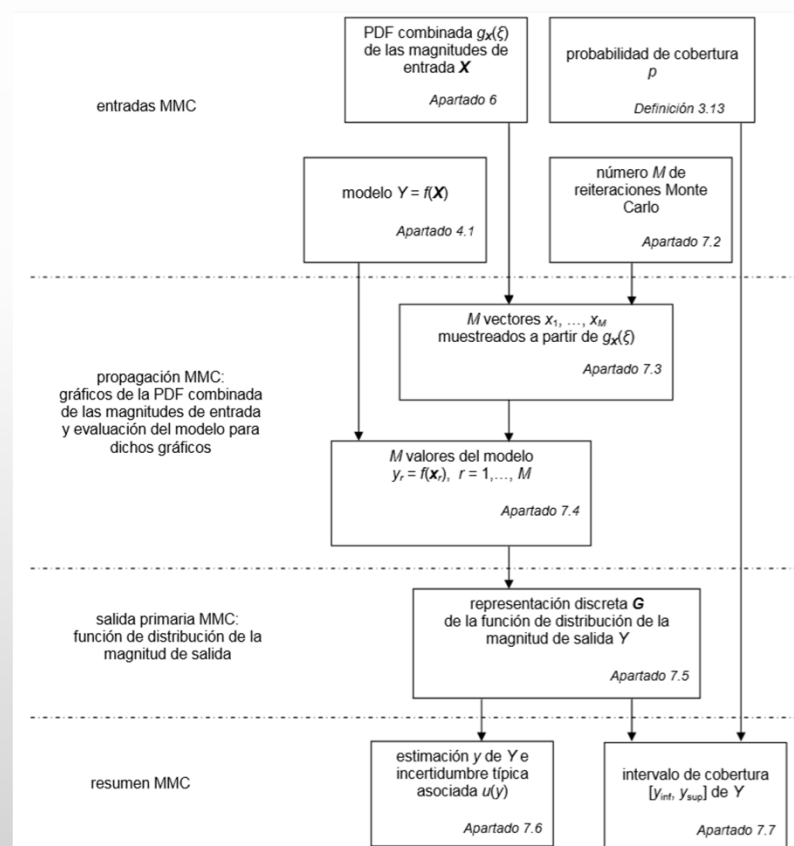


GUM

- ✓ Calcular coeficientes de sensibilidad (derivadas parciales)
- ✓ Aplicar la ley de propagación de varianzas (variables independientes o correlaciones)
- ✓ Calcular grados efectivos de libertad (Welch-Satterthwaite)

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ MÉTODOS NUMÉRICOS. MÉTODO DE MONTECARLO (MMC)



INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ MÉTODOS NUMÉRICOS. MÉTODO DE MONTECARLO (MMC)

El MMC requiere del uso de un ordenador y software para el tratamiento de los datos (MATLAB, MathCAD, Mathematica, LabVIEW, etc,..)

En este curso: **EXCEL**

Ventajas:

- amplia difusión
- facilidad de operación
- gran cantidad de funciones sin necesidad de programación aunque también dispone de capacidad de programación mediante VBA

Inconvenientes:

- Está limitado a un máximo de 65000 filas y 256 columnas
- El número máximo de puntos de datos que es posible usar en una serie de datos para un gráfico es de 32000 puntos
- Su velocidad de cálculo se ve limitada al recalcular números aleatorios

INCERTIDUMBRE DE ENSAYO

➤ MÉTODOS NUMÉRICOS. MÉTODO DE MONTECARLO (MMC)

Para desarrollar el MMC en Excel:

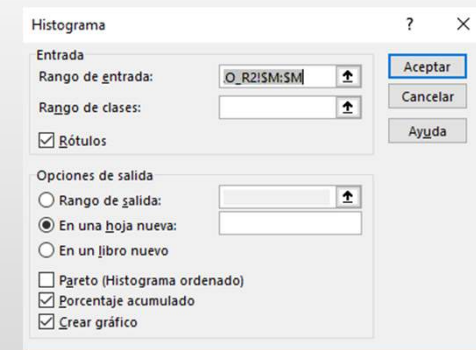
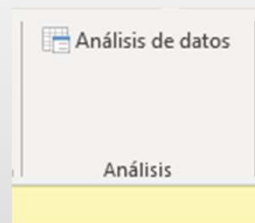
- ✓ Generar números aleatorios de diferentes tipos de distribución: uniforme, rectangular, triangular, etc,...

Distr. NORMAL: $\text{DISTR.NORM.INV}(\text{ALEATORIO()}; \text{media}; \text{desv_estandar})$

Distr. T-student: $\text{DISTR.T.INV}(\text{ALEATORIO()}; \text{grados de libertad})$

Distr. RECTANGULAR: $\text{LIM_INF} + (\text{LIM_SUP} - \text{LIM_INF}) * \text{ALEATORIO}()$

- ✓ Graficar HISTOGRAMAS y FDP



- ✓ Elegir los extremos de la distribución para asegurar el 95% (no se multiplica por “k”)

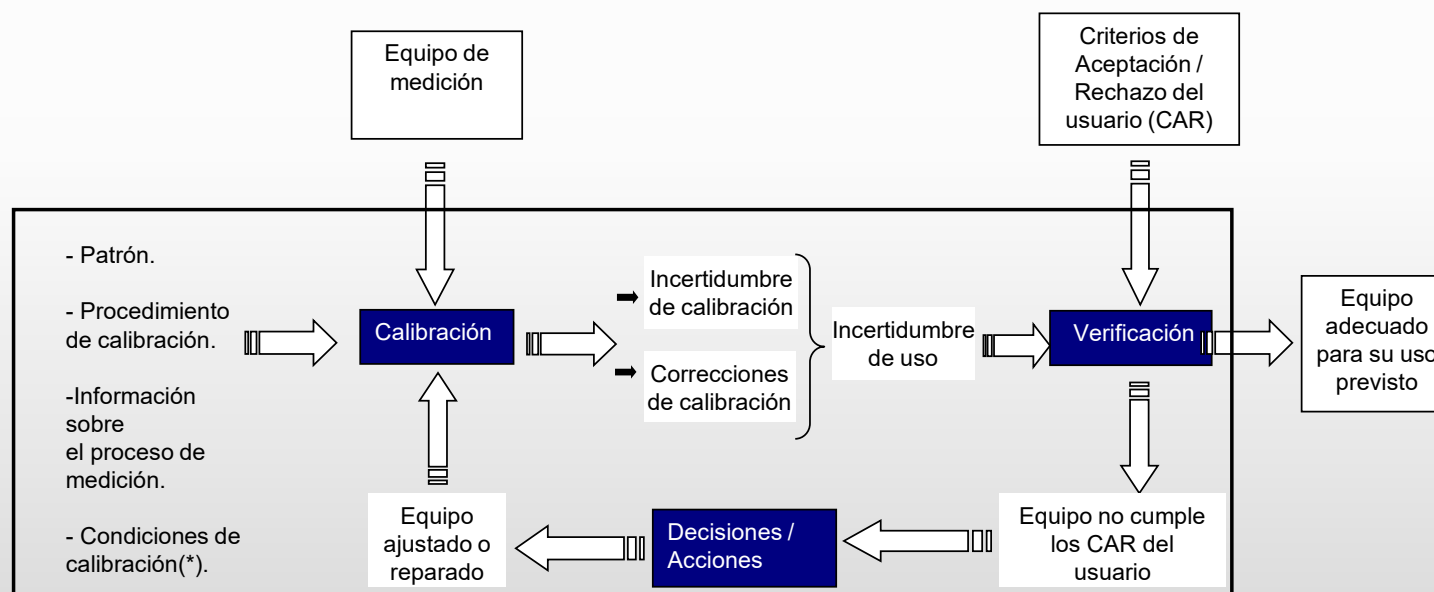
**Curso práctico en
cálculo de
incertidumbres**

**EVALUACIÓN DE LA
CONFORMIDAD**

CONFORMIDAD METROLÓGICA

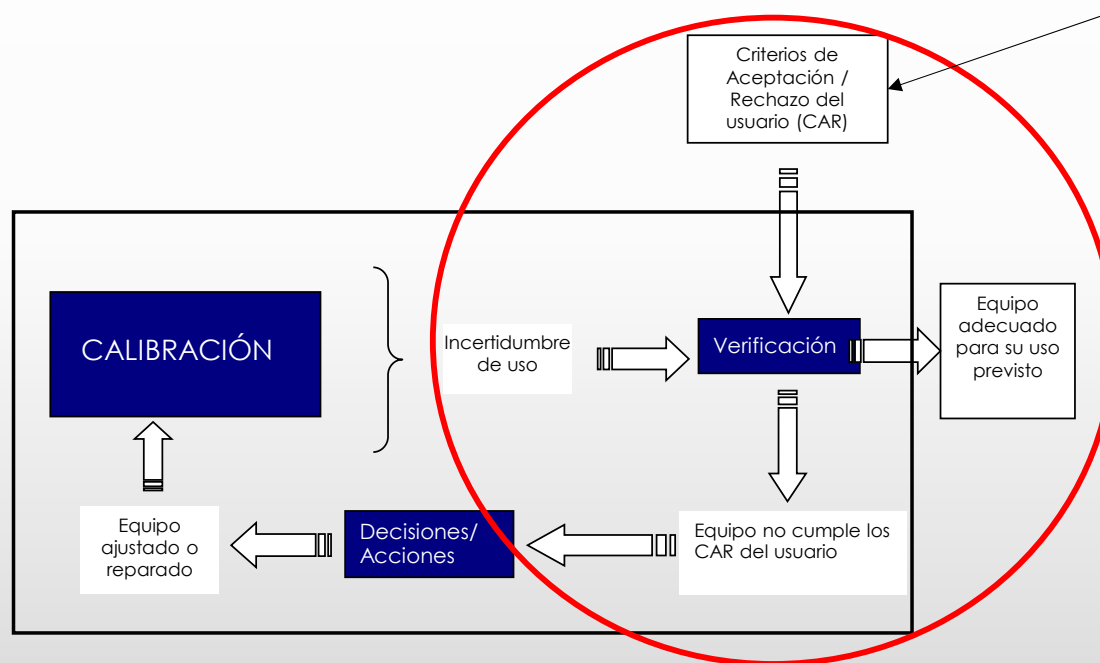
Conjunto de operaciones necesarias para asegurar que el equipo de medición cumple con los requisitos para su uso previsto.

(ISO 10012:2003)



CONFORMIDAD METROLÓGICA

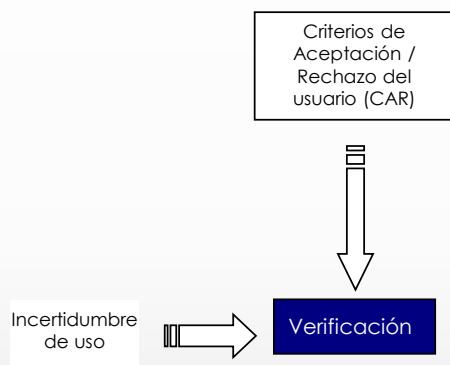
➤ VERIFICACIÓN. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN RECHAZO



- Tolerancias (definidas en norma o en los propios procesos)
- Especificaciones fabricante
- Experiencia (histórico de resultados)

CONFORMIDAD METROLÓGICA

➤ VERIFICACIÓN. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN RECHAZO



EJEMPLO:

Apdo 10.5.3.1 de la UNE EN 1422:1997

“Deberán disponerse los medios necesarios para mantener la presión dentro de la cámara del esterilizador dentro de ± 5 kPa, durante la totalidad de la etapa de exposición al agente esterilizante”

UN POSIBLE CRITERIO DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO MANÓMETRO

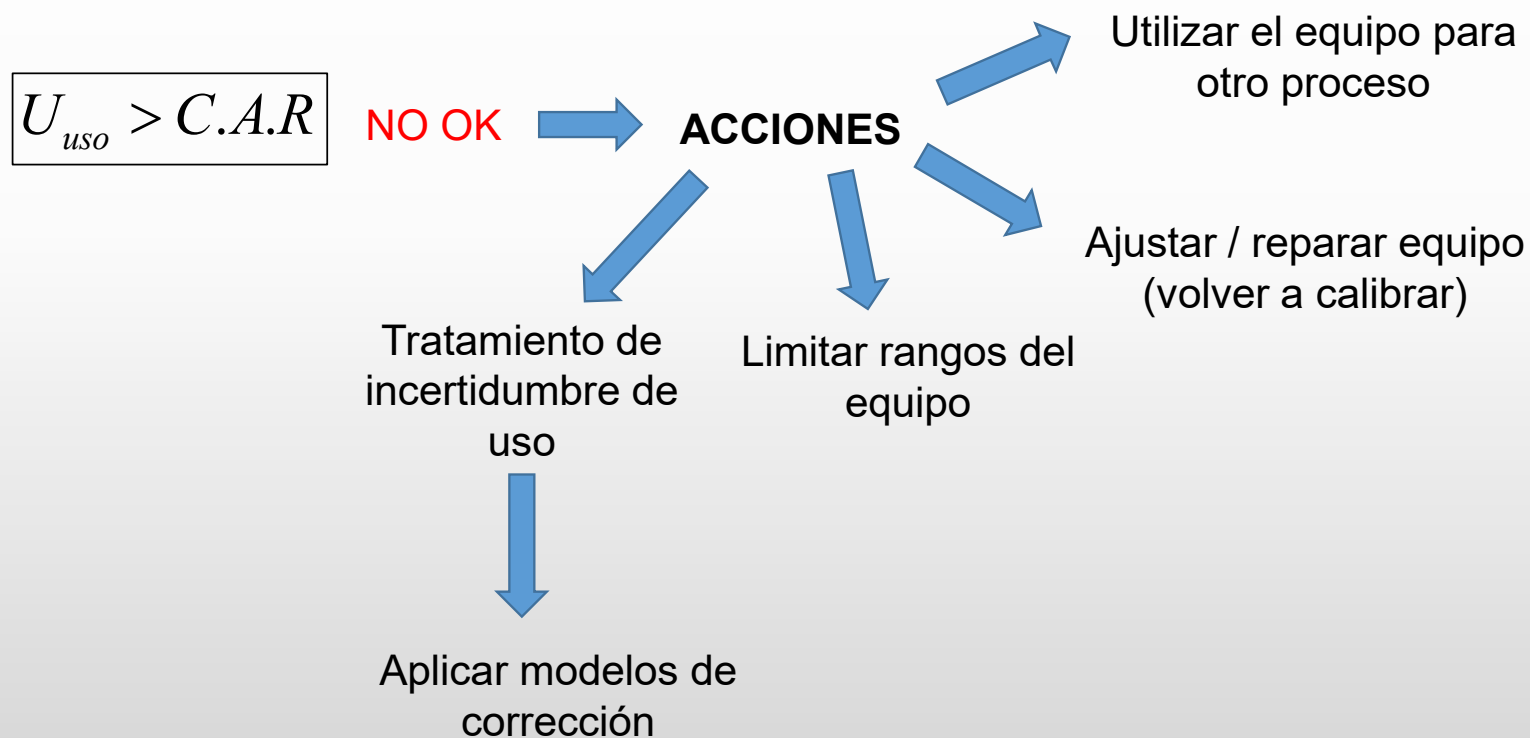
$$U_{uso} \leq 5kPa$$

PROCESO DE VERIFICACIÓN:



CONFORMIDAD METROLÓGICA

➤ VERIFICACIÓN. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN RECHAZO



TOLERANCIA DEL ENSAYO Y SU VERIFICACIÓN

➤ TOLERANCIA EFECTIVA (TOLERANCIA DE VERIFICACIÓN)

La aceptación de la medida se decide a partir de la tolerancia, T , previamente establecida, entendiendo ésta como el intervalo de valores en el que debe encontrarse una magnitud para que se acepte como válida.

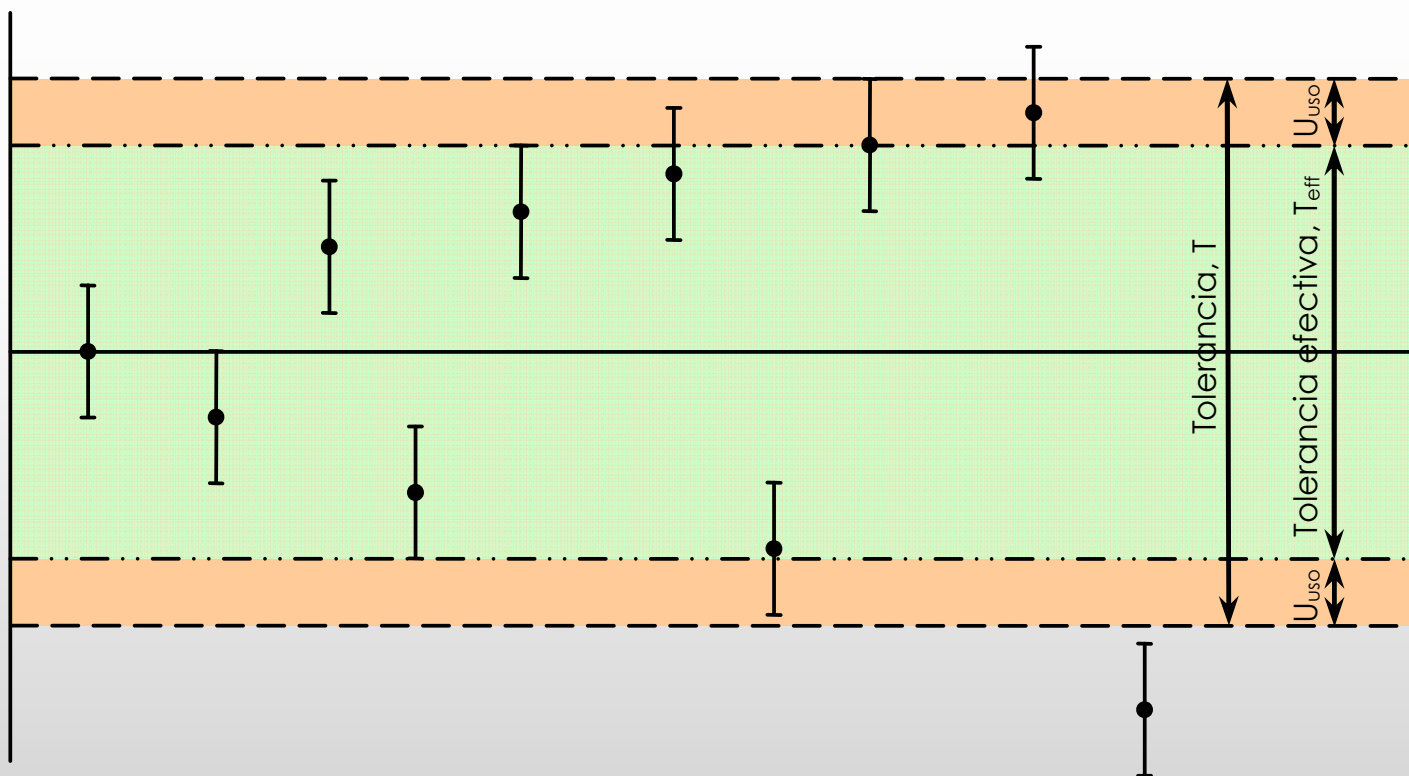
Si el intervalo de incertidumbre de una medida es $[x - U_{uso}, x + U_{uso}]$, podemos definir una **tolerancia efectiva** como:

$$T_{eff} = T - 2U$$

En este caso, la magnitud x deberá estar comprendida en este nuevo intervalo, independientemente de la incertidumbre ya que la tolerancia efectiva ya la tiene en cuenta

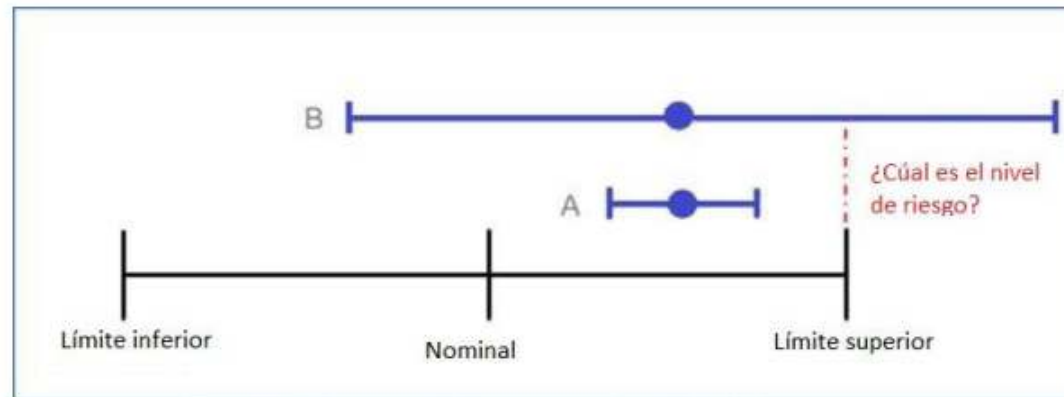
TOLERANCIA DEL ENSAYO Y SU VERIFICACIÓN

➤ TOLERANCIA EFECTIVA



ILAC-G8:09/2019

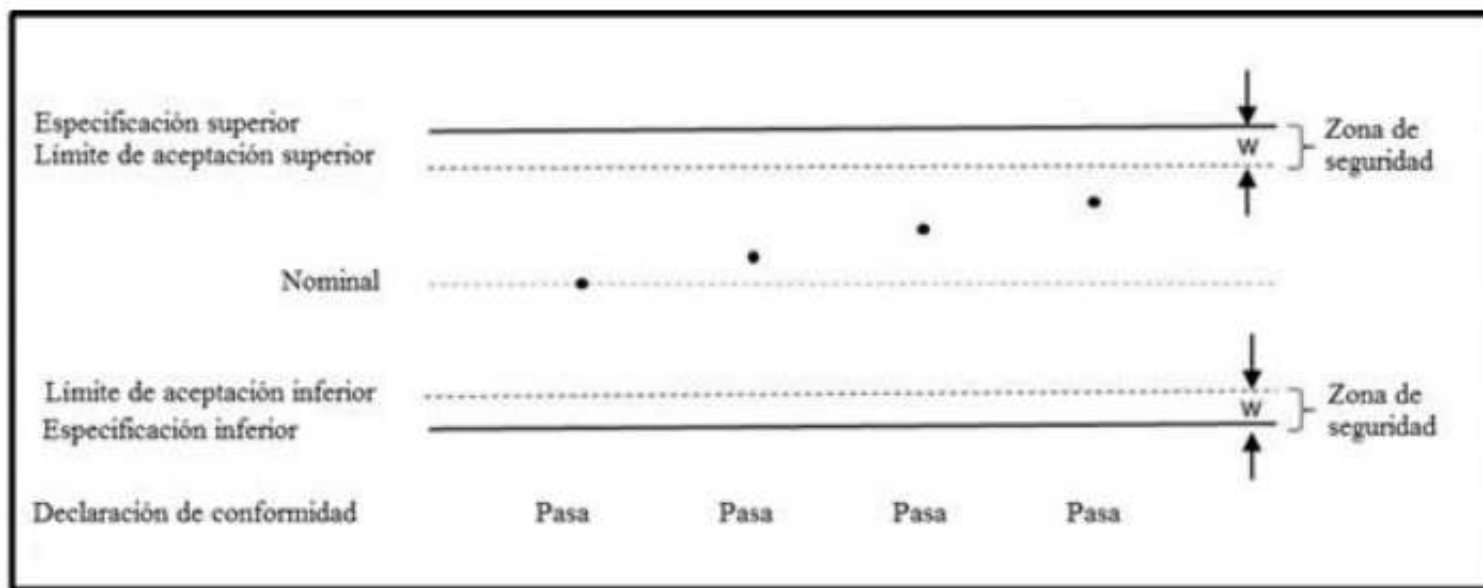
➤ GUÍA PARA ESTABLECER REGLAS DE DECISIÓN EN LA DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD



La figura muestra dos resultados idénticos pero con incertidumbres diferentes. El caso A está totalmente dentro del límite de tolerancia. El caso B tiene una incertidumbre mayor. El riesgo de aceptar falsamente un resultado en el caso B es mayor debido a la gran incertidumbre de medida (Ver: ¿Cuál es el nivel de riesgo? En la figura)

ILAC-G8

ZONAS DE SEGURIDAD



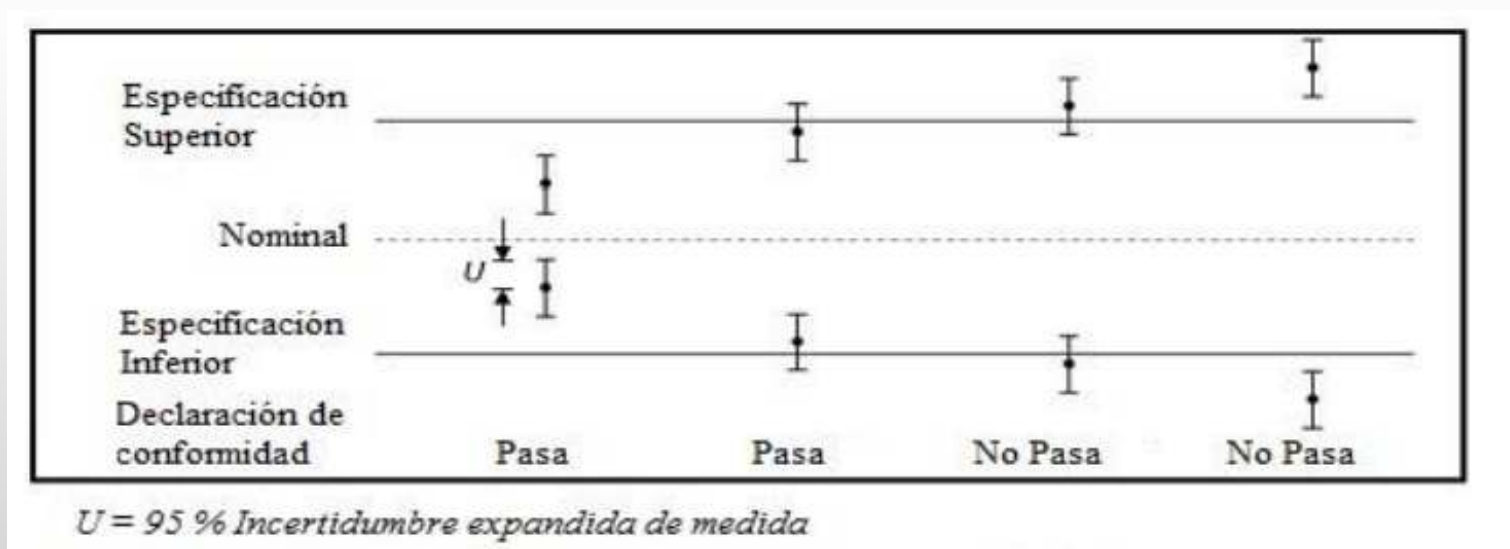
El empleo de zonas de seguridad puede reducir la probabilidad de tomar una decisión de conformidad incorrecta. Esto es frecuentemente empleado para tener en cuenta la incertidumbre de medida.

ILAC-G8

REGLAS DE DECISIÓN

1. Declaración Binaria para una regla de aceptación simple ($w=0$)

- **Pasa:** El valor medido está por debajo del límite de aceptación
- **No pasa:** El valor medido está por encima del límite de aceptación

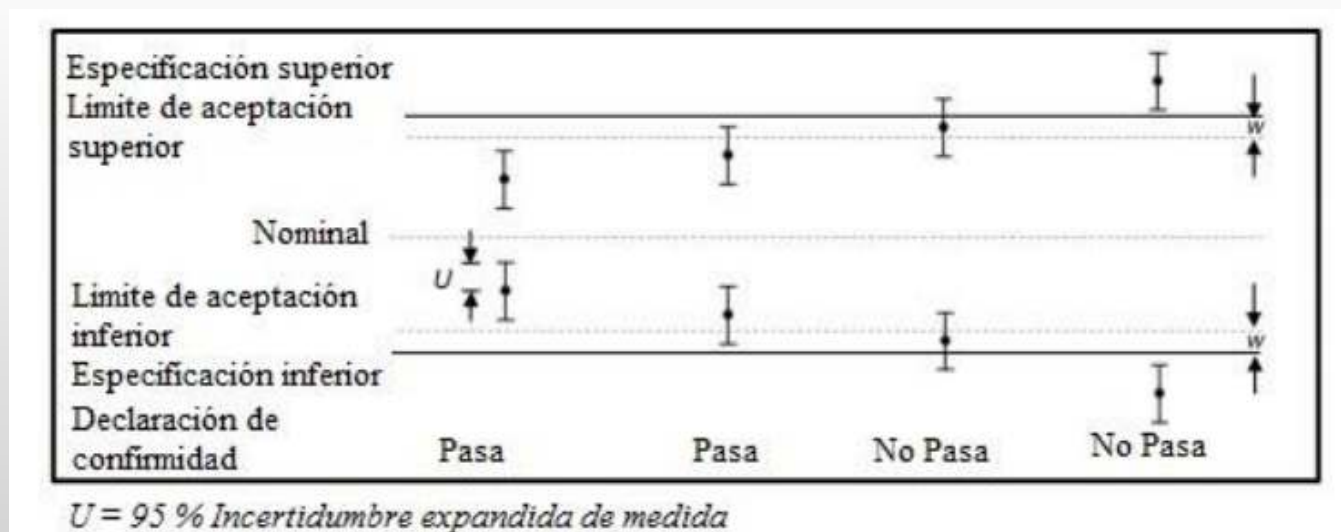


ILAC-G8

REGLAS DE DECISIÓN

2. Declaración Binaria con zona de seguridad

- **Pasa:** Aceptación basada en la zona de seguridad. El resultado medido está por debajo del límite de aceptación
- **No pasa:** rechazo basado en la zona de seguridad; si el resultado medido está por encima de l límite de aceptación

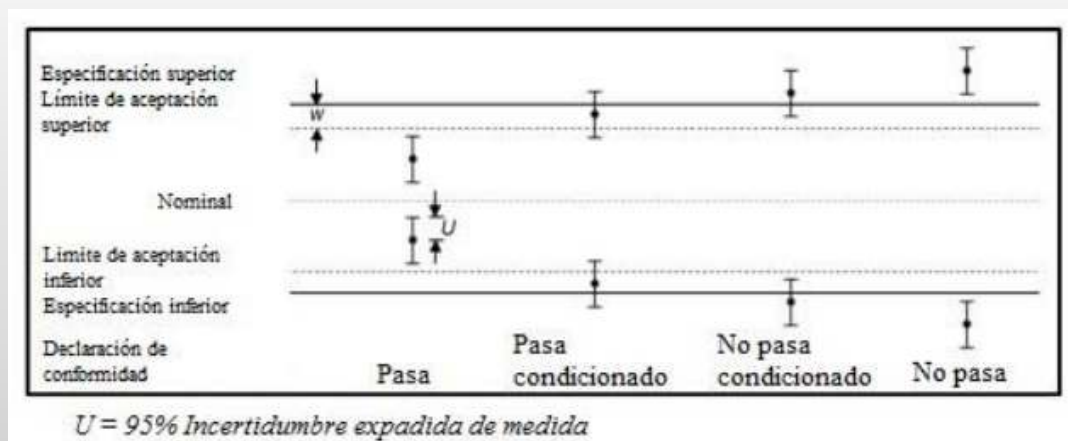


ILAC-G8

REGLAS DE DECISIÓN

3. Declaración no binaria con zona de seguridad

- **Pasa:** El resultado medido está por debajo del límite de aceptación
Pasa condicionado: el resultado medido está dentro de la zona de seguridad y debajo del límite de tolerancia
No pasa condicionado: El resultado medido está por encima del límite de tolerancia, pero debajo del límite de tolerancia al que se le ha sumado la zona de seguridad
- **No pasa:** el resultado medido está por encima del límite de aceptación al que se le ha sumado la zona de seguridad



ILAC-G8

REGLAS DE DECISIÓN

La ISO/IEC 17025:2017 establece que los laboratorios evalúen la incertidumbre de medida y que apliquen una regla de decisión documentada cuando establezcan declaraciones de conformidad.

A menudo la zona de seguridad está basada en un múltiplo r de la incertidumbre expandida (U) donde $w=rU$

Regla de decisión	Zona de seguridad w	Riesgo específico
6 sigma	$3 \cdot U$	$< 1 \text{ ppm PFA}$
3 sigma	$1,5 U$	$< 0,16\% \text{ PFA}$
Regla ILAC G8:2009	$1 U$	$< 2,5\% \text{ PFA}$
ISO 14253-1:2017	$0,83 U$	$< 5\% \text{ PFA}$
Aceptación simple	0	$< 50\% \text{ PFA}$
No crítico	$-U$	Ítem rechazado para un valor medido mayor que $AL = TL + U$ $< 2.5\% \text{ PFR}$
Definido por el cliente	$r U$	Los clientes pueden definir arbitrariamente un múltiplo de r para ser aplicado como zona de seguridad.

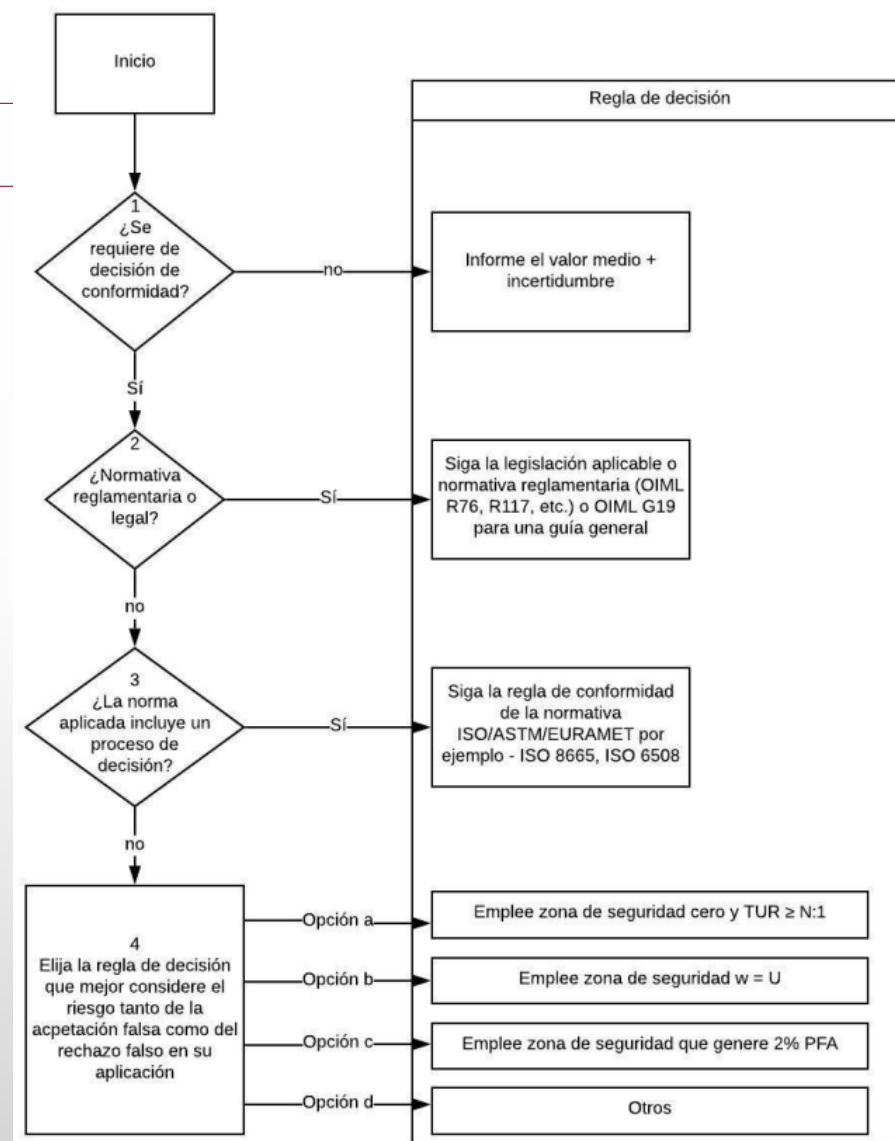
PFA: Probabilidad de Aceptación Falsa

PFR: probabilidad de Rechazo Falso

ILAC-G8

Diagrama de flujo de selección de reglas de decisión

¿Qué criterio de Aceptación / Rechazo pongo a mis equipos?



GRACIAS

Caltex Sistemas S.L. | Tu proveedor único en calibración

Av. Juan de la Cierva y Codorníu 10, Parque tecnológico de Paterna (Valencia) CP: 46980 - Spain
TLF: +34 961 82 99 02

