



EUCOM DISSEMINATION

NUEVOS ESTÁNDARES PARA LA
EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE
LAS MEDICIONES GEOMÉTRICAS EN
MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

ONLINE | 14/07/2021

Acknowledgement

This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States



The background of the slide is a grayscale image of a modern industrial factory. Several large, silver-colored robotic arms are visible, extending from the left and right sides towards the center. The arms are mounted on complex mechanical bases and are positioned as if they are working on a production line. The lighting is dramatic, with strong highlights and deep shadows, creating a sense of depth and precision. The overall atmosphere is one of advanced technology and automation.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida

The background of the slide is a grayscale photograph of a modern industrial factory. Several large, metallic robotic arms are visible, extending from the left and right sides towards the center. The arms are sleek and cylindrical, with various joints and sensors. The floor is polished and reflects the overhead lights. The overall atmosphere is clean, precise, and technologically advanced.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida



TEKNIKER participa en el proyecto europeo **EUCOM** - **Evaluating the Uncertainty in COordinate Measurement**.

Se trata de un proyecto financiado por la Unión Europea, en el marco EMPIR - **E**uropean **M**etrology **P**rogramme for **I**nnovation and **R**esearch.

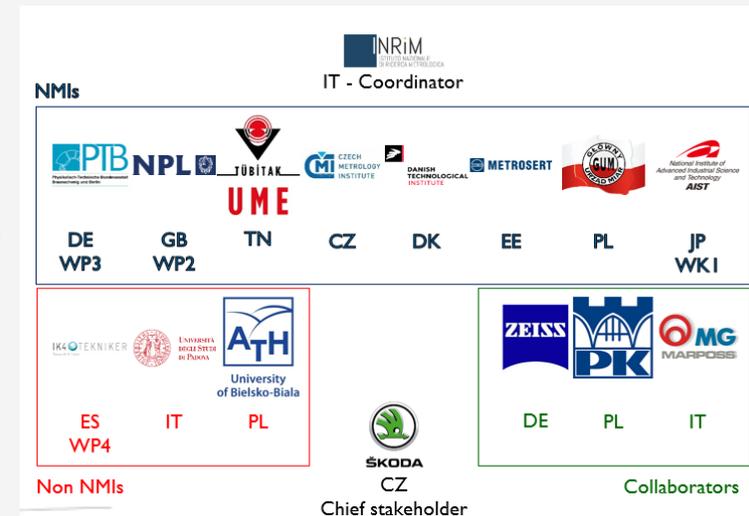
Proyecto **JRP** – Joint Research project (apartado de normativa).

Duración de 3 años (2018 – 2021).

Objetivo: Ayudar a la industria en la estimación de la incertidumbre de medición en las medidas con **Máquinas de Medir por Coordenadas** (MMC).

Resultado: Desarrollo de dos nuevos métodos para estimar la incertidumbre de medida en MMC.

- **A posteriori:** Cálculo de forma experimental realizando mediciones adicionales.
- **A priori:** Empleo de información previa a la medición.





La «**Metrología**» (del griego: Μέτρον, medida y λογία, tratado) se define como «**ciencia que se ocupa de la medida**». Es una ciencia básica, que juega un papel primordial en campos tales como la investigación y el desarrollo, la fabricación industrial, la medicina, las telecomunicaciones, el comercio, etc. [1].

El **Vocabulario Internacional de Metrología (VIM 2.2)** [2] define la metrología como la «Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones», incluyendo todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualesquiera que sean su incertidumbre de medida y su campo de aplicación.

La metrología establece las bases para:

- el estudio de las propiedades medibles,
- los sistemas de unidades de medida,
- los patrones, métodos y técnicas de medición, y su evolución,
- la trazabilidad metrológica,
- la valoración de la exactitud de las mediciones y su mejora y desarrollo constante.

[1] La metrología también existe. 1ª Edición – diciembre 2019. Centro Español de Metrología.

[2] Vocabulario Internacional de Metrología, Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. 3ª Edición – 2012. Centro Español de Metrología.



Las medidas han definido la sociedad, el gobierno y el progreso de los pueblos.

El género humano midió bastante antes de escribir y, consiguientemente, de leer.

La Metrología es probablemente la ciencia más antigua del mundo (> 5000 años).

Pocos de nosotros conocemos la relevancia de esta ciencia y su incidencia en la economía y la sociedad.

[1] La metrología también existe. 1ª Edición – diciembre 2019. Centro Español de Metrología.



[historia de la metrología by JUANUCHO JM \(prezi.com\)](#)



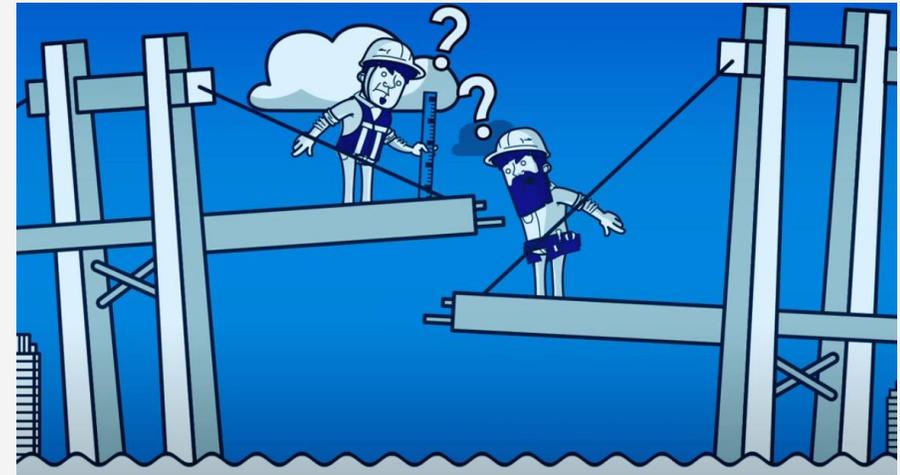
Todos somos usuarios y lo único que nos diferencia es la consciencia de ello y la capacitación que tengamos: **metrólogo profesional** y **metrólogo aficionado**. [1].

Tanto en nuestra vida cotidiana como en nuestra vida profesional, tomamos multitud de decisiones basadas en resultados de medida.

La sociedad confía en que los resultados de los instrumentos de medida sean fiables.

Los gobiernos legislan en materia de metrología para garantizar y favorecer la confianza en los resultados de medida y evitar, en lo posible, conflictos de intereses entre partes.

[1] La metrología también existe. 1ª Edición – diciembre 2019. Centro Español de Metrología.



[A world without Metrology - YouTube](#)



La metrología se suele clasificar en tres categorías:

- **Metrología Fundamental o Científica:** su objetivo es el desarrollo y mantenimiento de los patrones de medida, realizaciones prácticas de las definiciones de las unidades correspondientes.
- **Metrología Aplicada o Industrial:** relacionada con el aseguramiento de la exactitud de los instrumentos de medida utilizados en los procesos productivos y de control de la industria. (Proyecto **EUCOM**)
- **Metrología Legal:** enfocada al aseguramiento de la exactitud de los instrumentos de medida cuyos resultados puedan tener influencia sobre la transparencia de las transacciones comerciales, la salud o la seguridad de consumidores y usuarios, así como sobre el medio ambiente.

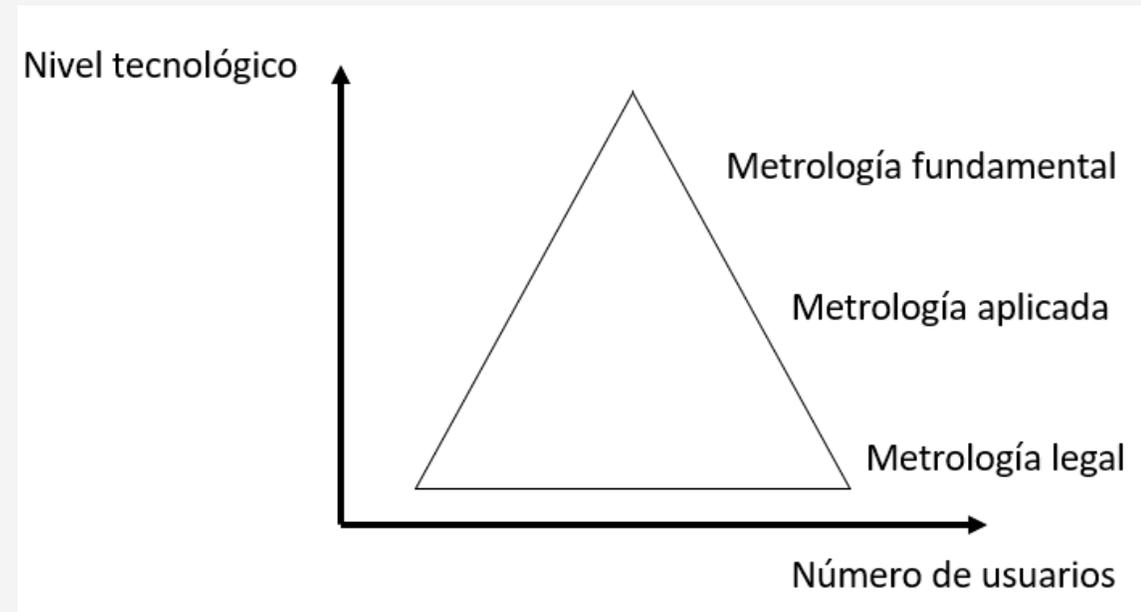
[1] La metrología también existe. 1ª Edición – diciembre 2019. Centro Español de Metrología.



Desarrollar y mejorar las capacidades de medida disponibles en un país, es esencial para potenciar y apoyar los procesos de innovación tecnológica y desarrollo industrial como elementos diferenciadores de las economías emergentes.

Los avances en metrología son básicos para la innovación, y potencian todas las áreas de la ciencia.

La metrología se considera un vector de competitividad en las sociedades tecnológicamente avanzadas.



The background of the slide is a grayscale photograph of a modern industrial factory. Several large, silver-colored robotic arms are visible, extending from the left and right sides towards the center. The arms are mounted on bases and appear to be part of a complex manufacturing or assembly line. The lighting is dramatic, with strong highlights and deep shadows, creating a sense of depth and scale. The overall atmosphere is one of precision and advanced technology.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

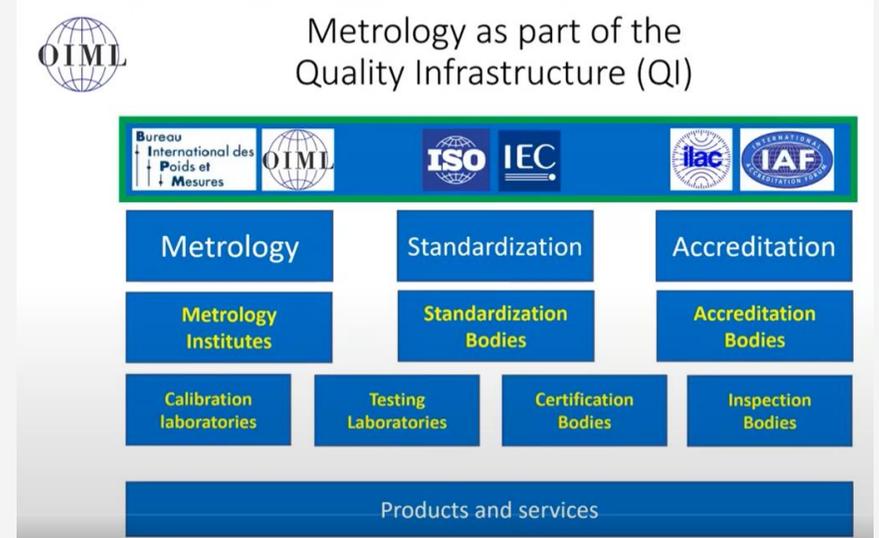
Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida



La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO) define la **infraestructura de calidad**.

Contribuye a los objetivos de política del gobierno en áreas como el desarrollo industrial, la competitividad comercial en los mercados globales, el uso eficiente de los recursos naturales y humanos, así como la seguridad alimentaria, la salud, el medio ambiente y el cambio climático.

La **metrología** como parte de la infraestructura de calidad, acompañada por la actividad de **Normalización/estandarización** y la actividad de **Acreditación**.



Para la aceptación y confianza de las medidas a nivel internacional se necesita **una estructura metrológica internacional** que potencie la armonización y el reconocimiento en el plano internacional, coordinando las diferentes infraestructuras metrológicas de los países.

La estructura Metrológica Internacional está compuesta primordialmente por:

- La **Convención del Metro** (Convention du Mètre).
- La **Conferencia General de Pesas y Medidas** (CGPM).
- El **Comité Internacional de Pesas y Medidas** (CIPM).
- La **Oficina Internacional de Pesas y Medidas** (BIPM).



El conjunto de Institutos Nacionales de Metrología (INM) del mundo se agrupan en **Organizaciones Regionales de Metrología**: ([JCRB members - BIPM](#))

EURAMET

COOMET

APMP

SIM

AFRIMETS

GULFMET



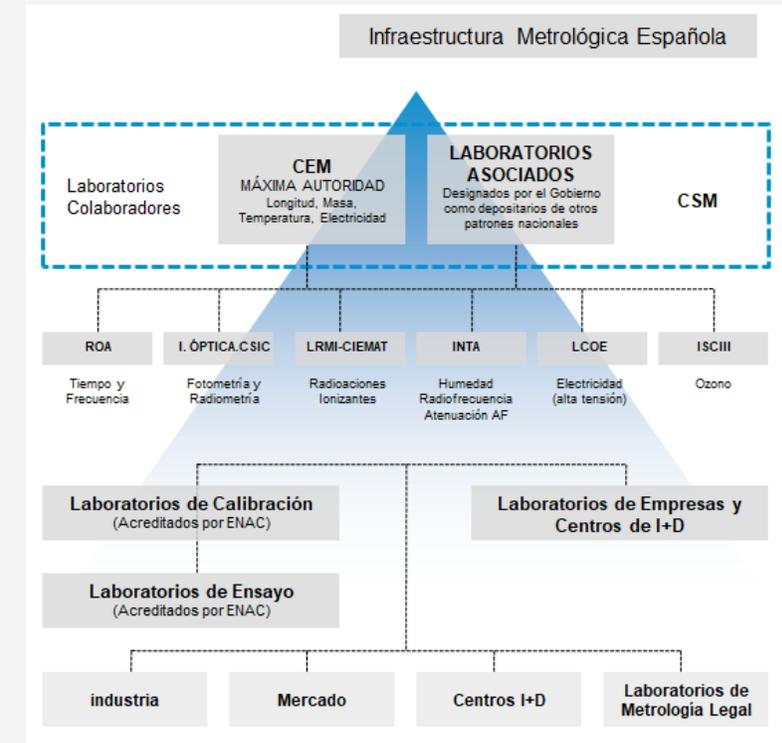
Esta estructura internacional se complementa con una infraestructura en metrología legal liderada por la **Organización Internacional de Metrología Legal (OIML)**.



La Metrología en España está coordinada por el **Consejo Superior de Metrología (CSM)**.

El rol fundamental del CSM en el ámbito científico es consolidar, coordinar y potenciar el conjunto de instituciones y laboratorios españoles con responsabilidades metrológicas, y generar políticas de cooperación entre ellos.

En España, las realizaciones prácticas de las unidades de medida (patrones nacionales) y su disseminación al resto de usuarios de la metrología se realiza por el **Centro Español de Metrología** y sus Laboratorios Asociados,

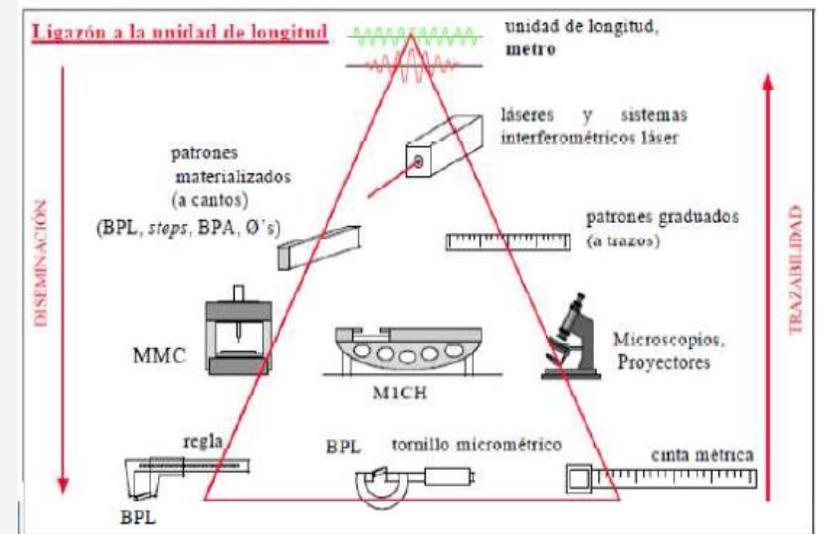


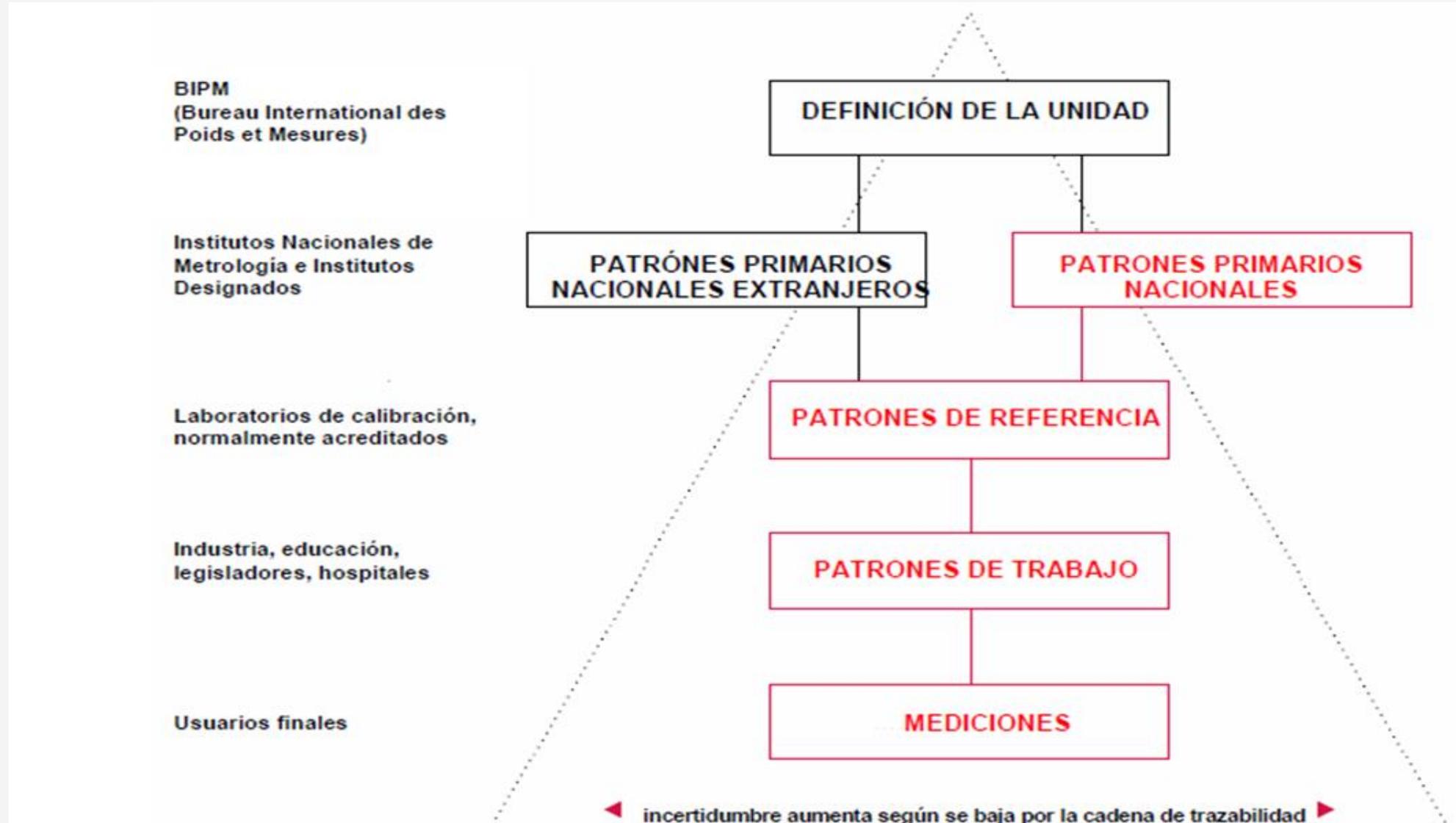


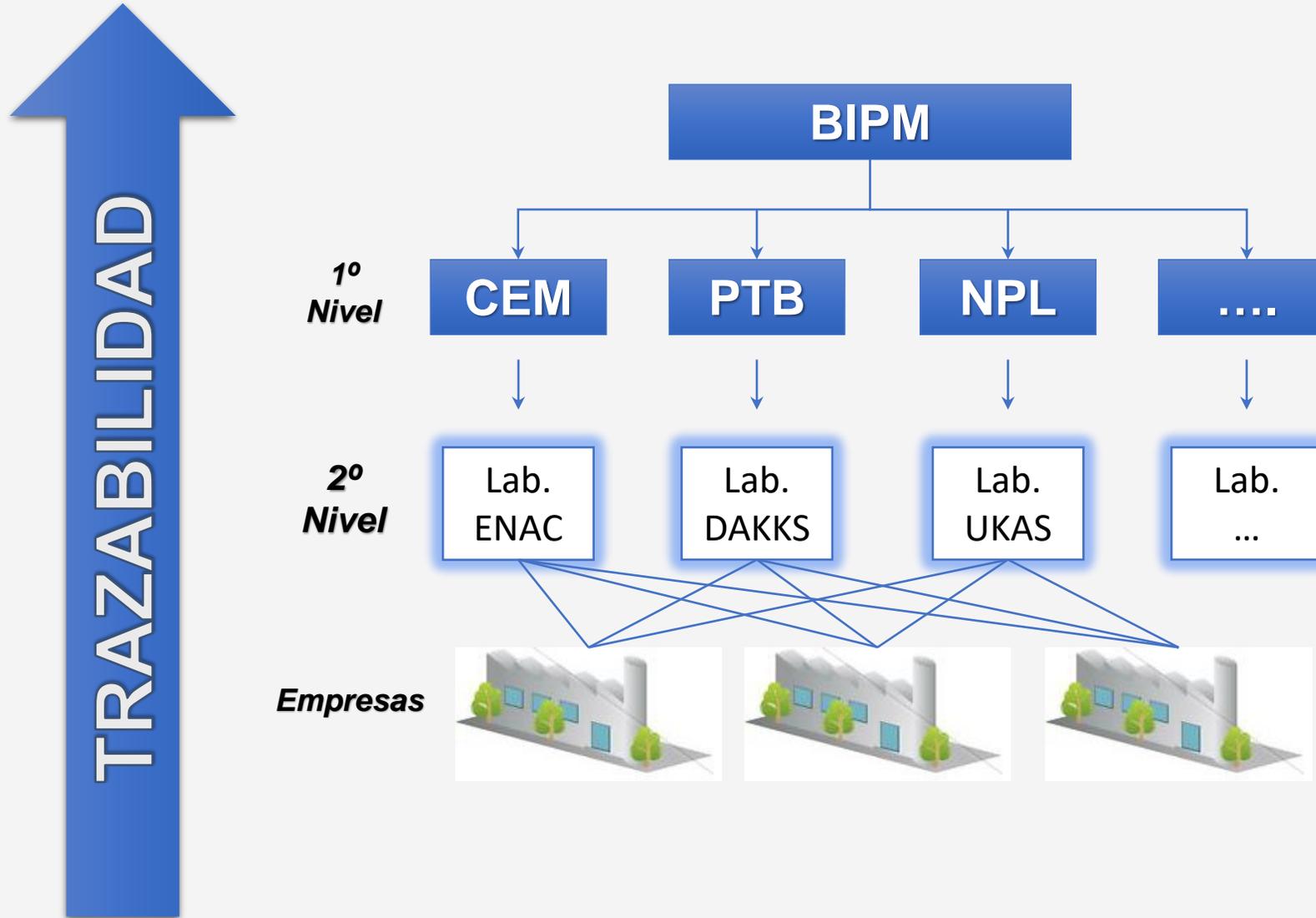
Trazabilidad metrológica: Propiedad por la cual el resultado de una medida puede relacionarse con una referencia mediante **una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones**, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

Esta propiedad es uno de los pilares para que los resultados de medida sean comparables entre sí.

La cadena ininterrumpida de comparaciones, desde el patrón de mayor nivel metrológico hasta el instrumento de medición habitual, se denomina cadena de trazabilidad metrológica.







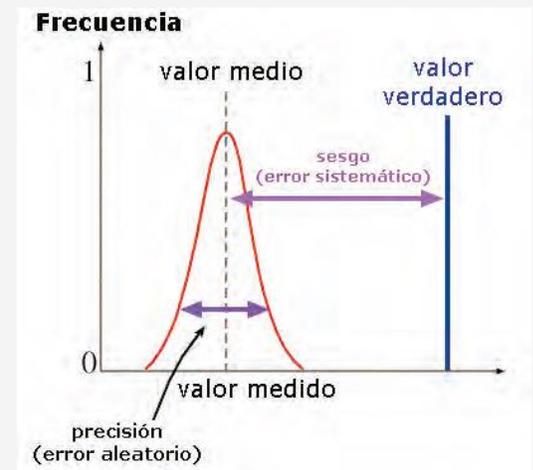


Error: Durante cualquier medición tienen lugar una serie de errores provenientes de distintas fuentes: el propio mensurando (definición y/o realización práctica), el instrumento de medida, las condiciones ambientales, el operador, etc., los cuales se clasifican en **sistemáticos** y **aleatorios**.

- Los primeros pueden cancelarse o corregirse, si se conocen sus causas.
- Los segundos son de comportamiento impredecible.

Ambos tipos de error contribuyen a la incertidumbre de medida, aunque debe quedar bien claro que son distintos de ésta.

- **Error de medida:** Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.
- **Error aleatorio:** Componente del error de medida que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible.
- **Error sistemático:** Componente del error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible.

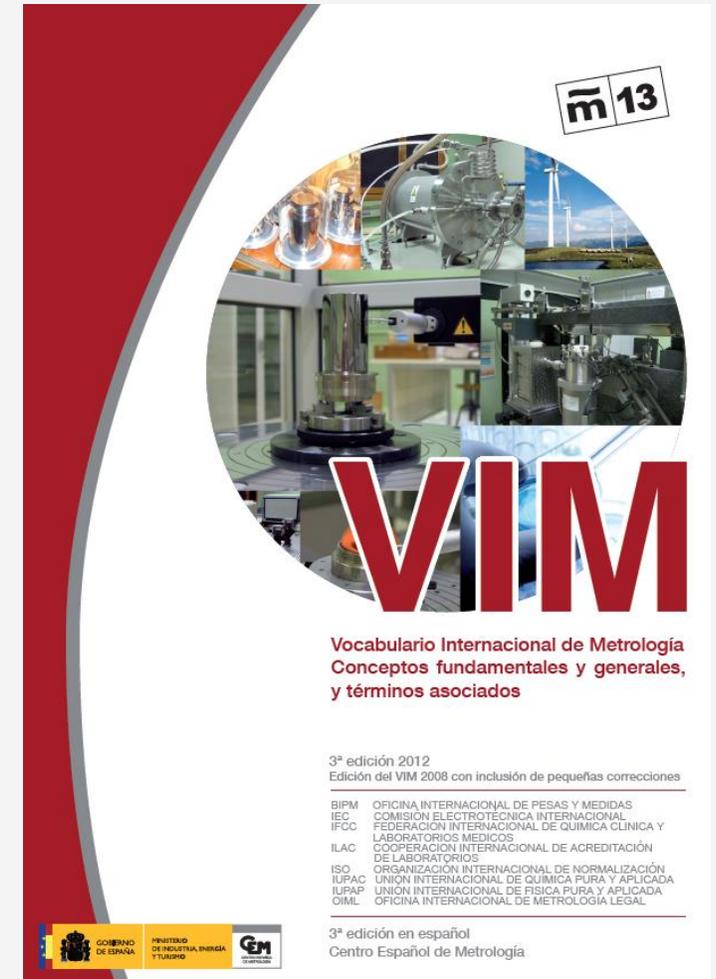




El **Vocabulario Internacional de Metrología (VIM)** es el documento que proporciona las definiciones de los conceptos metrológicos básicos que hay que conocer [2].

Conceptos como la definición de una magnitud, la medición, el mensurando, el patrón de medida, material de referencia...entre otros.

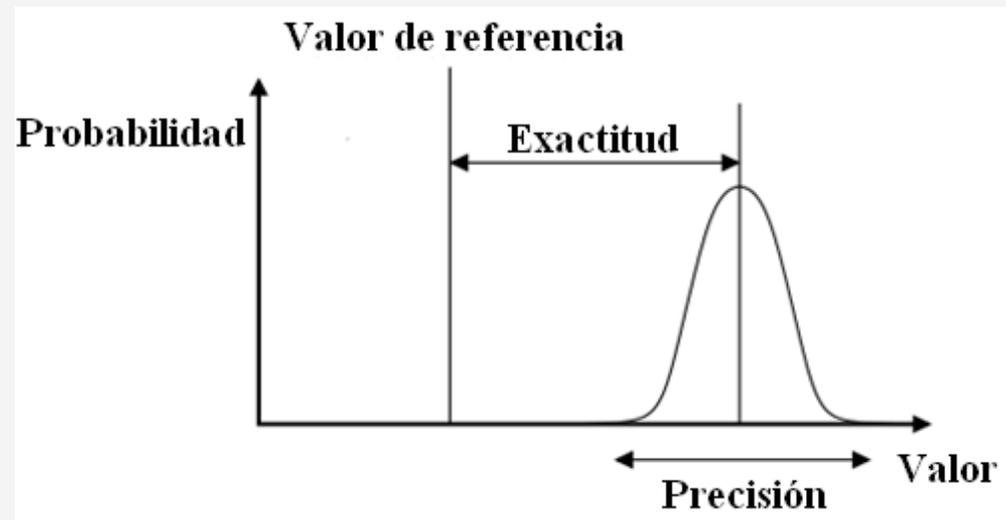
- **Exactitud:** Proximidad entre un valor verdadero y un valor medido.
- **Precisión:** Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares bajo condiciones especificadas.



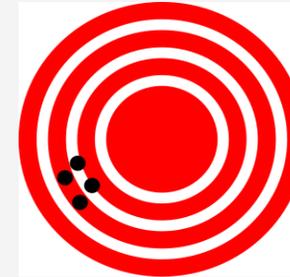
[2] Vocabulario Internacional de Metrología, Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. 3ª Edición – 2012. Centro Español de Metrología.



Exactitud y precisión:



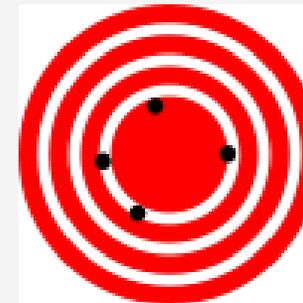
**Preciso
Poco Exacto**



***Precise but
inaccurate***



**Exacto
Poco Preciso**



***Accurate but
Imprecise***





A la hora de expresar el resultado de una medición de una magnitud física, **es obligado dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado**, de forma que quienes utilizan dicho resultado puedan evaluar su idoneidad. **Sin dicha indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas.**

Incertidumbre de medición: Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza [3]. La expresión del resultado de una medición está completa sólo cuando contiene tanto el valor atribuido al mensurando como la incertidumbre de medida asociada a dicho valor.

[3] JCGM 100:2008, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM 1995 con ligeras correcciones)

The background of the slide is a grayscale photograph of a modern industrial factory. Several large, metallic robotic arms are visible, extending from the left and right sides towards the center. The arms are highly detailed, showing joints, sensors, and various mechanical components. The lighting is dramatic, highlighting the metallic surfaces and creating deep shadows. The overall atmosphere is one of precision and advanced technology.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida



Según la definición en el VIM (International Vocabulary of Metrology – ISO/IEC Guide 99, § 2.26), la **incertidumbre de medida** se recoge como

“Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza”

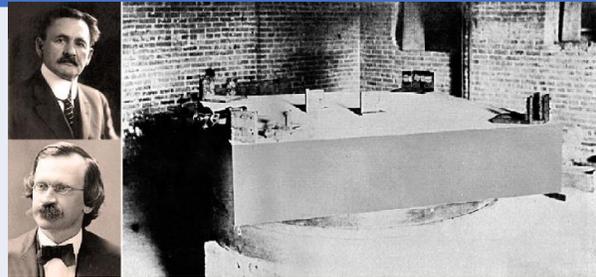
Además, la nota 2 dice: “El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiamplitud de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada”

La expresión de un resultado de una medición está completa solo cuando contiene tanto el valor atribuido al mensurando como la incertidumbre de medida asociada a dicho valor.

Toda medición está afectada por una incertidumbre de medida: el verdadero valor no puede conocerse con exactitud y se espera hallarlo, con una probabilidad de cobertura predefinida.

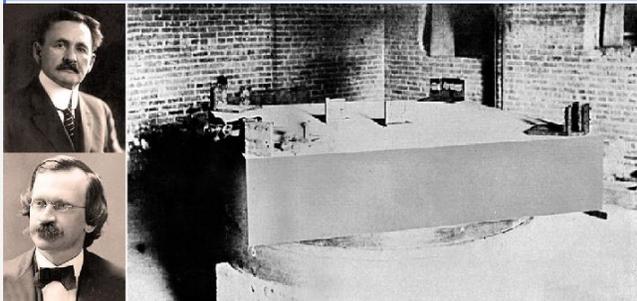


- ¿Para qué medimos?

Para ...	Típico en ...	Ejemplo
... investigar y saber más	Ciencia	
... diseminar la trazabilidad metrológica	Calibración	
... tomar decisiones en base a medidas	Inspección	



- ¿Por qué es la incertidumbre de medición tan importante?



Al confrontar una teoría, permite confirmar que el valor contradice la teoría.
Al apoyar una teoría, permite saber hasta dónde llega su validez.
Al investigar propiedades, permite a otros saber cómo de bien han sido estudiadas.

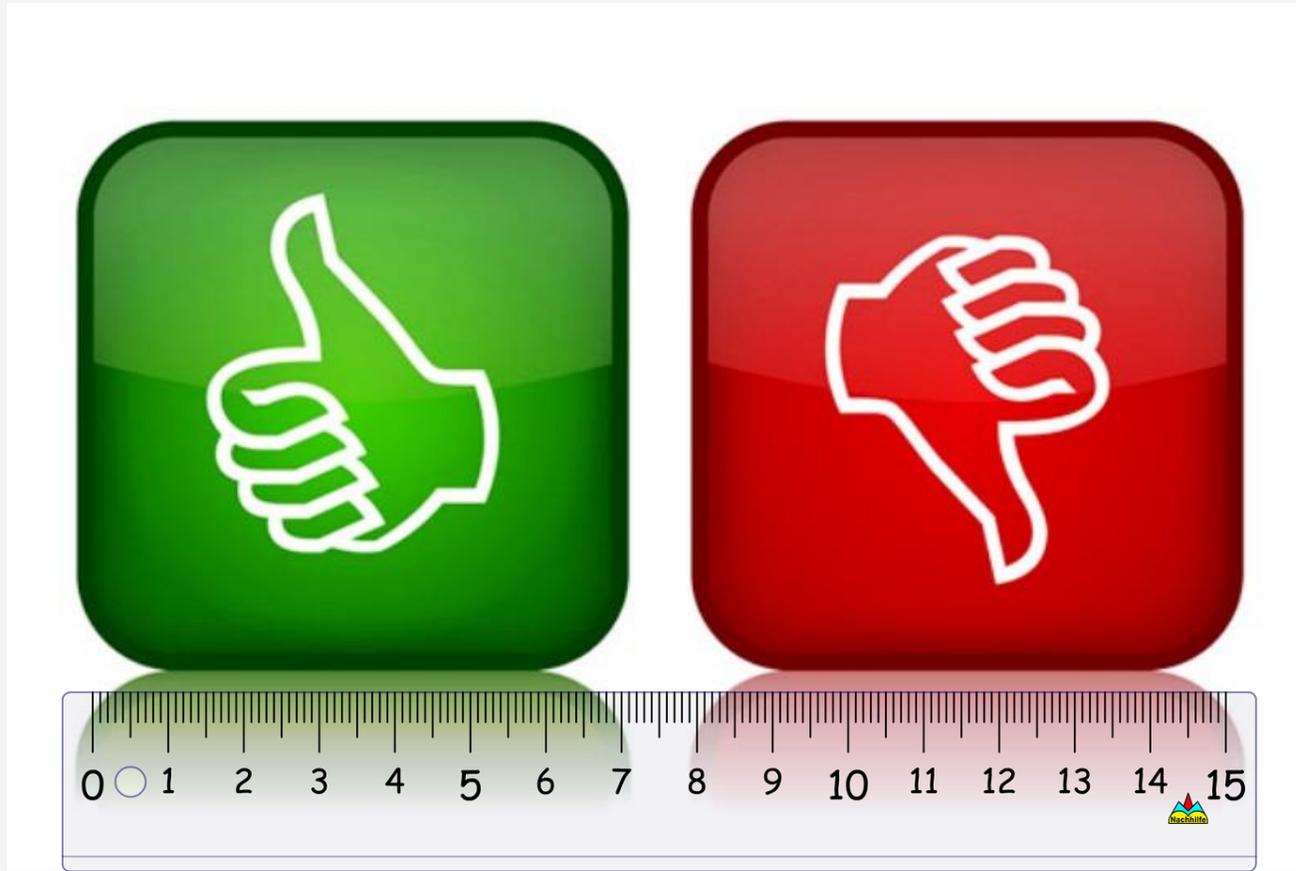


Permite a otros:
Propagar la trazabilidad metrológica.
Saber cómo de buena es una calibración.
Usando un instrumento calibrado calibrar a su vez otros instrumentos.
Decidir en base a los valores de calibración.



Permite tomar decisiones bien informadas basadas en medidas.

- La importancia de la incertidumbre de medición en la toma de decisión





- ¿Por qué es tan importante la incertidumbre de medición en la toma de decisión?

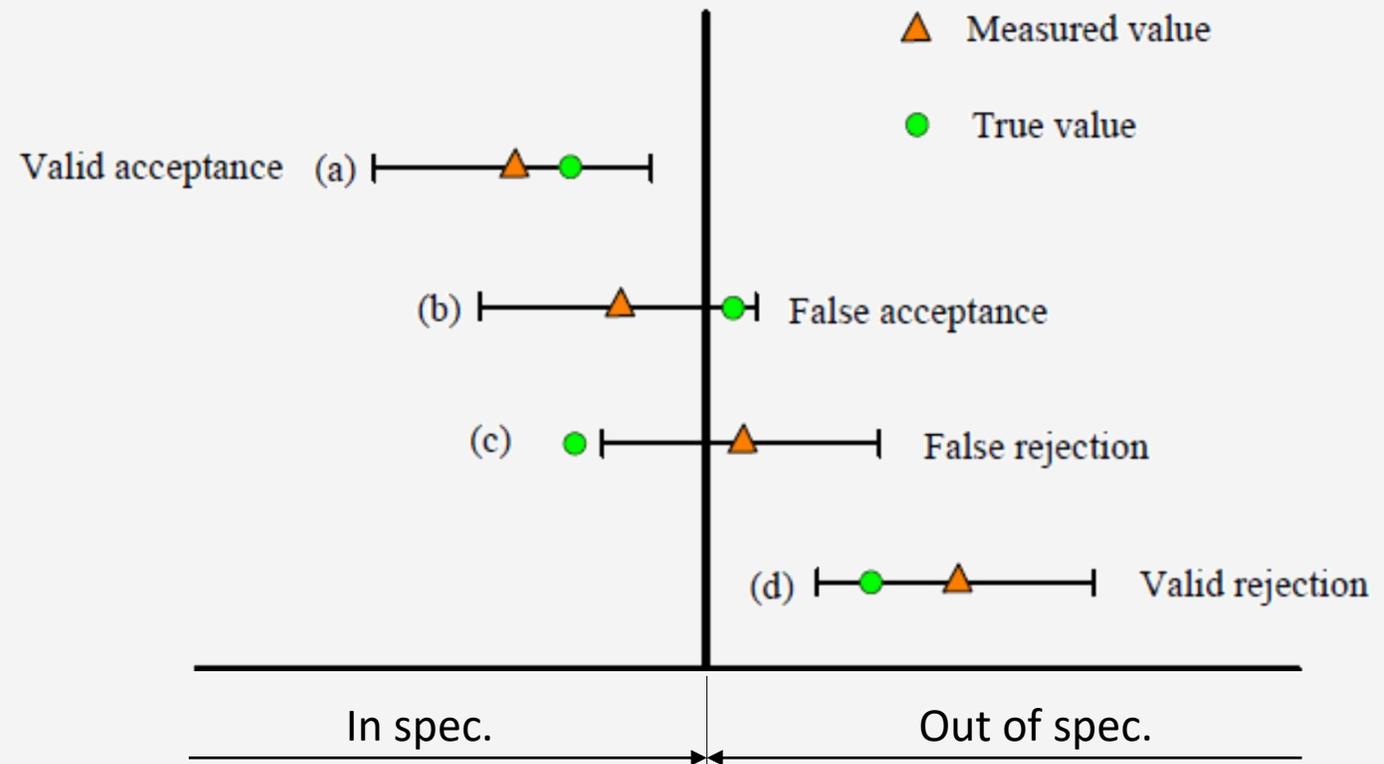
“Certeza”: Conocimiento seguro y claro que se tiene de algo.

Rara vez en una toma de decisión se tiene certeza absoluta.

El riesgo existe:

- Falsa aceptación (riesgo para el consumidor)
- Falso rechazo (riesgo para el productor)

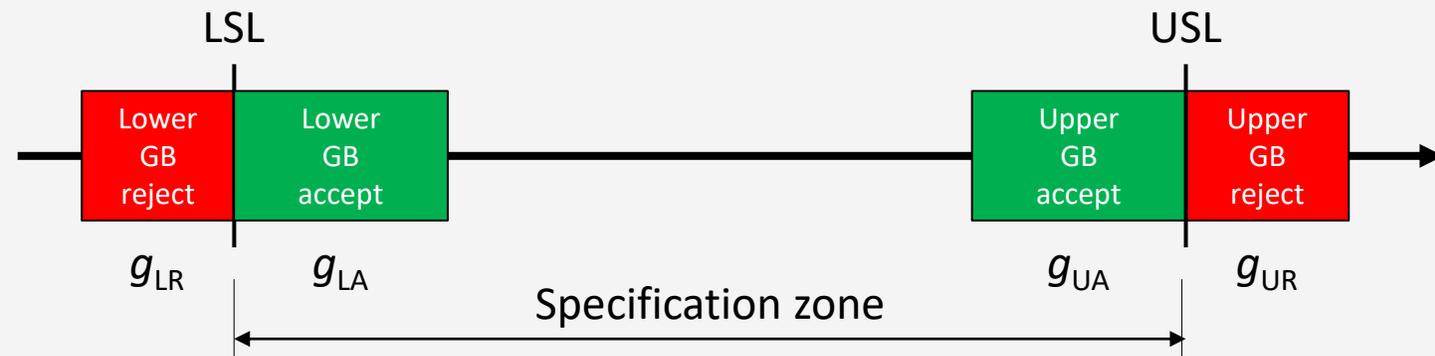
Las inconveniencias de las falsas decisiones puede llegar a ser catastrófico.



ISO/IEC Guide 98-4 Figure 8



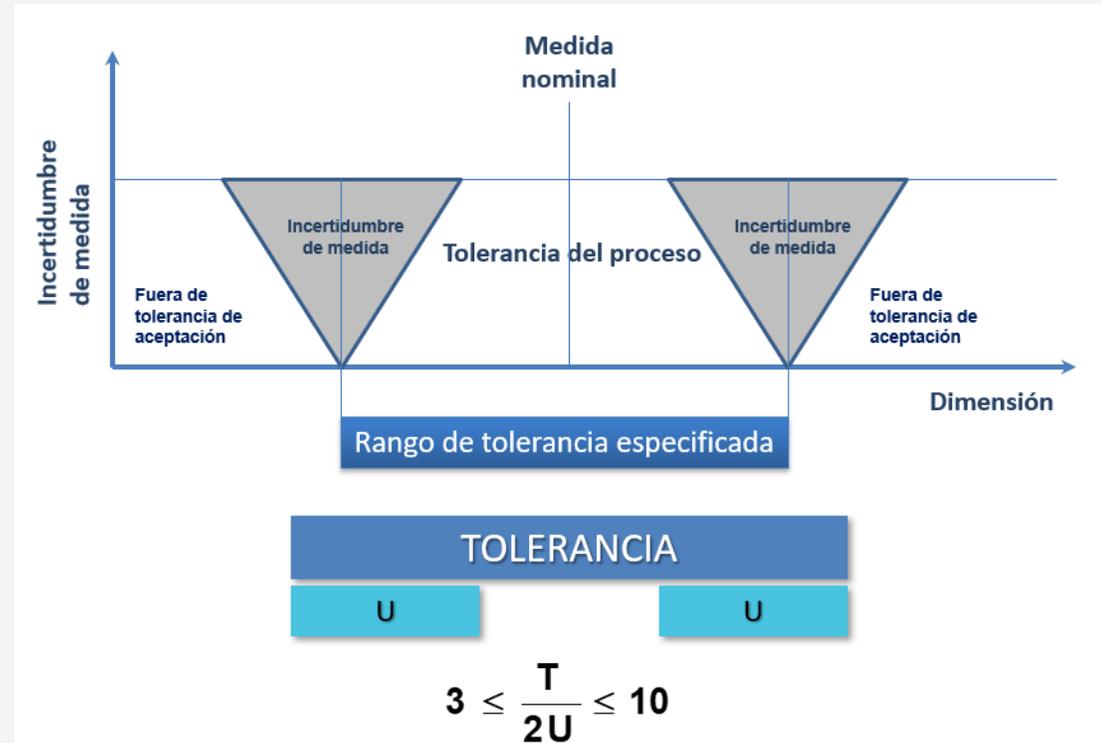
- ¿Qué criterio podemos emplear para reducir el riesgo?
 - Cuando el resultado de una medición está lejos de los límites de la tolerancia, no hay problema.
 - Cuando no lo está, es importante emplear bandas de seguridad, “gLA”.
 - La probabilidad de conformidad es la probabilidad de que el verdadero valor esté situado dentro de la zona de especificación.
 - Para definir esta banda de seguridad, se emplea la incertidumbre típica de medida. ($g = 1.65 \times u$ según ISO 14253–1)





Cuanto menor se la incertidumbre de medición, mayor será la zona de conformidad.

Un equilibrio adecuado U/T: Se considera que con valores superiores a 10 el coste metrológico aumenta más que su beneficio y por debajo de 3 se van a rechazar un porcentaje elevado de productos que son conformes





Las Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) se emplean para verificar la conformidad de los componentes con sus especificaciones, lo que está sujeto a la Norma ISO 14253-1 “Reglas de decisión para verificar la conformidad o no conformidad con las especificaciones”.

Importante: Definir bandas de seguridad para protegernos de falsas decisiones, lo que a su vez, nos lleva a cuantificar la incertidumbre de medición.

En los casos comunes, para un límite de probabilidad de conformidad del 95% y una función de densidad de probabilidad (PDF) normal, la incertidumbre típica de medida es suficiente para definir estas bandas de seguridad.

El cálculo de incertidumbre nos permite definir las bandas de seguridad, sin ello, no tenemos bandas seguridad, nos quedamos sin protección y el riesgo para una toma de decisión errónea es mayúsculo. (No cumplimos la ISO 14253-1)

The background of the slide is a grayscale photograph of a modern industrial factory. Several large, silver-colored robotic arms are visible, extending from the left and right sides towards the center. The arms are mounted on complex mechanical bases and are positioned as if they are working on a production line. The lighting is dramatic, with strong highlights and deep shadows, creating a sense of depth and scale. The overall atmosphere is one of precision and advanced technology.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida

¿Qué estándares abordan la estimación de la incertidumbre de medición para una MMC)

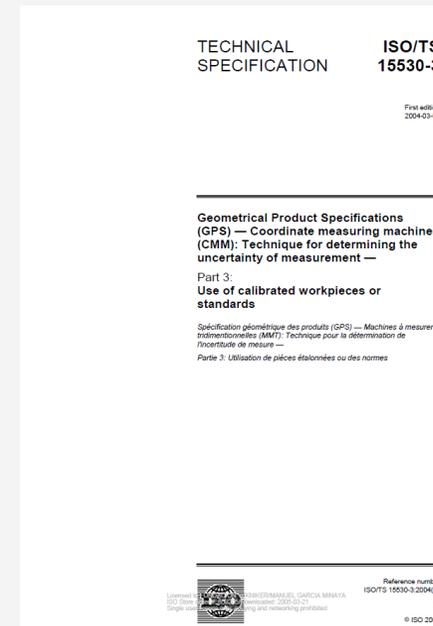
- **GUM:** “Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida” establece las reglas generales pero su aplicación a la MMC es realmente complicado.
- **ISO 10360:** Se aborda la aceptación y la verificación de las MMCs, no tanto el cálculo de incertidumbre en el uso de la MMC.
- Otras referencias (**ISO/TS 23165, ISO/TS 17865**) plantean la incertidumbre de medición del proceso de verificación, no del uso de la MMC.
- **ISO 14253-2** habla de la incertidumbre de medición en general, pero no especifica sobre su aplicación a las MMCs.





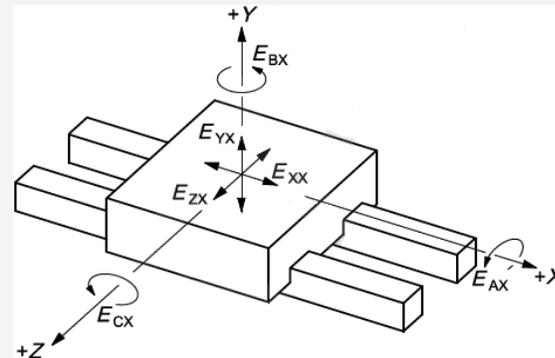
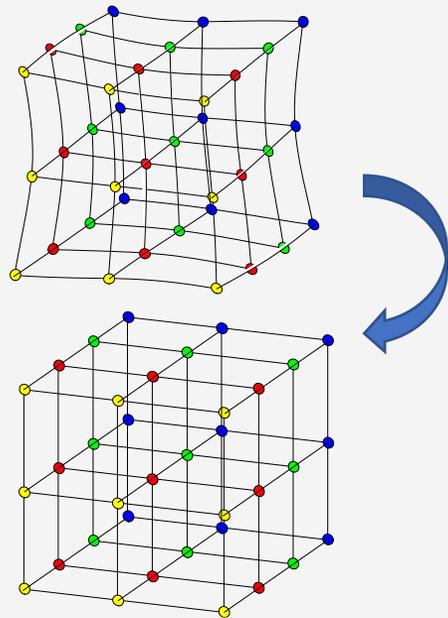
¿Qué estándares abordan la estimación de la incertidumbre de medición para una MMC)

- **ISO 15530:** su objetivo principal es establecer las bases para el cálculo de la incertidumbre de medición en MMC.
 - Parte 1 (2013): Buen tutorial pero no es operativo.
 - Parte 2: Método a posteriori. El comité ISO/TC213/WG10 abordó el proyecto en el año 2000, pero se abandonó en 2008 por falta de recursos.
 - Parte 3 (2011): Plantea el uso de una pieza patrón.
 - Parte 4 (2008): Método de simulación.
 - Parte 5: Basado en el juicio del experto, sin abordar.





- La modelización de una MMC puede llegar a ser muy compleja



ISO 230-1 Figure 3

$$e = t_x + t_y + t_z + r_x \times h_x + r_y \times h_y + r_z \times h_z$$

Error functions (18)

$$t_x = \begin{pmatrix} t_{xx} \\ t_{xy} \\ t_{xz} \end{pmatrix}, t_y = \begin{pmatrix} t_{yx} \\ t_{yy} \\ t_{yz} \end{pmatrix}, t_z = \begin{pmatrix} t_{zx} \\ t_{zy} \\ t_{zz} \end{pmatrix}$$

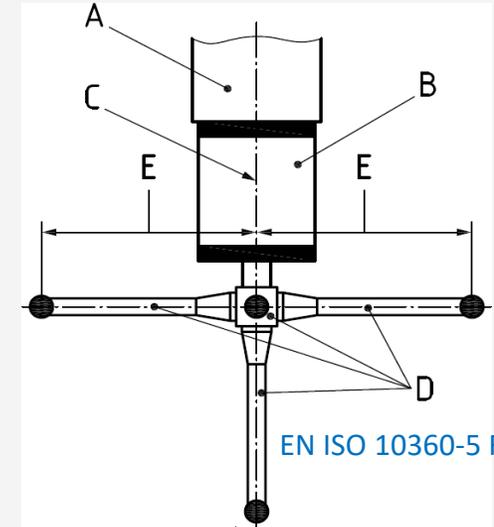
$$r_x = \begin{pmatrix} r_{xx} \\ r_{xy} \\ r_{xz} \end{pmatrix}, r_y = \begin{pmatrix} r_{yx} \\ r_{yy} \\ r_{yz} \end{pmatrix}, r_z = \begin{pmatrix} r_{zx} \\ r_{zy} \\ r_{zz} \end{pmatrix}$$

Effective Abbe arms

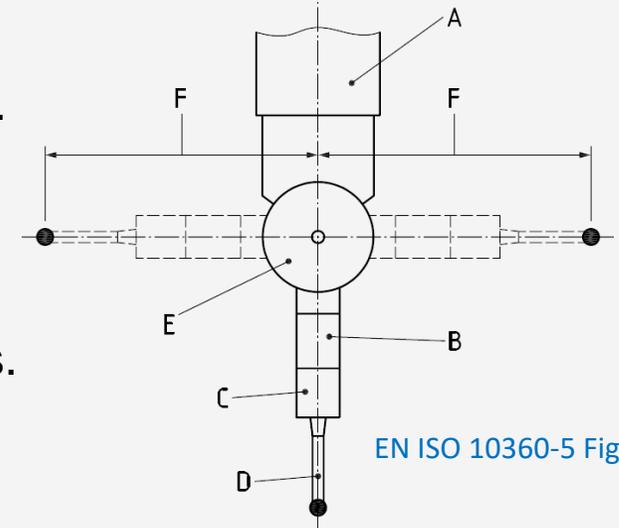
$$h_x = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y + s_y \\ p_z + s_z \end{pmatrix}, h_y = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z + s_z \end{pmatrix}, h_z = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$



- El palpador es una fuente de incertidumbre importante:
 - Es muy configurable en función de la geometría del componente que se desea medir.
 - Un comportamiento no homogéneo del palpador en el espacio.
 - La longitud del palpador agrava los giros parásitos e inesperados.
 - En palpadores multi-punta la configuración de los palpadores y sus palpadores también limitan la precisión alcanzable, además de afectar directamente al proceso de cualificación de palpadores.



EN ISO 10360-5 Figure 6



EN ISO 10360-5 Figure 8



• Resumiendo...

Specification	Sampling	Computing
<p>No (definitional) uncertainty if the specification is unambiguous (very often is not)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Geometry: <ul style="list-style-type: none"> The number of input quantities is very high (200+) Usually highly correlated • Probing system <ul style="list-style-type: none"> Anisotropy Stylus length-dependant response Qualification errors • Temperature <ul style="list-style-type: none"> Deformation is almost unpredictable Different CMM components react with different time constants, resulting in pulsating behaviours • Workpiece: <ul style="list-style-type: none"> Form errors ↔ sampling Roughness 	<ul style="list-style-type: none"> • Versatility: <ul style="list-style-type: none"> Each measurement can be substantially different from any other • Lack of closed form <ul style="list-style-type: none"> The measurement model $y = f(x_1, \dots, x_N)$ is not available, rather iterative algorithms are used Propagation through Jacobian matrices is possible, to be done case by case • Ill-condition <ul style="list-style-type: none"> Some measurands are intrinsically ill-conditioned The ill-condition can be either reduced (e.g. by proper parameterisation) or amplified (e.g. by bad algorithms)

A photograph of several industrial robotic arms in a factory setting. The arms are metallic and have a complex, multi-jointed design. They are arranged in a line, with the one in the foreground being the most prominent. The background shows a large industrial building with a grid-like ceiling structure. The overall scene is brightly lit, highlighting the metallic surfaces of the robots.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida

GUM: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida.

Documento elaborado por el Grupo de Trabajo 1 del Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM / WG 1).

Los derechos de autor pertenece a las organizaciones miembros del JCGM (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML).

En 1977, reconociendo la falta de consenso internacional sobre la forma de expresar la incertidumbre de medida, la más alta autoridad mundial en metrología, el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), pidió a la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) que abordara el problema junto con los laboratorios nacionales de metrología, y que hiciera una recomendación.

El BIPM preparó un cuestionario detallado, considerando todos los problemas, y lo difundió entre 32 laboratorios nacionales de metrología interesados en el tema.

En 1979, se recibieron las respuestas de 21 laboratorios. Casi todos eran partidarios de contar con un procedimiento aceptado internacionalmente para expresar la incertidumbre de medida y para combinar las componentes individuales de la incertidumbre en una única incertidumbre global.

El BIPM convocó una reunión, con el propósito de llegar a un procedimiento uniforme y aceptado por la generalidad para la especificación de la incertidumbre; asistieron expertos de 11 laboratorios nacionales de metrología. Este Grupo de Trabajo sobre la Expresión de las Incertidumbres preparó la Recomendación INC-1 (1980), Expresión de las Incertidumbres Experimentales. El CIPM aprobó la citada Recomendación en 1981 y la refrendó en 1986.





Recordamos que..

La expresión del resultado de una medición está completa sólo cuando contiene tanto el valor atribuido al mensurando como la incertidumbre de medida asociada a dicho valor.

La **incertidumbre de medida** es un parámetro no negativo, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando

GUM: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida.



Formulation

- define output quantity Y
- determine input quantities X_i
- develop a model $Y=f(X_1, \dots, X_n)$ or $h(X_i, y)=0$
- assign distributions to input quantities (type A and B evaluation)

Propagation

Analytical

Monte Carlo Method

GUM uncertainty framework



theoretical (e.g. trapezoidal)

discrete representation (histogram)

Gauss or t -distribution

Probability distribution of Y

Summarizing

coverage interval, standard uncertainty, ...



GUM: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [3].

El proceso general que plantea la GUM para el cálculo de incertidumbre de medición es el siguiente.

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

La función f representa el procedimiento de medida y el método de evaluación. La función modelo puede responder a una expresión analítica simple o a una relación mucho más complicada.

- En la mayoría de los casos, el mensurando Y no se obtiene directamente y se obtiene de otras “ N ” magnitudes. Por lo tanto, el siguiente paso es obtener una estimación utilizando las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N de las magnitudes X_1, X_2, \dots, X_N , tal que:

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

[3] JCGM 100:2008, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM 1995 con ligeras correcciones)



GUM: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [3].

El proceso general que plantea la GUM para el cálculo de incertidumbre de medición es el siguiente.

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

Tipo A: magnitudes cuyo valor estimado y cuya incertidumbre asociada se determinan directamente en la medición. Estos valores pueden obtenerse, por ejemplo, a partir de una única observación, de observaciones reiteradas o juicios basados en la experiencia. Pueden requerir la determinación de correcciones en las lecturas de los instrumentos o de las magnitudes de influencia, como la temperatura ambiental, la presión barométrica o la humedad relativa.

Tipo B: magnitudes cuyo valor estimado e incertidumbre asociada se incorporan a la medición desde fuentes externas, tales como magnitudes asociadas a patrones de medida calibrados, materiales de referencia certificados o datos de referencia obtenidos de manuales, especificaciones del fabricante...

En el caso de las variables aleatorias, se utiliza como medida de la dispersión de los valores, la **varianza** de su distribución o la **raíz cuadrada positiva de la varianza**, denominada **desviación típica**. La incertidumbre típica de medida asociada a la estimación de salida o resultado de medida 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 valor estimado tiene la misma dimensión que éste.

[3] JCGM 100:2008, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM 1995 con ligeras correcciones)



GUM: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [3].

El proceso general que plantea la GUM para el cálculo de incertidumbre de medición es el siguiente.

- Una vez identificado el tipo de distribución de cada magnitud de entrada (normal, rectangular, triangular, en forma de U...)...se expresan la desviación típica de cada una en forma de **u(xi)**.
- **Cálculo de la incertidumbre típica de la estimación de salida**
- **Magnitudes de entrada no correlacionada:** Se obtiene la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ como raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $u_c^2(y)$.

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

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

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

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1, X_2=x_2, \dots}$$

donde f es la función que liga las magnitudes de entrada X_i con el mensurando Y. Cada $u(x_i)$ es una incertidumbre típica evaluada como se describe en a) (evaluación Tipo A) o en b) (evaluación Tipo B). La incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ es una desviación típica estimada y caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser razonablemente atribuidos al mensurando Y.

El coeficiente de sensibilidad 'ci' describe el grado en que la que la estimación de salida y está influida por las variaciones en la estimación de entrada xi. Puede evaluarse a partir de la función modelo f o utilizando métodos numéricos.

[3] JCGM 100:2008, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM 1995 con ligeras correcciones)



GUM: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [3].

El proceso general que plantea la GUM para el cálculo de incertidumbre de medición es el siguiente.

Cálculo de la incertidumbre típica de la estimación de salida

- **Magnitudes de entrada correlacionadas:** Si dos magnitudes de entrada X_i y X_k están correlacionadas en cierto grado, es decir, si son mutuamente dependientes de una forma u otra, su covarianza también tiene que considerarse como contribución a la incertidumbre. En este caso, la expresión adecuada para la varianza combinada $u_c^2(y)$ asociada al resultado de medida es:

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

$$u(x_i, x_k) = u(x_i)u(x_k)r(x_i, x_k) \quad (i \neq k)$$

tiene que considerarse como una contribución adicional a la incertidumbre. El grado de correlación se caracteriza por el **coeficiente de correlación** $r(x_i, x_k)$ (donde $i \neq k$ y $|r| < 1$).

La covarianza asociada a los valores estimados de dos magnitudes de entrada X_i y X_k puede considerarse igual a cero o insignificante si

- las magnitudes de entrada X_i y X_k son independientes.
- cualquiera de las magnitudes de entrada X_i y X_k puede tratarse como constante.

[3] JCGM 100:2008, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM 1995 con ligeras correcciones)



GUM: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [3].

El proceso general que plantea la GUM para el cálculo de incertidumbre de medición es el siguiente.

Cálculo de la incertidumbre típica de la estimación de salida

El análisis de la incertidumbre de una medición – a veces llamado balance de incertidumbre – debe incluir una lista de todas las fuentes de incertidumbre, junto con las incertidumbres típicas de medida asociadas y los métodos para evaluarlas. En el caso de mediciones repetidas, debe indicarse también el número n de observaciones. Para mayor claridad, se recomienda presentar los datos pertinentes para ese análisis en forma de tabla. En esa tabla, las magnitudes deben expresarse mediante un símbolo físico X_i o un identificador breve. Para cada una de ellas debe indicarse, al menos, el valor estimado x_i , la incertidumbre típica de medida asociada $u(x_i)$, el coeficiente de sensibilidad c_i y las diferentes contribuciones a la incertidumbre $u_i(y)$. Junto con los valores numéricos de la tabla debe indicarse la unidad de medida de cada magnitud.

Magnitud	Estimación	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
X_i	x_i				
X_1	x_1	$u(x_1)$		c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$		c_2	$u_2(y)$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
X_N	x_N	$u(x_N)$		c_N	$u_N(y)$
Y	y				$u(y)$

quantity	estimate	standard uncertainty $u(x_i)$	probability distribution	sensitivity coefficient c_i	uncertainty contribution $u_i(y)$
m_s	10 000,005 g	22,5 mg	normal	1,0	22,5 mg
δm_p	0,000 g	8,95 mg	rectangular	1,0	8,95 mg
δm	0,020 g	14,4 mg	normal	1,0	14,4 mg
δm_c	0,000 g	5,77 mg	rectangular	1,0	5,77 mg
δB	0,000 g	5,77 mg	rectangular	1,0	5,77 mg
m_x	10 000,025 g				29,3 mg

[3] JCGM 100:2008, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM 1995 con ligeras correcciones)



GUM: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [3].

El proceso general que plantea la GUM para el cálculo de incertidumbre de medición es el siguiente.

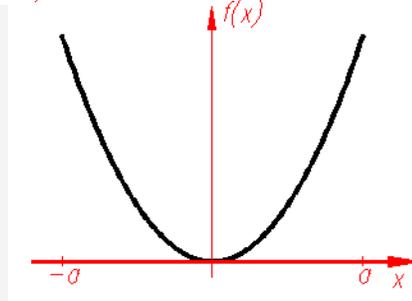
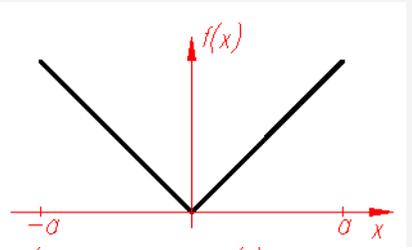
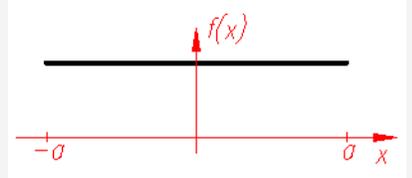
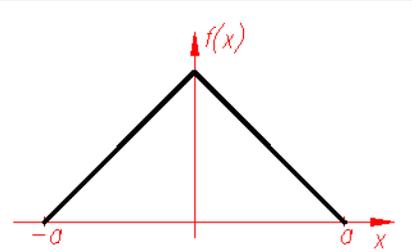
Cálculo de la incertidumbre expandida de medida

Se obtiene multiplicando la incertidumbre típica $u(y)$ de la estimación de salida y por un **factor de cobertura k** :

$$U = k * u(y)$$

Cuando se puede atribuir una distribución normal (gaussiana) al mensurando y la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida tiene suficiente fiabilidad, debe utilizarse el factor de cobertura usual $k = 2$. La incertidumbre expandida asociada corresponde a una **probabilidad de cobertura de, aproximadamente, un 95%**. Estas condiciones se cumplen en la mayoría de los casos en calibración.

[3] JCGM 100:2008, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM 1995 con ligeras correcciones)



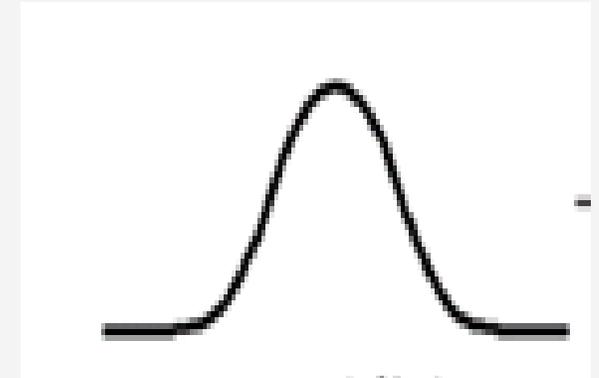
$$u_1 = a_1 \times b_1 \rightarrow$$

$$u_2 = a_2 \times b_2 \rightarrow$$

$$u_3 = a_3 \times b_3 \rightarrow$$

$$u_n = a_n \times b_n \rightarrow$$

$$Y = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$$



Uncertainty propagation law

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



- Parece complicado aplicarlo en una MMC...

Length independent		213 nm				
No	Item	Size	Unit	Type	u	Unit
1	Probing error (WS measurement)	100	nm	B	58	nm
2	Probing error (RS measurement)	100	nm	B	58	nm
3	Repeatability	230	nm	A	66	nm
4	Reproduceability	234	nm	A	68	nm
5	Form error	100	nm	B	50	nm
6	Error propagation	40	nm	B	40	nm
7	Geometrical error of CMM	150	nm	B	87	nm
8	RS calibration value (uni-directional)	134	nm	B	134	nm
Length dependent		252 nm/m				
No.	Item	Size	Unit	Type	u	Unit
9	Abbe error	23	urad/m	B	7	nm
10	Scale compensation	109	nm/m	B	109	nm
11	CTE of WS	5.E-07	/K	B	2	nm
12	CTE of RS	5.E-07	/K	B	0	nm
13	Temperature measurement (WS)	5	mK	B	0	nm
14	Temperature measurement (RS)	7	mK	A	0	nm
15	Thermal drift (WS measurement)	5	mK	B	0	nm
16	Thermal drift (RS measurement)	24	mK	A	0	nm
17	Cosin error	0.1	mm/mm	B	0	nm
18	RS calibration value (uni-directional)	227	nm	B	227	nm

The background of the slide is a grayscale photograph of a modern industrial factory. Several large, silver-colored robotic arms are visible, extending from the left and right sides towards the center. The arms are mounted on complex mechanical bases. The lighting is dramatic, with strong highlights and deep shadows, creating a sense of depth and precision. The overall atmosphere is one of advanced technology and manufacturing.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida



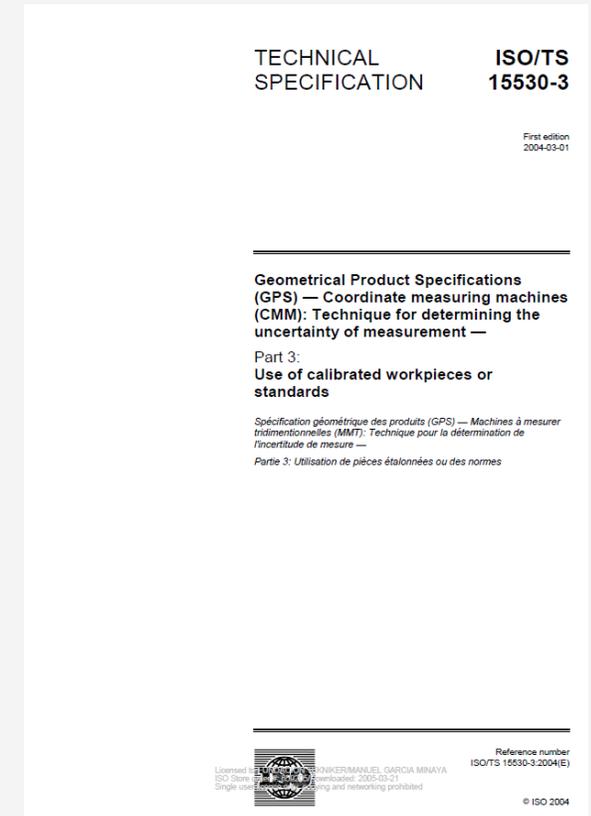
Como alternativa de la aplicación de la GUM al cálculo de incertidumbre de una medición realizada en una MMC...

ISO 15530-3 (2011) Plantea el uso de una pieza patrón similar al mensurando.

El objetivo de esta norma es simplificar el cálculo de incertidumbre en la MMC ya que no exige realizar un análisis detallado de cada una de las magnitudes de entrada.

También conocido como el método de la sustitución por emplear un patrón similar (dimensión y forma) al mensurando.

En muchos casos, es una aproximación idónea ya que la fabricación de una pieza patrón puede ser asequible desde el punto de vista técnico y económica.





Se debe cumplir el requisito de similaridad según se especifica en el punto 5.2 de la Norma

Subject	Requirements	
Dimensional characteristics	Dimensions	Identical within: — 10 % beyond 250 mm — 25 mm below 250 mm
	Angles	Identical within $\pm 5^\circ$
Form deviations and surface texture	Similar due to functional properties	
Material (e.g. thermal expansion, elasticity, hardness)	Similar due to functional properties	
Measuring strategy	Identical	
Probe configuration	Identical	

Fuentes de incertidumbre a considerar:

- Procedimiento de medición (u_p , incertidumbre típica asociado al proceso)
- Calibración del patrón (u_{cal} , incertidumbre típica asociado a la calibración del patrón)
- Debido a la variación del mensurando. (u_w , incertidumbre típica asociado a la variación del material y del propio mensurando)
- Error sistemático, u_b (En caso de no ser corregido)



Aplicando la ley de propagación de incertidumbre:

$$U = k * \sqrt{u_b^2 + u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2}$$

Realizando un desglose de las magnitudes de entrada según la GUM.

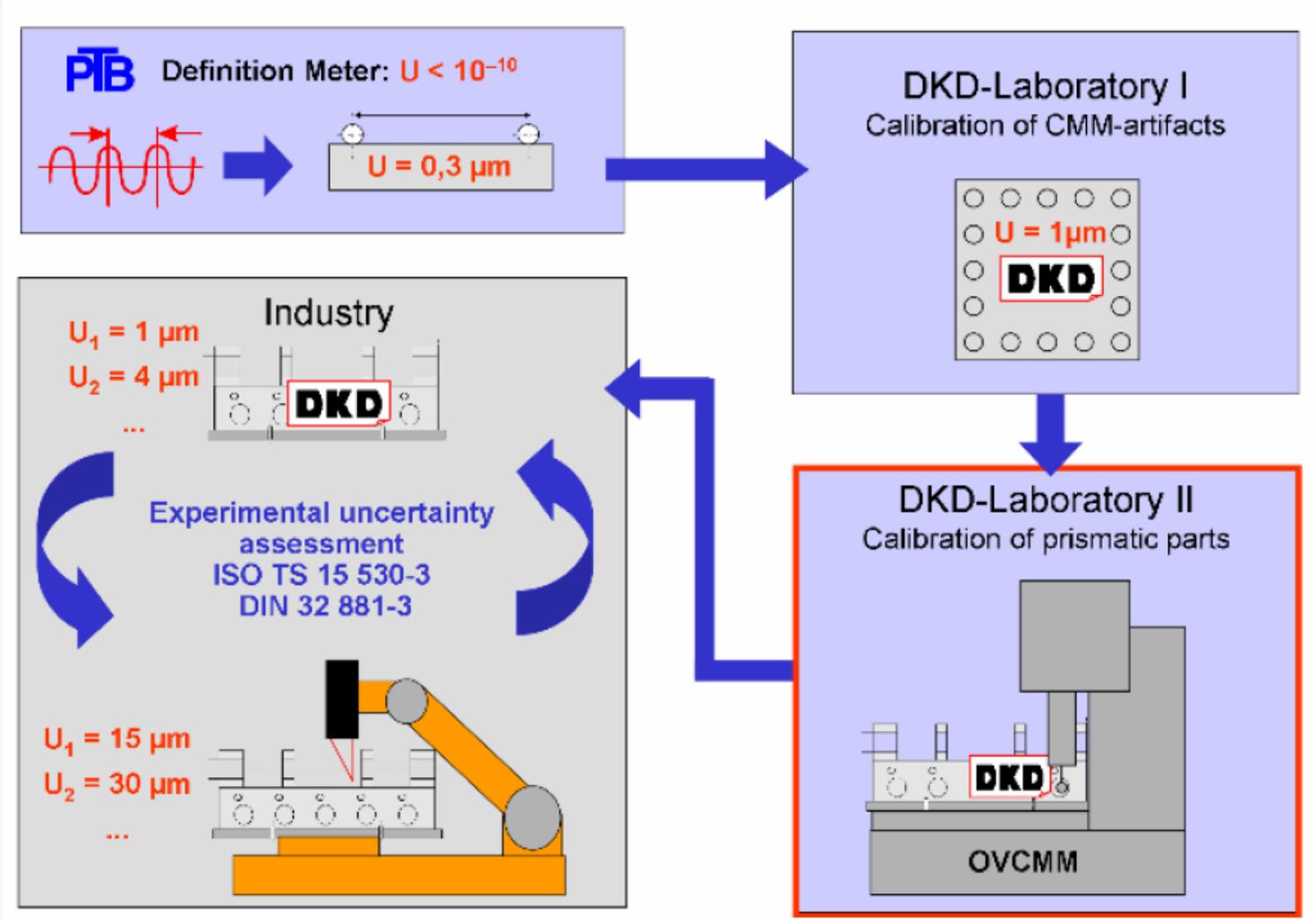
Uncertainty component	Method of evaluation (according to GUM)	Designation
Geometrical errors of CMM	A	assessed in a sum u_p
Temperature of CMM		
Drift of CMM		
Temperature of workpiece		
Systematic errors of probing system		
Repeatability of the CMM		
Scale resolution of the CMM		
Temperature gradients of the CMM		
Random errors of the probing system		
Probe changing uncertainty		
Errors induced by the procedure (clamping, handling, etc.)		
Errors induced by dirt		
Errors induced by the measuring strategy		
Calibration of the calibrated workpiece	B	u_{cal}
Variations among workpieces and calibrated workpiece in — roughness — form — expansion coefficient — elasticity	A or B	u_w
NOTE	The list of uncertainty contributors may not be exhaustive.	



Procedimiento muy empleado en la industria para materializar la asignación de incertidumbre.

Es válido y muy aplicado para componentes de tamaño medio y pequeño en series de fabricación largas.

Para componentes de gran tamaño y series cortas, está limitado





A continuación, se presenta un ejemplo práctico de la asignación de incertidumbre para una medición por coordenadas realizada en una máquina herramienta, aplicando la ISO 15530-3. Se aplica la Norma 14253-2 para realizar la conformidad de la medición sobre las especificaciones [4].

- Máquina herramienta empleada KONDIA MT, donde:
 - Renishaw OMP 400 palpador punto a punto
 - Rangos: X = 750 mm, Y = 1.000 mm, Z= 500 mm
 - Pieza NAS ISO 10791-7, M1-160
 - 5 piezas son mecanizadas y medidas en la MH, más una medición adicional a 20 °C.
 - Se realiza en condiciones de taller.
 - La calibración del patrón se realiza en una MMC ZEISS con el módulo de asignación de incertidumbre por simulación VCMM según la ISO 15330-4.



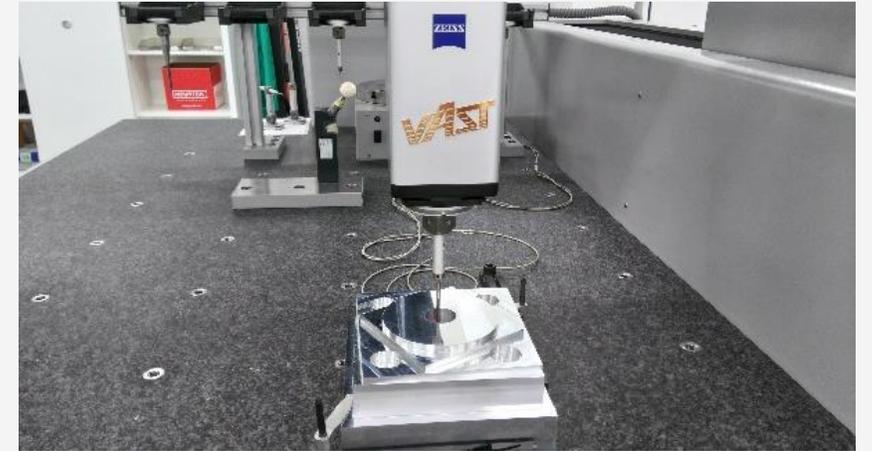
[4] U. Mutilba, E. Gomez-Acedo, G. Kortaberria, A. Olarra, J.A. Yagüe-Fabra, Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review, MDPI Sensors. 17 (2017) 40. doi:10.3390/s17071605.



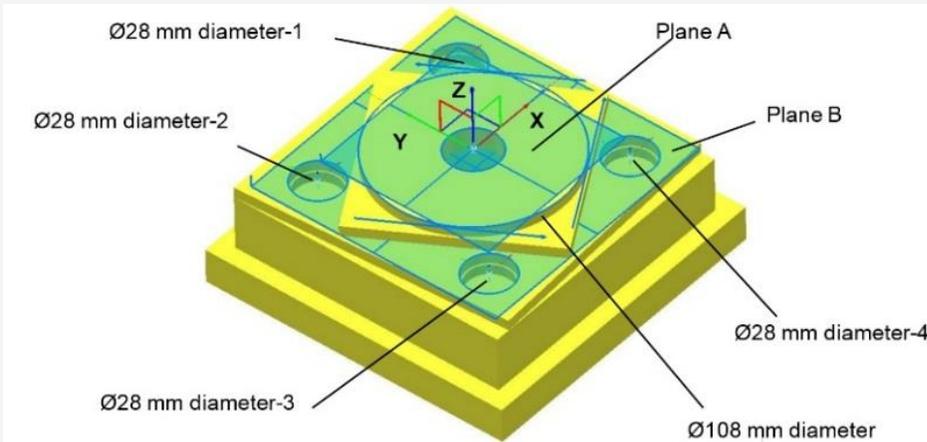
Mecanizado y medición en MH



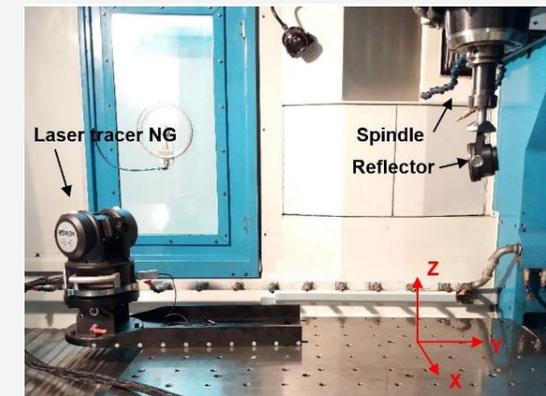
Calibración en la MMC



Mensurando



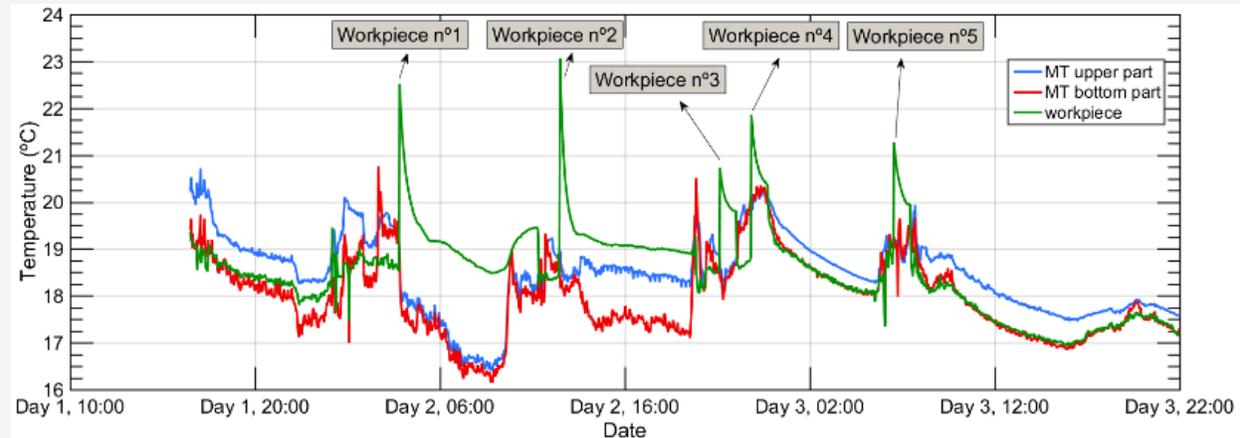
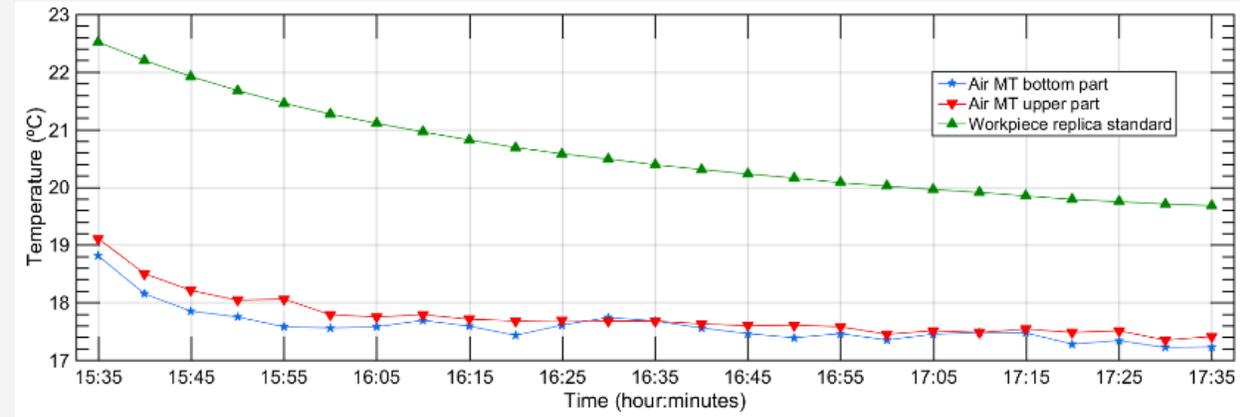
Volumetría de la MH





Se monitoriza la variación de temperatura en el proceso de medición para entender cómo afecta la temperatura al componente de incertidumbre (u_p , incertidumbre típica asociado al proceso).

Se observa que se produce una reducción de temperatura de 3°C en el proceso de enfriamiento donde se ejecuta la medición por coordenadas.

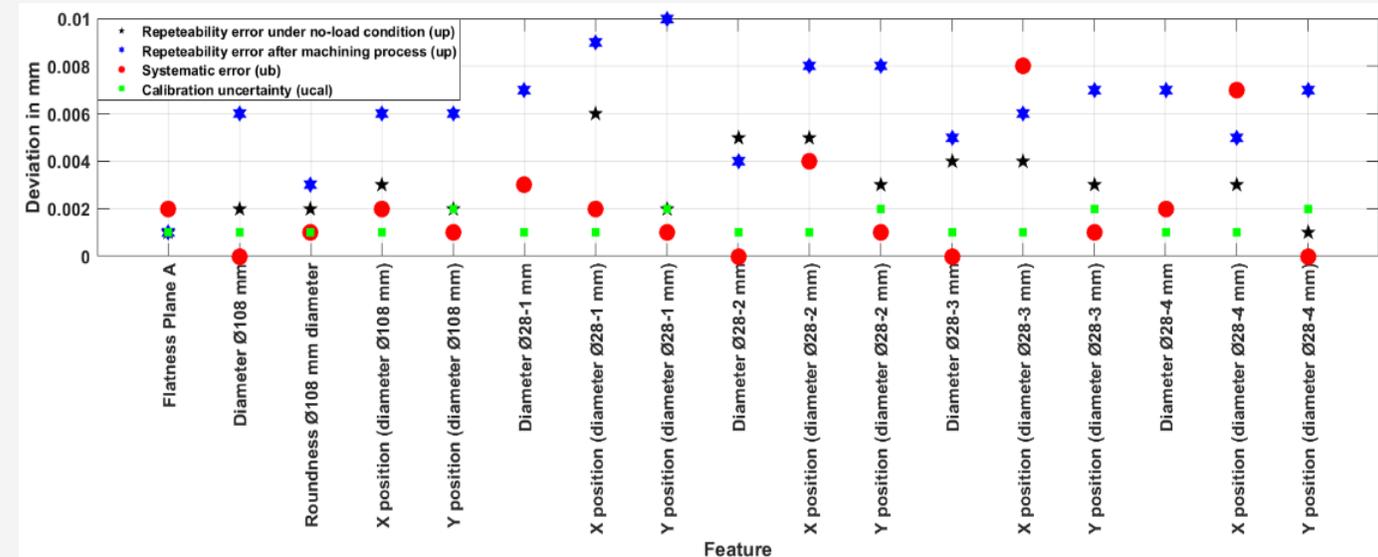




Se presenta el balance de incertidumbres:

- Error sistemático, u_b está por debajo de las 10 μm .
- El proceso de fabricación u_p , es la fuente de incertidumbre principal del ejercicio realizado, debido a la variación de temperatura que afecta al proceso.
- La incertidumbre asociada a la calibración, u_{cal} , se mantiene por debajo de 2 μm .

Feature	u_b	$u_{p \text{ no-load}}$	u_p	u_{cal}	u_{MS}	U_{MS}	U_{MP}	U_{MP}
Flatness Plan A	1.7	0.7	0.7	0.7	1.9	3.9	1.9	3.9
Ø108 mm	0.2	2.2	5.5	1	2.5	4.9	5.6	11.3
Roundness Ø108 mm	1.1	1.9	3.0	0.7	2.3	4.7	3.2	6.5
X position (Ø108 mm)	2.1	3.3	5.7	1	4.0	8.0	6.2	12.3
Y position (Ø108 mm)	0.7	2.1	5.7	1.7	2.8	5.6	6.0	12.0
Ø28-1 mm	2.6	3.1	7.1	1	4.2	8.4	7.6	15.3
X position (Ø28-1 mm)	2.2	6.1	9.4	1.2	6.6	13.2	9.7	19.4
Y position (Ø28-1 mm)	0.5	2.1	9.5	1.9	2.9	5.7	9.7	19.5
Ø28-2 mm	0.3	5.4	3.9	1	5.5	10.9	4.1	8.1
X position (Ø28-2 mm)	4.4	5.5	8.3	1.2	7.2	14.3	9.5	18.9
Y position (Ø28-2 mm)	1.5	2.7	8.3	1.9	3.6	7.3	8.6	17.2
Ø28-3 mm	0.5	4.0	5.2	1.1	4.2	8.4	5.4	10.7
X position (Ø28-3 mm)	7.6	4.5	5.5	1.2	8.9	17.9	9.5	19.0
Y position (Ø28-3 mm)	1.4	2.6	6.9	1.8	3.4	6.9	7.3	14.6
Ø28-4 mm	1.7	2.1	6.7	1.1	2.9	5.9	7.0	14.1
X position (Ø28-4 mm)	7.2	2.7	5.2	1.4	7.8	15.6	9.0	18.0
Y position (Ø28-4 mm)	0.1	1.3	6.5	1.7	2.2	4.3	6.8	13.5



The background of the slide is a grayscale photograph of a modern industrial factory. Several large, metallic robotic arms are visible, extending from the left and right sides towards the center. The arms are highly detailed, showing joints, gears, and various mechanical components. The lighting is dramatic, with strong highlights and deep shadows, creating a sense of depth and scale. The overall atmosphere is one of precision and advanced technology.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida



No en todo los casos es posible emplear una pieza patrón para realizar la asignación de incertidumbre en una medición en una MMC.

ISO 15530-4 (2008): Se emplea la simulación para entender la relación, es función modelo que plantea la GUM, entre las magnitudes de entrada X_i con el mensurando Y . La diferencia es que no lo hace en un formato analítico, sino virtualmente.

En realidad esta norma no explica cómo aplicar de forma satisfactoria esta metodología para desarrollar un modelo del ejercicio de medición, sino que se emplea para verificar los resultados.

El conocimiento sobre el desarrollo de los modelos reside en los fabricantes y desarrolladores de tecnología como LEICA y ZEISS, por ejemplo. El modelo de error en las MMC es secreto, ya que es el core del negocio.

TECHNICAL SPECIFICATION
ISO/TS 15530-4
First edition
2008-06-01

Geometrical Product Specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM); Technique for determining the uncertainty of measurement —
Part 4:
Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation
Spécification géométrique des produits (GPD) — Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT); Technique pour la détermination de l'incertitude de mesure —
Partie 4: Évaluation de l'incertitude de mesure spécifique d'une tâche à l'aide de simulations

Reference number
ISO/TS 15530-4:2008(E)
© ISO 2008

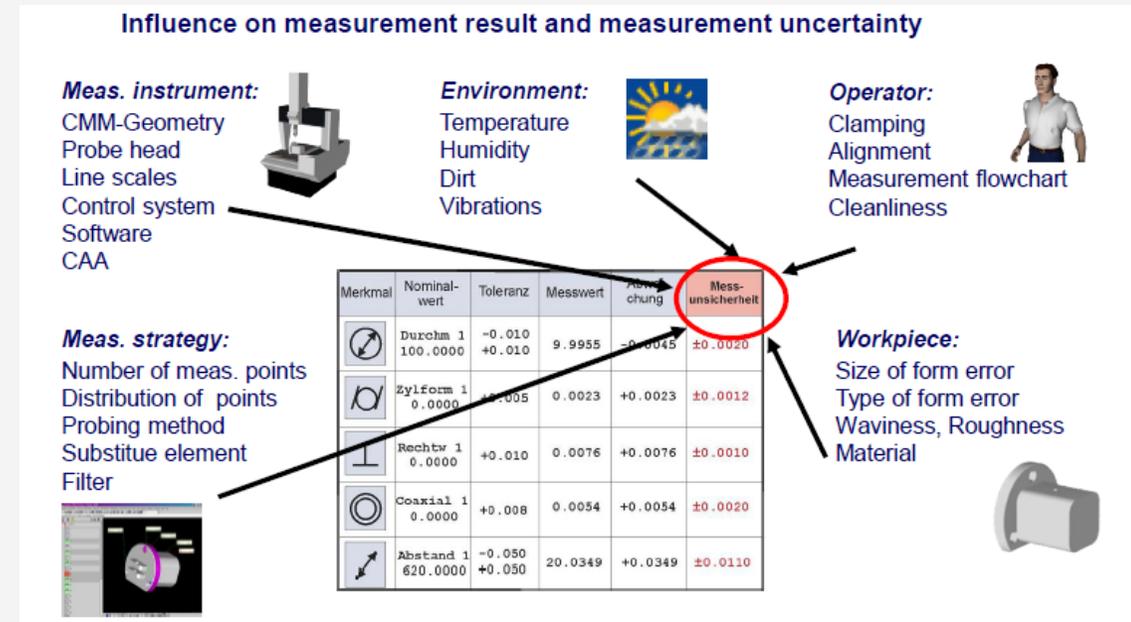


La clave para este procedimiento es desarrollar el modelo del proceso de medición, desglosando cada variables y entendiendo su tipo de distribución y variabilidad.

La MMC realiza la medición por coordenadas, recoge información sobre las variables de interés y le pide al usuario que introduzca información sobre variables como el material del mensurando y la propia estrategia de medición.

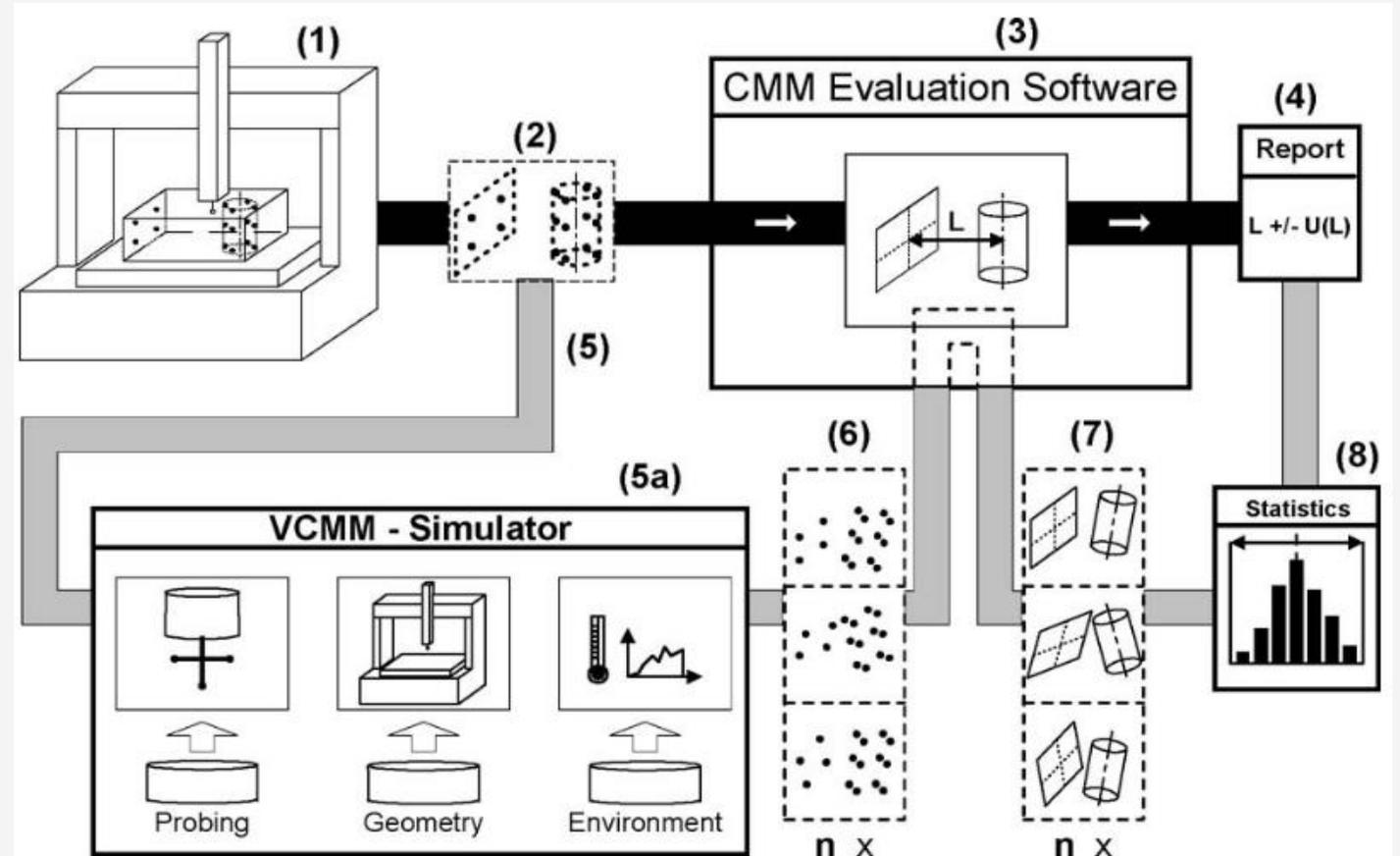
Con toda esta información, el software realiza una simulación como “n” muestras donde se simula el error aleatorio y el error sistemático de la medida.

Como resultado se obtiene la incertidumbre expandida de medición, $U(k=2)$, para cada uno de las características medidas sobre el mensurando.





Con toda la información disponible, el simulador realiza una simulación que genera “n” resultados. Estos resultados viene de vuelta al software de la MMC y se realiza un análisis estadístico de los resultados para reportar los resultados.





Algunos softwares comerciales ya disponen de esta herramienta, como es el software ZEISS y el software QUINDOS.

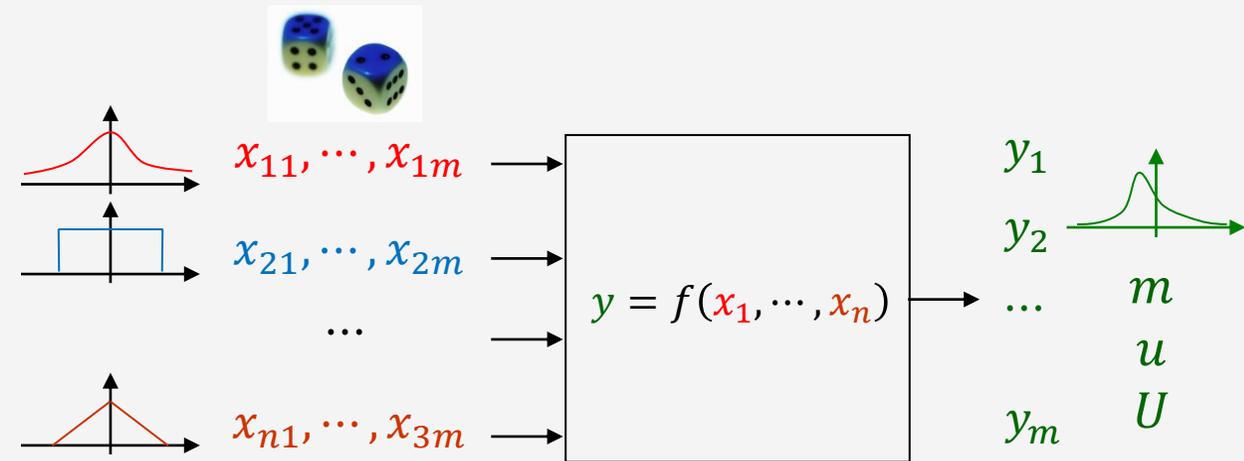
El módulo VCMM de ZEISS en Calypso muestra unos resultados de este tipo:

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Desviación +/-	VCMM Uncertainty
PLANITUD A	0,0404	0,0000	0,0508	0,0000	0,0404	0,0004
PLANITUD B	0,0113	0,0000	0,0508	0,0000	0,0113	0,0004
PLANITUD C	0,0186	0,0000	0,0508	0,0000	0,0186	0,0004
Ancho_Agujero oblongo INF	12,7236	12,7000	0,1270	-0,1270	0,0236	0,0005
Ancho_Agujero oblongo SUP	12,6970	12,7000	0,1270	-0,1270	-0,0030	0,0005
Longitud de perpendicular_Perp.1-E-...	12,7066	12,7000	0,1270	-0,1270	0,0066	0,0006
Longitud de perpendicular_Perp.2-E-...	12,7149	12,7000	0,1270	-0,1270	0,0149	0,0009
Longitud_Agujero oblongo INF	40,6822	40,6721	0,1270	-0,1270	0,0101	0,0005
Longitud_Agujero oblongo SUP	40,6567	40,6721	0,1270	-0,1270	-0,0153	0,0005



Desglosando el procedimiento:

- La función del modelo se implementa en el software.
- Las magnitudes de entrada $x_1, x_2 \dots x_N$ tienen que ser conocidas así como su densidad de probabilidad (PDF).
- Se materializan “m” simulaciones acorde a los PDF. (Coste computacional)
- Se obtiene una “población” de resultados simulados y se realiza un análisis estadístico.



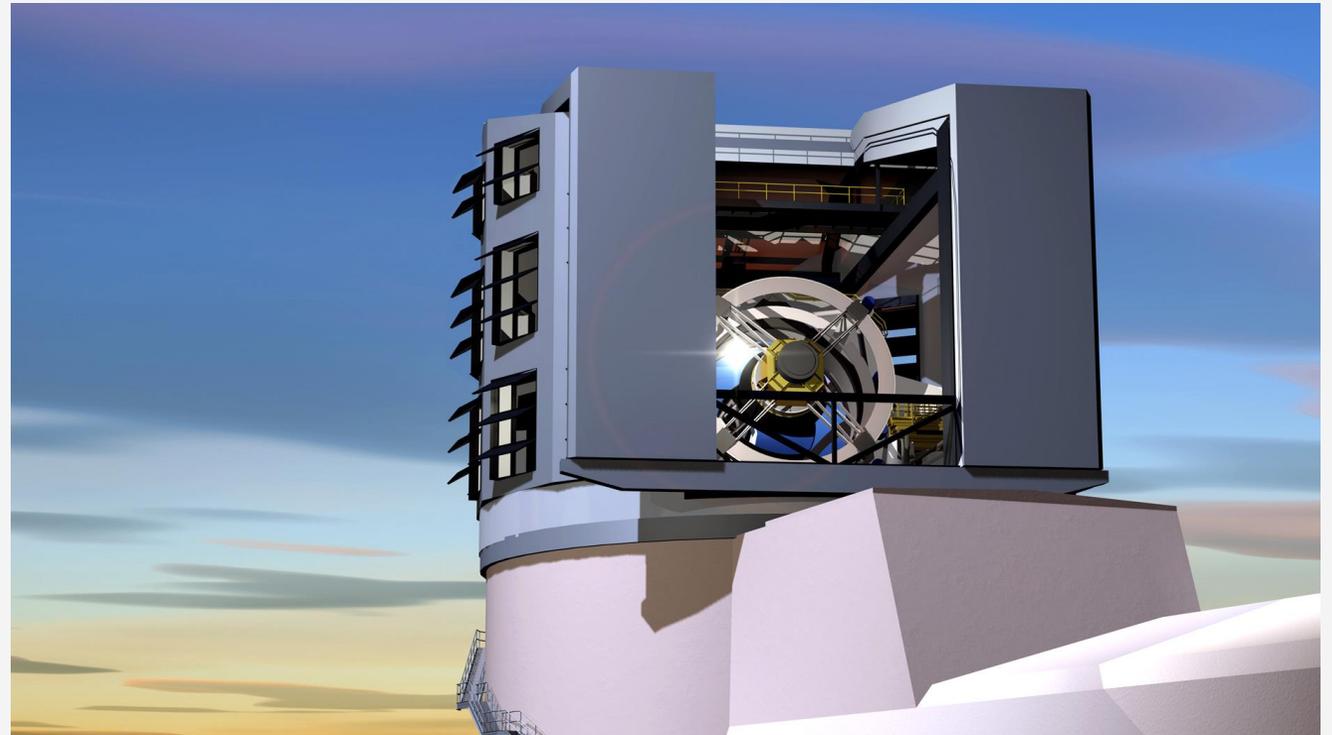


Esta alternativa ISO 15530-4 es la base para el desarrollo de gemelos digitales para los sistemas y procedimientos de medición.

Un ejemplo: Asignación de incertidumbre en la verificación de apunte del telescopio LSST.

Es un sistema complejo en el cual el desarrollo de un modelo de simulación del procedimiento de verificación del telescopio tiene sentido para:

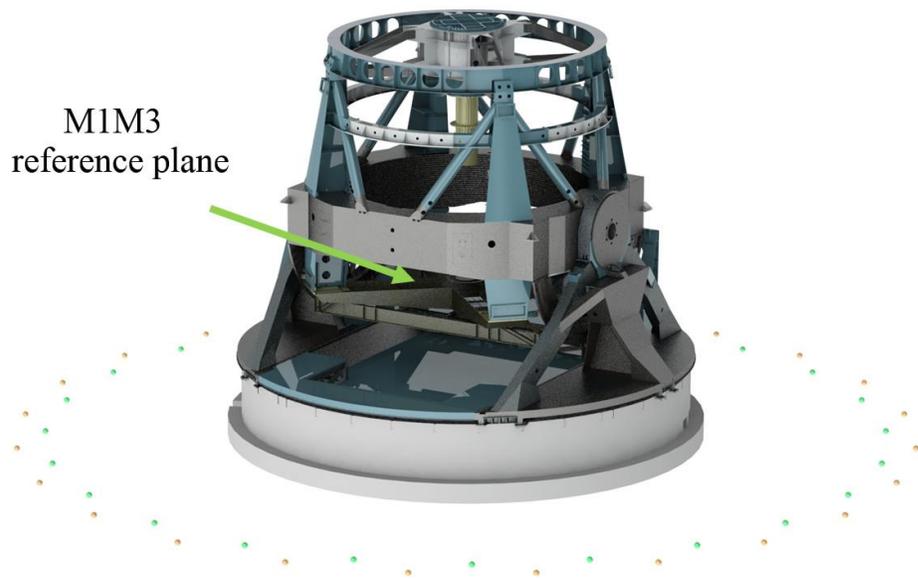
- Estimar la incertidumbre alcanzable.
- Desarrollar y optimizar el procedimiento de medición.





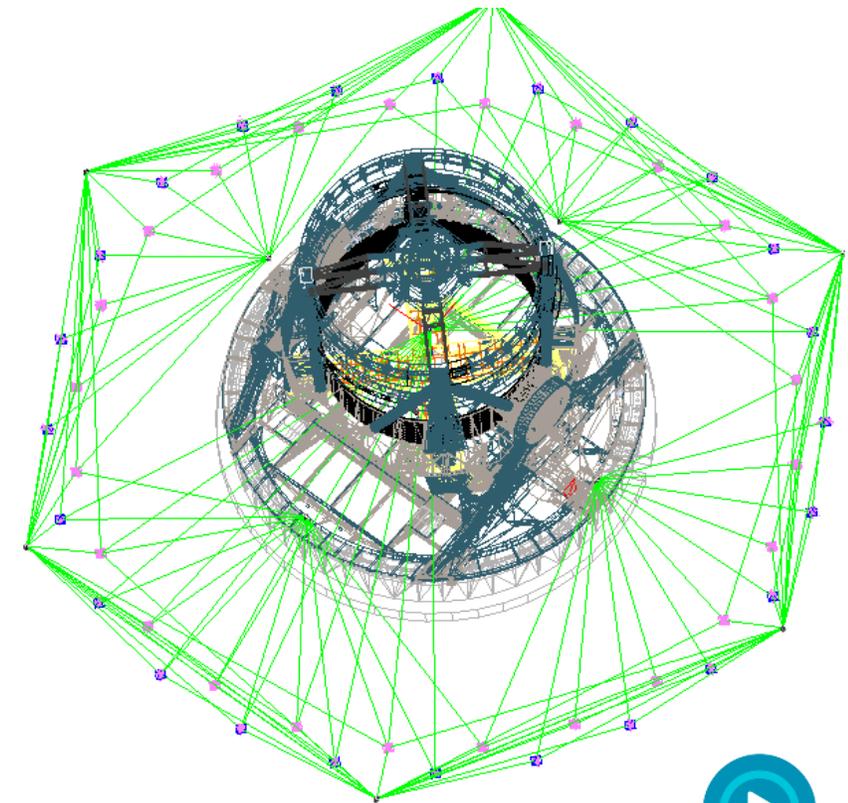
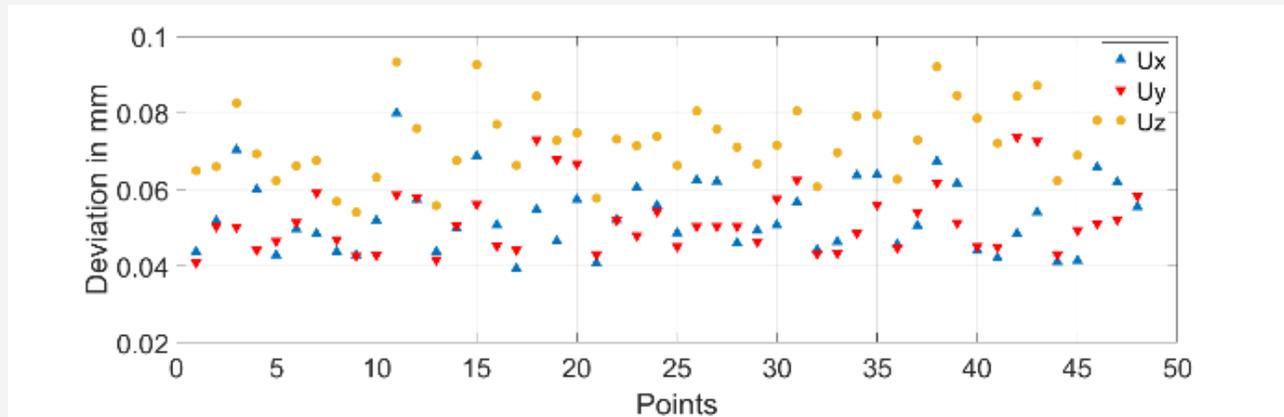
Se desarrolla un procedimiento de medición teórico sobre el papel y se implementa en el software metrológico SA para realizar la simulación de la medición a priori.

Con la medición real, se realiza un cálculo con el mismo modelo a posteriori.



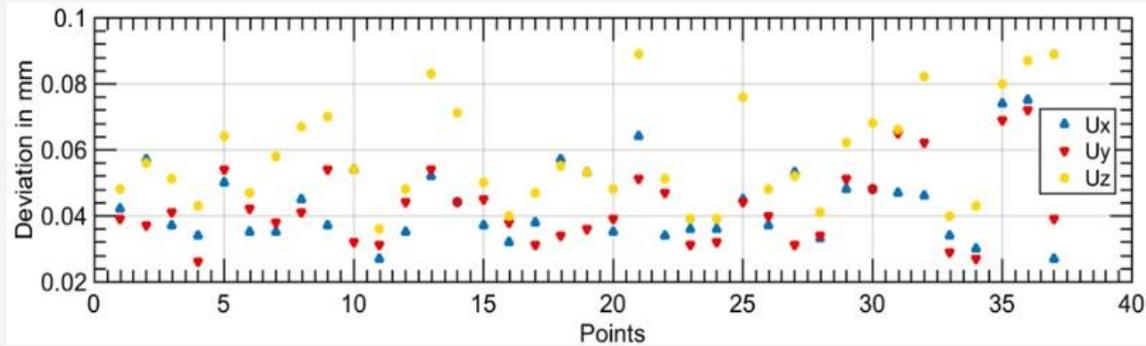


Se realiza una simulación completa del procedimiento de medición y se obtienen unos resultados preliminares.



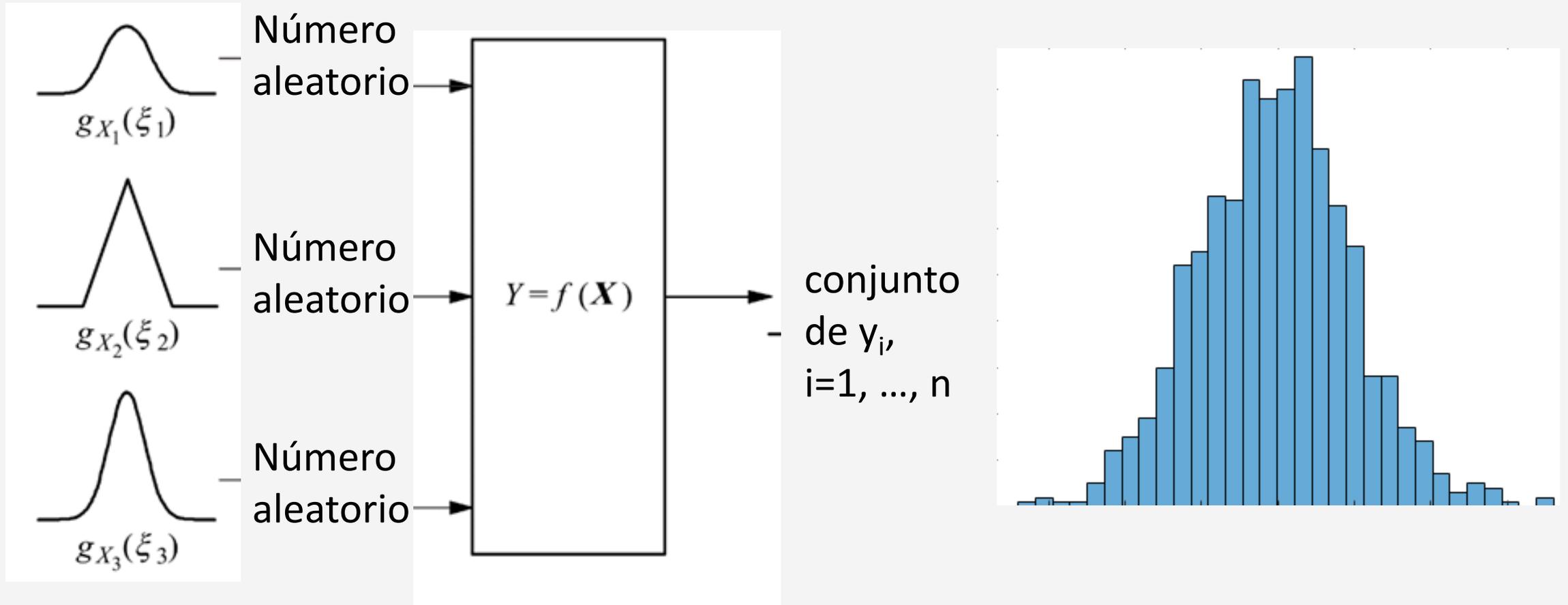


Se realiza el proceso de verificación in-situ y se observa que los resultados en la simulación realizada a priori, son similares a los resultados de la verificación in-situ.





Simplificando mucho, se trata de...



The background of the slide is a grayscale image of a modern industrial factory. Several large, silver-colored robotic arms are visible, extending from the left and right sides towards the center. The arms are mounted on complex mechanical bases. The lighting is dramatic, with strong highlights and deep shadows, creating a sense of depth and scale. The overall atmosphere is one of precision and advanced technology.

OUTLINE

Introducción

Definición y terminología

Incertidumbre de medición

La máquina de medir por coordenadas y el cálculo de incertidumbre

Introducción a la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida)

La evaluación de la incertidumbre de medida con una pieza patrón (ISO 15530-3)

La evaluación de la incertidumbre de medida mediante la simulación (ISO 15530-4)

Desarrollo del proyecto EUCOM: Nuevos procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de medida



El proyecto europeo EUCOM - **Evaluating the Uncertainty in COordinate Measurement** – plantea el desarrollo de dos nuevos métodos para el cálculo de incertidumbre en la medición por coordenadas en MMC.

El primero permite su cálculo de forma experimental realizando mediciones adicionales; mientras que el segundo método se basa solamente en información previa a la medición.

ISO 15530: su objetivo principal es establecer las bases para el cálculo de la incertidumbre de medición en MMC.

- Parte 1 (2013): Buen tutorial pero no es operativo.
- **Parte 2: Método a posteriori. El comité ISO/TC213/WG10 abordó el proyecto en el año 2000, pero se abandonó en 2008 por falta de recursos.**
- Parte 3 (2011): Plantea el uso de una pieza patrón.
- Parte 4 (2008): Método de simulación.
- **Parte 5: Basado en el juicio del experto, sin abordar.**



El primero de los métodos, es un método definido como ***a posteriori*** ya que demanda una realización física de las mediciones para realizar el cálculo de incertidumbre.

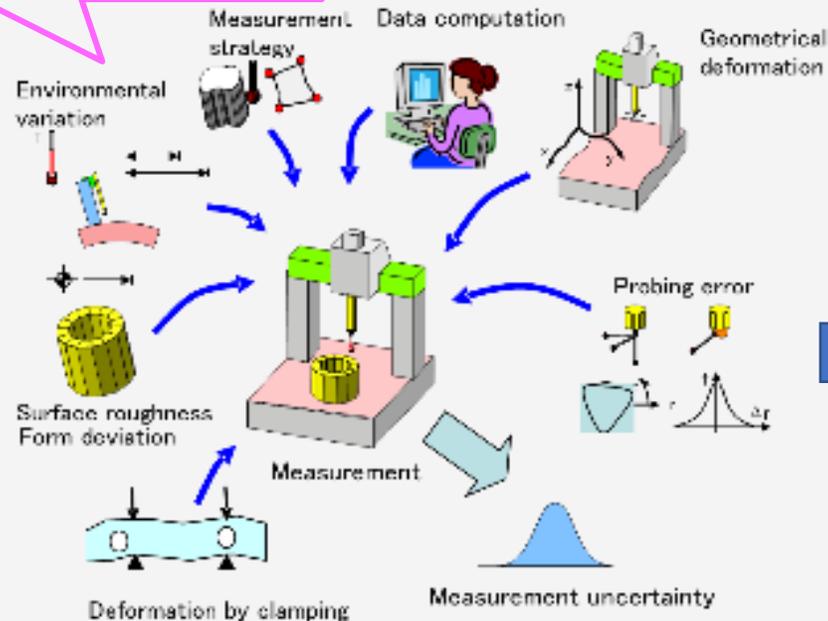
La base de este procedimiento consiste en realizar la medición del mensurando varias veces, modificando las coordenadas de medición y para varias orientaciones del mensurando. Varios detalles:

- Es una evaluación de tipo A.
- Basado en **ISO/WD 15530-2** (abandonado en 2008 pero con trabajo realizado)
- Similar a la ISO 15530-3 pero sin necesidad de emplear una pieza patrón.
- NO demanda equipamiento (hardware & software) adicional.
- Emplea la información de las coordenadas de medición.
- El alcance del nuevo procedimientos cubre: distancia/ángulo, posicionamiento/orientación y forma.



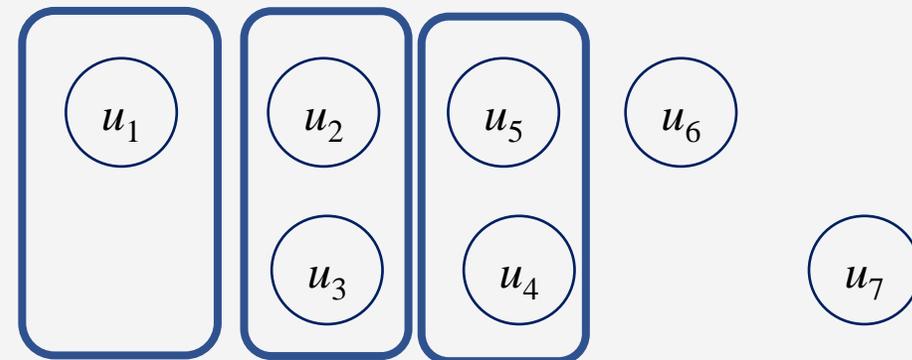
Este nuevo método plantea prescindir de la evaluación compleja de las diferentes fuentes de incertidumbre en la medición con una MMC para pasar a un concepto de “módulos de incertidumbre” para las principales fuentes de incertidumbre.

Difícil de evaluar tareas complejas



Contribuciones a la incertidumbre

Fácil de evaluar una tarea sencilla



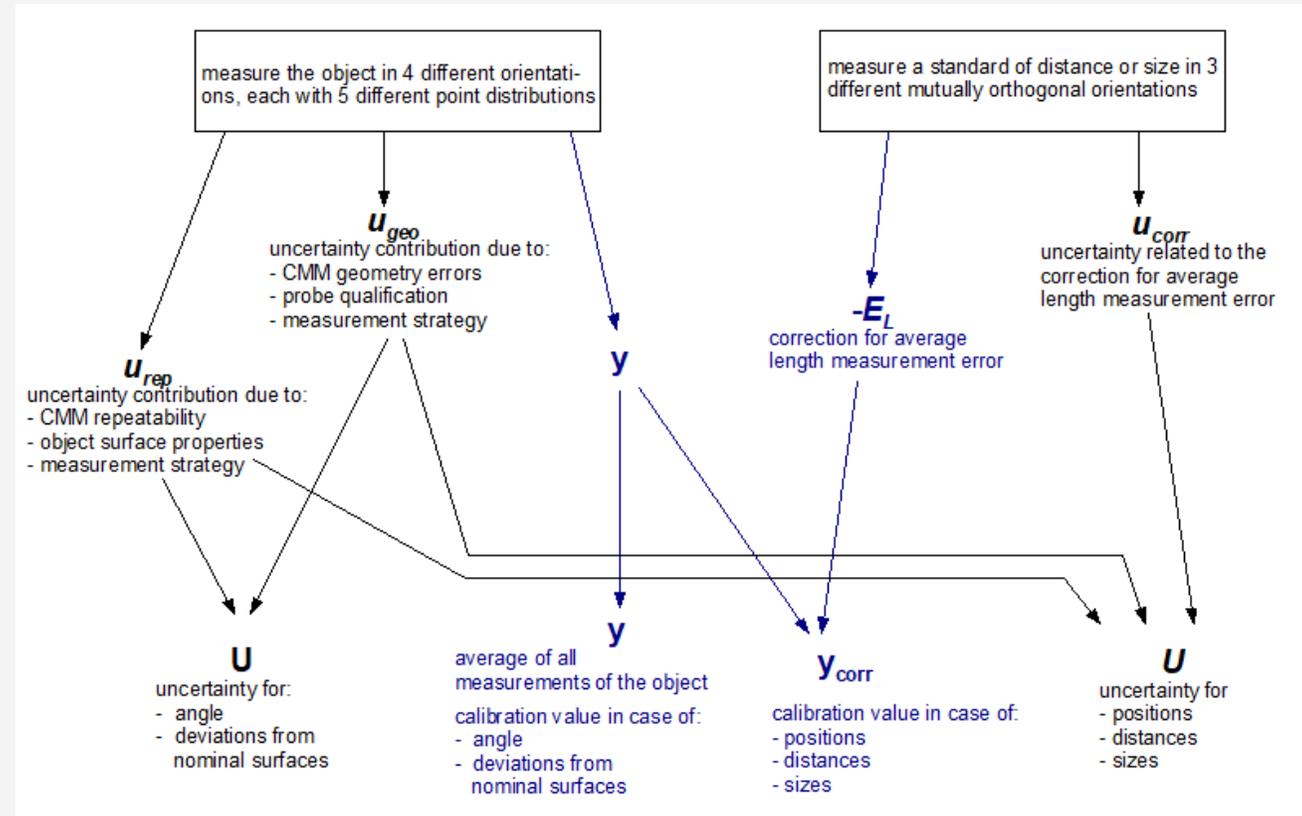
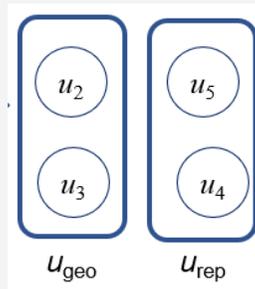
Módulos de incertidumbre



A continuación se presenta el concepto de modularidad que plantea esta alternativa:

Se realiza un análisis de la varianza y se identifican las dos fuentes de incertidumbre principales:

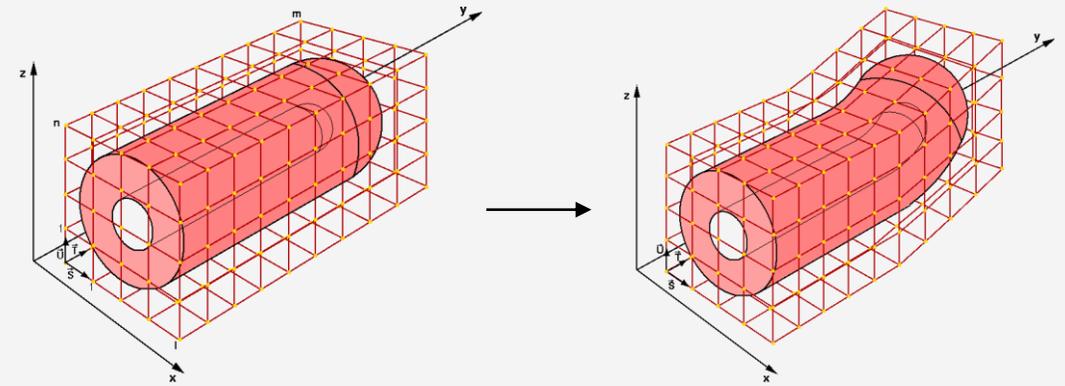
- La influencia de la repetibilidad de la MMC y los factores de forma y rugosidad del mensurando.
- La influencia del error geométrico de la MMC y el efecto de la cualificación del palpador.



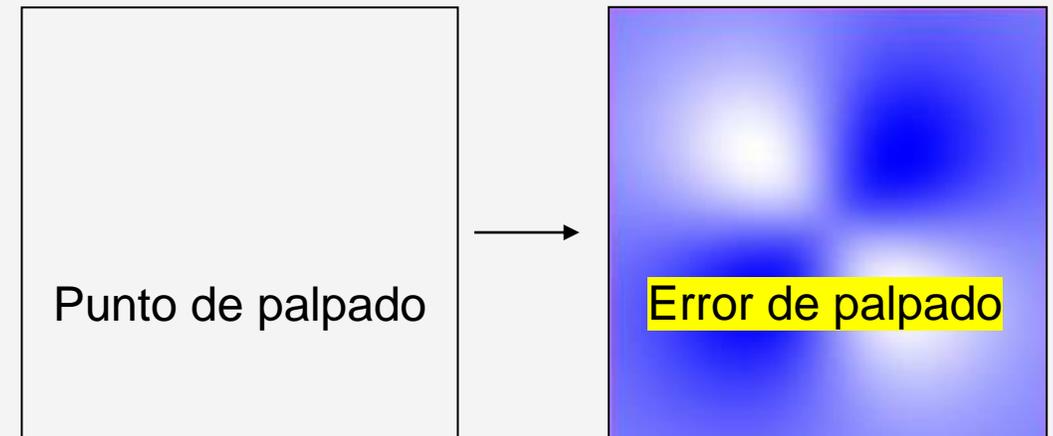


O lo que es lo mismo...

- Error global
 - Deformación del Sistema de coordenadas



- Error local
 - Bias y fluctuación del palpado



El procedimiento de medición se resume en...

Medición del mensurando

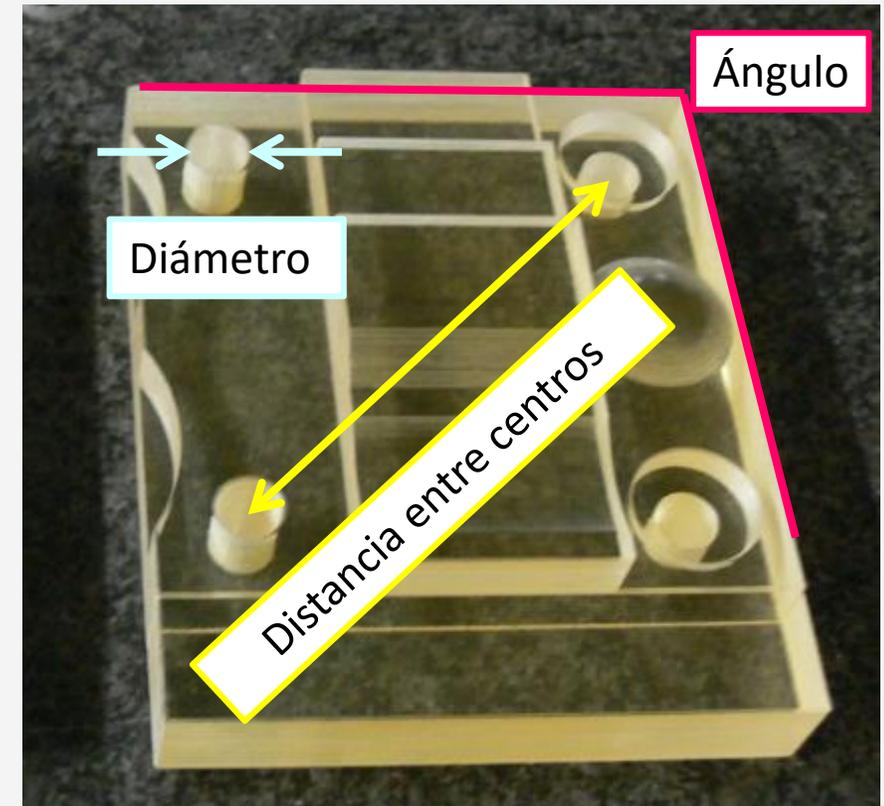
- 4 orientaciones
- 3 repeticiones

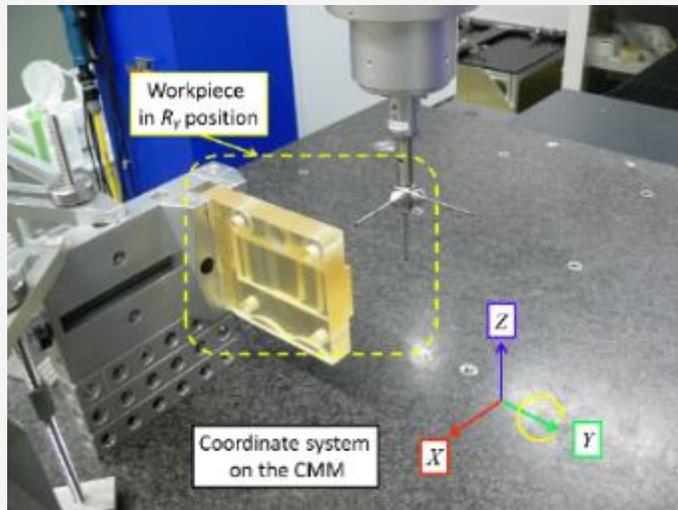
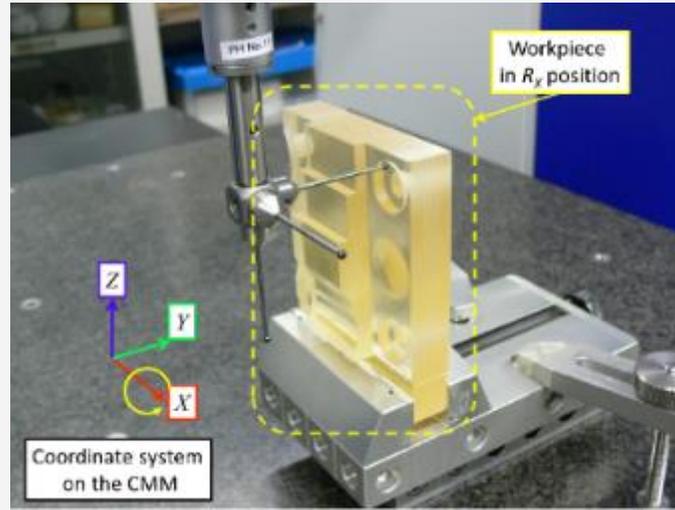
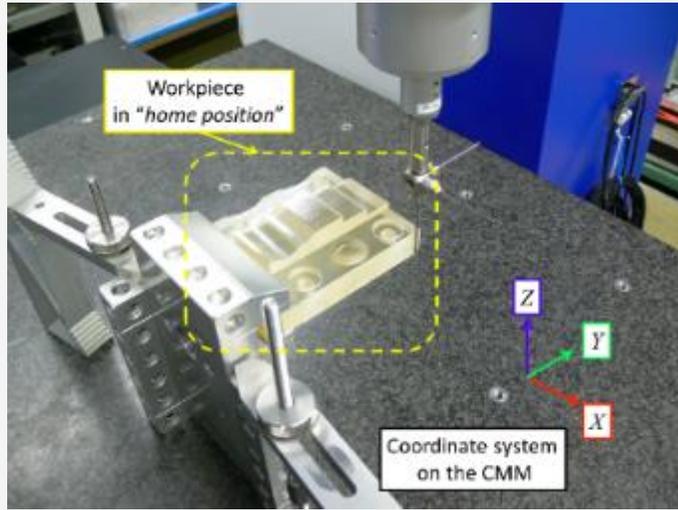
Medición de un estándar de longitud

- A lo largo de los ejes X, Y and Z
- 3 repeticiones

Medición de una esfera de referencia

- Utilizando todas las configuraciones de palpador.
- 3 repeticiones





Se muestra un ejemplo práctico sobre un componente de diferentes características

4-orientaciones es suficiente



Como ejemplo se muestra el siguiente resultado

Variación por errores aleatorios y cambios del sistema en corto plazo

	Orientation 1 (home position)	Orientation 2 (R _x position)	Orientation 3 (R _y position)	Orientation 4 (R _z position)
Cycle 1	89.9859	90.0140	90.0159	89.9848
Cycle 2	89.9853	89.9860	90.0166	90.0148
Cycle 3	89.9853	89.9862	90.0162	90.0144
$\overline{j_y}$	89.9855	89.9954	90.0162	90.0047
\overline{y}	90.0005			



Variación por errores globales y cambios del sistema a largo plazo



Como ejemplo del proyecto EUCOM se ha creado una hoja de cálculo

		CONNECTING ROD MEASUREMENT																				Measurement	Expanded	
Coverage factor k	2	Cycle 1				Cycle 2				Cycle 3				Cycle 4				Cycle 5				value	standard	
Measured feature		11 y	12 y	13 y	14 y	21 y	22 y	23 y	24 y	31 y	32 y	33 y	34 y	41 y	42 y	43 y	44 y	51 y	52 y	53 y	54 y	y	U	
A1 surface line 1 straightness	A1																						0.000 00	0.000 00
A1 circle 1 roundness	A1																						0.000 00	0.000 00
A1 cylindricity	A1																						0.000 00	0.000 00
A1 diameter	A1																						0.000 00	0.000 00
F1 cylindricity	F1, F2																						0.000 00	0.000 00
F1 circle 1 Diameter	F1																						0.000 00	0.000 00
F1 circle 1 concentricity to A1	F1, A1																						0.000 00	0.000 00
F1 circle 1 total runout to A1	F1, A1																						0.000 00	0.000 00
F1 cylindrical total radial runout to A1	F1, A1																						0.000 00	0.000 00
F1 perpendicularity about F1 to axis C1	F1, F1, F1																						0.000 00	0.000 00
F1 flatness	F1																						0.000 00	0.000 00
F1 flatness	F1																						0.000 00	0.000 00
F1-F1 distance	F1, F1																						0.000 00	0.000 00
F1-F1 parallelism	F1, F1																						0.000 00	0.000 00
R1 diameter in plane 20 mm from E	R1, E																						0.000 00	0.000 00
R1 circular runout	R1																						0.000 00	0.000 00
Uncertainty to A1	A1																						0.000 00	0.000 00

$$U = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + \frac{u_4^2}{r_1} + \frac{u_5^2}{r_2} + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2}$$

Uncertainty contributions

Plantilla Excel proporcionada por el proyecto EUCoM



El segundo de los métodos, es un método definido como ***a priori***.

Se trata de un tipo de evaluación de tipo B y se trata de un procedimiento que no emplea datos experimentales.

Se trataría de las base técnica para la Norma **ISO 15530-5**, que en realidad, nunca se ha abordado.

Se presenta como un método universal que se basa en un modelo que emplea un número mínimo de puntos para representar matemáticamente las características de medición. Pueden ser puntos de superficie o puntos en un eje o sobre una superficie.

Es un método que se prevé utilizar para una predicción de la incertidumbre de medición alcanzable en la medición con una MMC.

La modelización se prevé compleja. Se demanda personal cualificado para desarrollar estos modelos hasta el momento de su normalización.



Este método permite abordar la asignación de incertidumbre para diferentes características (dimensiones, tolerancias geométricas...) que se expresan como **funciones** de las **diferencias entre las coordenadas**, no de las propias coordenadas.

Se emplean relaciones de tipo: Punto a punto, punto a eje o punto a plano.

Esta aproximación no emplea la definición cinemática de una MMC, sino que emplea su característica Maximum Permissible Error (MPE), para en base a la Norma ISO 14253-2 p. 8.4.5: “Cuando se sabe que un equipo de medición se adecúa a valores de MPE para cada una de las características metrológicas, estos valores MPE pueden utilizarse para obtener las componentes de incertidumbre asociada”:

$$u = b \times \text{MPE}$$

Donde la “b” se obtiene de la densidad de probabilidad para una distribución uniforme



Se aplica la ley de propagación de varianzas

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

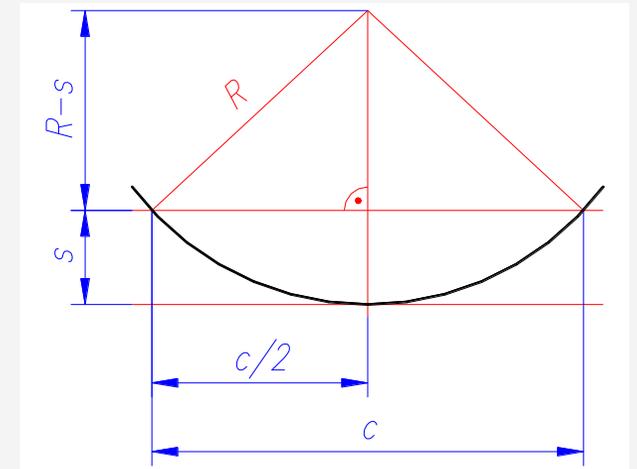
$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j)$$

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

En caso de correlación entre las variables de entrada, se debe considerar mediante las covarianzas.

Como ejemplo: Se define como mensurando el radio “R” y las magnitudes de entrada son “c” y “s”

Las magnitudes de entrada tienen una distribución uniforme y el sistema de medición se asume que es un microscopio.



$$R^2 = \left(\frac{c}{2}\right)^2 + (R-s)^2$$

$$R = \frac{c^2}{8s} + \frac{s}{2}$$

$$\frac{\partial R}{\partial c} = \frac{c}{4s}$$

$$\frac{\partial R}{\partial s} = \frac{-c^2}{8s^2} + \frac{1}{2}$$

$$u_c = \text{MPE}(c) \times 0,58$$

$$u_s = \text{MPE}(s) \times 0,58$$

$$\text{MPE} = 2 + L/250$$

$$u_R = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial c} u_c\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial s} u_s\right)^2}$$



El balance de incertidumbres para tres casos de este ejemplo donde $s=8$ mm, $S=25$ mm y $s=50$ mm.

	mm	$\partial R/\partial$	$u_i, \mu\text{m}$	$\partial R/\partial \cdot u_i, \mu\text{m}$
<i>s</i>	8,000	-5,25	0,68	-3,56
<i>c</i>	54,259	1,7	0,75	1,25
			$u =$	3,77

	mm	$\partial R/\partial$	$u_i, \mu\text{m}$	$\partial R/\partial \cdot u_i, \mu\text{m}$
<i>s</i>	25,000	-1,00	0,70	-0,70
<i>c</i>	86,603	0,87	0,78	0,68
			$u =$	0,97

	mm	$\partial R/\partial$	$u_i, \mu\text{m}$	$\partial R/\partial \cdot u_i, \mu\text{m}$
<i>s</i>	50,000	0	0,73	0
<i>c</i>	100,001	0,5	0,8	0,40
			$u =$	0,40

Tekniker Sharing Training



¡Muchas gracias!



Tekniker
Parke Teknologikoa
C/ Iñaki Goenaga, 5
20600 Eibar (Gipuzkoa)
Tel: +34 943 20 67 44

CONTACTO
Unai Mutilba
unai.mutilba@tekniker.es