



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**BASE DE DATOS LÉXICA (INGLÉS-
ESPAÑOL/ESPAÑOL-INGLÉS).
METROLOGÍA PARTE IV**

Grado: Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor: Álvaro Sánchez Aguilera

Tutor: Doctora Dña. Inmaculada Luque Vázquez

Cotutor: Dña. Marisa Caccia

MÁLAGA, 12 de Junio de 2023



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

12 de Junio de 2023

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento

Área de conocimiento

Documento 1: ÍNDICE

BASE DE DATOS LÉXICA(INGLÉS/ESPAÑOL-ESPAÑOL/INGLÉS). METROLOGÍA PARTE IV

Grado

Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor

- D. Álvaro Sánchez Aguilera
NIF: 77194358- X ☎ 639 261 278 ✉ Alvarosanchezaguilera@uma.es
Grado: Mecánica + Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Tutor

- Dña. Inmaculada Luque Vázquez

Cotutor

- Dña. Marisa Caccia

1 Índice

2 Memoria

| | |
|--------------------------------------|----|
| 2.1. Introducción..... | 5 |
| 2.2. Objetivos..... | 6 |
| 2.3. Metodología..... | 7 |
| 2.4. Resultados obtenidos..... | 8 |
| 2.5. Conclusiones..... | 11 |
| 2.6. Referencias bibliográficas..... | 12 |

3 Anexos

1. Anexo I: Traducción al español
2. Anexo II: Glosario
3. Anexo III: Informe de calibración



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

12 de Junio de 2023

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento

Área de conocimiento

Documento 2: MEMORIA

BASE DE DATOS LÉXICA (INGLÉS/ESPAÑOL-ESPAÑOL/INGLÉS). METROLOGÍA PARTE IV

Grado

Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor

- D. Álvaro Sánchez Aguilera
NIF: 77194358- X ☎ 639 261 278 ✉ Alvarosanchezaguilera@uma.es
Grado: Mecánica + Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Tutor

- Dña. Inmaculada Luque Vázquez

Cotutor

- Dña. Marisa Caccia

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Estudios el foco central a partir del cual se han desarrollado las diferentes partes que conforman el mismo, ha sido el inglés aplicado a la ingeniería.

En primer lugar, se ha realizado la traducción al inglés de una parte del temario de la asignatura de Metrología y Calidad, la cual es una disciplina que se enfoca en el estudio y aplicación de técnicas de medición y control de calidad en diversos procesos industriales y científicos con el objetivo de garantizar la precisión, confiabilidad y trazabilidad de las mediciones y asegurar que los productos o servicios cumplan con los estándares establecidos.

Concretamente los temas abordados son: Variabilidad de las medidas, en el cual se exponen conceptos como el error sistemático en una medición, la diferencia entre precisión y exactitud, la definición de repetibilidad y reproducibilidad, o el significado de la tolerancia de una medida; Cálculo de la incertidumbre, en el cual se explica qué componentes constituyen la incertidumbre de medida, tipos de evaluación de incertidumbre o cómo se debe expresar la misma; Laboratorio de Metrología, en el que se enfatiza la importancia de la trazabilidad, es decir, la capacidad de vincular una medición a patrones de referencia internacionales o nacionales, y las condiciones atmosféricas del laboratorio en un proceso de medición. Por lo que, la traducción de dichos temas supone un pequeño progreso en el compromiso a la internacionalización de la Escuela de Ingenierías Industriales de Málaga al permitir a los estudiantes de habla inglesa acceder a un temario completo y comprensible.

Para ello, se ha realizado un análisis exhaustivo del contenido original y se han identificado los posibles obstáculos para adaptarlo al inglés, llegando a la conclusión de que la mejor manera de llevar a cabo la traducción es contrastando con documentos oficiales de Metrología y diccionarios técnicos de ingenieros. Además, se ha desarrollado un glosario como herramienta auxiliar para facilitar la comprensión del vocabulario y la fonética de la parte teórica, tanto de inglés a español como de español a inglés, de esta manera, sea estudiante nacional o internacional, puede entender la traducción e incluso puede ser de gran utilidad en caso de tener que realizar la presentación de un trabajo en el aula.

Asimismo, para poner en práctica los conceptos expuestos y evaluar de manera objetiva el nivel de conocimiento y competencias adquiridas, se ha realizado un informe de calibración como modelo de trabajo en un laboratorio en el que se quiere hallar la incertidumbre de calibración de un instrumento de medida, que servirá de guía a los estudiantes para realizar un informe de calibración y aprender las nociones esenciales de esta parte de la asignatura, ya que, se han aplicado los conceptos fundamentales de los tres temas mencionados anteriormente.

Así, este informe ha sido desarrollado en inglés con el objetivo de hacer constancia de la importancia del inglés en el ámbito laboral del mundo ingenieril, sirviendo también como ejemplo práctico para la asignatura. Para terminar, este Trabajo de Fin de Estudios deja constancia de la necesidad de ofrecer un programa docente completamente en inglés por parte de la Escuela de Ingenierías Industriales, debido a la multitud de puertas que abre en el mundo laboral, ya que la posibilidad de comunicarse eficazmente en inglés permite colaborar en entornos internacionales y de esta manera, se facilita el intercambio de ideas a nivel global. Como prueba de la necesidad de adaptación al inglés por parte de la Escuela de

Ingenierías Industriales, es la inminente llegada a Málaga de empresas multinacionales en busca de talento joven, por su ubicación geográfica estratégica y su crecimiento en sectores emergentes como las energías renovables y las tecnologías de la información.

Palabras clave: Medición, calibración, incertidumbre típica, instrumento de medida, patrón de medida, laboratorio de metrología

Abstract

In this Final Project, the main focus from which the different parts of the project have been developed has been English applied to engineering.

First of all, a part of the syllabus of the Metrology and Quality course has been translated into English, which is a discipline that focuses on the study and application of measurement and quality control techniques in various industrial and scientific processes in order to ensure the accuracy, reliability and traceability of measurements and ensure that products or services meet the established standards.

Specifically, the units addressed are: Variability of Measurements, in which concepts such as systematic error in a measurement, the difference between precision and accuracy, the definition of repeatability and reproducibility, or the meaning of the tolerance of a measurement are exposed; Uncertainty Calculation, in which it is explained what components constitute measurement uncertainty, types of uncertainty evaluation or how it should be expressed; Metrology Laboratory, which emphasizes the importance of traceability, that is, the ability to link a measurement to international or national reference standards, and the atmospheric conditions of the laboratory in a measurement process.

Therefore, the translation of these units represents a small progress in the commitment to the internationalization of the School of Industrial Engineering of Malaga by allowing English-speaking students to access a complete and understandable syllabus. For this purpose, an exhaustive analysis of the original content has been carried out and the possible obstacles to adapt it to English have been identified, reaching the conclusion that the best way to carry out the translation is by contrasting it with official Metrology documents and technical dictionaries for engineers. In addition, a glossary has been developed as an auxiliary tool to facilitate the understanding of the vocabulary and phonetics of the theoretical part, both from English to Spanish and from Spanish to English, so that both national and international students can understand the translation and it can even be very useful in case they have to present a paper in the classroom.

Likewise, in order to put into practice the concepts exposed and to evaluate in an objective way the level of knowledge and competences acquired, a calibration report has been made as a work model in a laboratory in which the calibration uncertainty of a measuring instrument is to be found, which will serve as a guide for the students to make a calibration report and learn the essential notions of this part of the course, since the fundamental concepts of the three units mentioned above have been applied.

Thus, this report has been developed in English with the aim of demonstrating the importance of English in the working environment of the engineering world, also serving as a practical example for the course. Finally, this Final Year Project demonstrates the need for the School of Industrial Engineering to offer a teaching program completely in English, due to the many doors it opens in the labor market, since the possibility of communicating effectively in English allows collaboration in international environments and thus facilitates the exchange of ideas at a global level. Proof of the need for the School of Industrial Engineering to adapt to English is the recent arrival in Malaga of multinational companies in search of young talent, due to its strategic geographical location and its growth in emerging sectors such as renewable energies and information technologies.

Keywords: Measurement, calibration, standard uncertainty, measuring instrument, gauge block, metrology laboratory

ÍNDICE

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 2.1 | Introducción..... | 5 |
| 2.2 | Objetivos | 6 |
| 2.3 | Metodología | 7 |
| 2.4 | Resultados obtenidos..... | 8 |
| 2.5 | Conclusiones..... | 11 |
| 2.6 | Referencias bibliográficas | 12 |

2.1 Introducción

El presente documento, denominado “Base de datos léxica (Inglés/Español-Español/Inglés) Metrología parte IV”, constituye el Trabajo de Fin de Estudios de D. Álvaro Sánchez Aguilera, en el Grado de Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto como parte del Doble grado Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial de la Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Málaga.

El foco central de este trabajo principalmente es dar visibilidad a un acontecimiento tan importante como es el auge del inglés en las últimas décadas como consecuencia de la globalización. Siendo la *lingua franca* de la actualidad, el inglés es usado en cualquier situación comunicativa entre personas de diferentes orígenes, lo que lleva a la sociedad española, la necesidad de implicarnos en el aprendizaje del inglés desde edades tempranas para continuar con el proceso de internacionalización. Sin embargo, es importante entender que, a pesar de saber inglés, es necesario especializarse en la rama que se estudia, en este caso, la ingeniería. Prueba de ello es mi experiencia como estudiante de Erasmus en Edimburgo, Escocia, donde a pesar de tener conocimientos en inglés, seguir una clase con un vocabulario ingenieril rico no era fácil, sin embargo, a los demás estudiantes, de diferentes países europeos y asiáticos, no se les apreciaba un ápice de duda. Así, me di cuenta de que no sólo vale aprender inglés para poder entender y mantener una conversación, por ello, realizar una base de datos léxica de la asignatura de Metrología y Calidad, junto con herramientas que faciliten la comprensión, como los glosarios, es una manera de evolucionar y avanzar, por parte de nuestra Universidad de Málaga.

Hacer un programa docente que permita a estudiantes internacionales venir a nuestra universidad, nos enriquecerá promoviendo la diversidad y la internacionalización, y, además, permitirá subir puestos en el ranking de mejores universidades de España, lo cual es importante de cara al currículum vitae. Por lo que, tener un compromiso con la internacionalización de la Escuela de Ingenierías, empieza por tener un temario traducido para todas las asignaturas

Cabe destacar que, siendo una persona con afán de superación, querer trabajar en una empresa internacional, implica tener un gran conocimiento en inglés. De hecho, una vez finalice mis estudios, empezaré a trabajar en Amazon, lo cual no sería posible si no fuese por mi interés en la lengua inglesa ya que, desde el proceso de selección, como son las entrevistas, todas se llevan a cabo en inglés, por lo que, no podemos permitir reducir nuestro abanico de posibilidades en el mercado laboral por tener un conocimiento pobre en dicho idioma.

Otra de sus ventajas es que gran parte de la información disponible en línea está en inglés, y por ello, un conocimiento del mismo, permite acceder a una amplia gama de recursos, como libros, artículos, videos y cursos en línea, y así, tener una biblioteca de información mucho más grande que si solo conocemos el castellano.

Por otro lado, es importante poner en práctica lo aprendido en la traducción del temario, para adquirir una comprensión más profunda y significativa de los conceptos. Así, con un ejercicio práctico como realizar un informe de calibración de uno de los instrumentos de medida de la Escuela de Ingenierías Industriales, será la segunda parte del trabajo. De esta manera, habrá una mejor asimilación de la información con la que se ha trabajado, ya que cuando más se aprende es cometiendo errores, viendo

cómo se ha fallado e intentando hacer un buen trabajo de la manera más eficaz posible. Además, hacer un trabajo práctico individual supone un desafío, el cual permite ganar confianza en uno mismo cuando se está satisfecho de lo realizado. Además, este informe se ha realizado en inglés, haciendo hincapié en el mensaje que se quiere dar con este trabajo de fin de grado.

2.2 Objetivos

El presente Trabajo de Fin de Estudios está comprendido en tres partes, respecto a la asignatura de Metrología y Calidad: Una parte teórica que corresponde con el contexto de la docencia en el ámbito universitario, para lo cual, se ha realizado una traducción y un glosario de los últimos 3 temas de dicha asignatura, correspondiente al último curso del Grado de Ingeniería Mecánica (6 créditos ECTS) de carácter obligatorio. Dicha asignatura engloba conceptos básicos de metrología, como la definición de medición, unidades de medida, errores de medición, magnitudes, exactitud, precisión, trazabilidad y calibración. Además, estudia el funcionamiento, características y aplicaciones, de diferentes instrumentos de medida como calibradores, micrómetros, goniómetros, osciloscopios, balanzas, pies de rey, entre otros. Asimismo, analiza los métodos y procedimientos necesarios para calibrar y verificar la precisión de los instrumentos de medición; explica cómo se establece una cadena de trazabilidad, la cual conecta los resultados de las mediciones realizadas en un laboratorio con las instituciones nacionales e internacionales referentes en la metrología, para garantizar la confiabilidad de las mediciones, y expone la normativa a seguir para asegurar el control de calidad.

La traducción de esta parte de la asignatura está incluida en el Anexo I, lo que permitirá junto con el resto de las traducciones de dicha asignatura, ampliar el abanico de posibilidades que tienen los estudiantes para elegir la enseñanza en inglés, ya que, en el grado de Ingeniería de Diseño Industrial, sólo Álgebra es impartida en español e inglés. Esto supone que los estudiantes extranjeros que vienen a la Escuela de Ingenierías Industriales tengan que traducir a su lengua, los temarios a medida que van estudiando. De esta manera, si tenemos en cuenta los beneficios que conlleva a la universidad y a Málaga, la existencia de diversidad cultural, el impacto económico que supone o la riqueza que aporta el intercambio de ideas con estudiantes extranjeros, es esencial un programa docente en la lengua inglesa, que empieza por traducir el temario al inglés.

Asimismo, la segunda parte del trabajo consta de un glosario, el cual proporciona una referencia rápida de los términos utilizados en el texto, permitiendo consultar algún término en caso de duda. Además, sirve para evitar la variación o inconsistencia en la forma en que se utilizan los términos en el texto principal.

Por otro lado, la tercera parte del trabajo es práctica, ya que, se asemeja a lo que podría ser un contexto de ámbito laboral, donde se abordará un informe de calibración, a partir de unas medidas obtenidas con patrones longitudinales.

Por tanto, los objetivos son:

- Fomentar la importancia del inglés en el ámbito laboral

- Mejorar la oferta académica de asignaturas impartidas en inglés
- Realizar la traducción de tres temas de la asignatura de Metrología y Calidad, con su correspondiente glosario para una mejor comprensión
- Desarrollar un informe de calibración, como puesta en práctica de lo aprendido en la parte teórica

2.3 Metodología

Para la realización de este Trabajo de Fin de Estudios, se ha procedido a la traducción de las unidades: Tema 9: Variabilidad de las medidas, Tema 10: Cálculo de la incertidumbre, Tema 11: Laboratorio de Metrología. Dicho material ha sido proporcionado por la Dra. Dña. María Jesús Martín Sánchez.

En el transcurso de la traducción de dicho material, se han llevado a cabo numerosas revisiones para hallar errores o usar palabras más precisas para el contexto en el que se encuentran, bajo la supervisión de la Doctora Dña. Inmaculada Luque Vázquez y Dña. Marisa Caccia, pertenecientes al Departamento de Filología Inglesa, Francesa y Alemana de la Universidad de Málaga. Como herramientas de apoyo para la traducción del mismo, se ha recurrido a diccionarios técnicos para ingenieros, de fonética, normas UNE, documentos oficiales de los organismos que son referencia en la Metrología, como el libro publicado por el Centro Español de Metrología (CEM), llamado *Vocabulario Internacional de Metrología, conceptos fundamentales y generales, y términos asociados* (3ª Edición) 2012, y su versión en inglés *International Vocabulary of Metrology* publicado por el Organismo Internacional de Metrología Legal (OILM) que trabaja en conjunto con la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO), variedad de software como DeepL Translator o el diccionario digital Linguee, los cuales son utilizados ampliamente para la traducción de textos de cualquier temática, debido a la gran información que posee. Asimismo, para palabras más específicas, se ha contrastado con documentos en inglés para hacer una traducción precisa, como, por ejemplo, las siglas de los organismos internacionales de pesas y medidas, puesto que en estos casos no puede haber una diferencia ya que son los que imparten las reglas en el ámbito de la metrología, o expresiones como ‘patrón de medida’, en la que ninguna de las traducciones posibles con el diccionario como recurso es la correcta.

Por otro lado, para las transcripciones fonéticas del inglés al español y viceversa, se ha usado el Diccionario de Cambridge, por usar inglés británico que es la lengua más hablada en Europa, y que se diferencia del inglés americano en algunos aspectos, como la pronunciación o la gramática, ya que, en el inglés británico, la "r" se pronuncia de manera suave y no se pronuncia al final de las palabras y el presente perfecto se usa con frecuencia, mientras que en el inglés americano, la "r" se pronuncia con mayor énfasis y se usa más el pasado simple. Asimismo, es Cambridge, la Universidad que más exámenes de inglés organiza en España y por tanto, los que evalúan cómo se pronuncian las palabras. también, han sido de ayuda recursos de software como el programa EasyPronunciation, entre otros.

Por último, para realizar el informe de calibración, el instrumento seleccionado para estudiar su incertidumbre de calibración ha sido uno de los micrómetros exteriores del laboratorio de Metrología y Calidad. Para ello, se han usado diferentes patrones de longitud, hasta realizar un total de 11 puntos de calibración. Además, en cada punto de calibración se han realizado 12 medidas para evitar que la muestra

no fuese válida en caso de un error grueso en la medición. Asimismo, se ha tenido en cuenta las condiciones en las que se han realizado las medidas, para confirmar que cumplen las condiciones de un laboratorio de metrología y se ha procedido a realizar el informe de calibración correspondiente a dicho micrómetro.

2.4 Resultados obtenidos

Respecto a la traducción de los temas 9, 10 y 11 sobre la variabilidad de las medidas, el cálculo de incertidumbre y el laboratorio de metrología respectivamente (Anexo I), se muestra un pequeño fragmento del temario donde se aprecia la diferencia entre una traducción simple, sin tener en cuenta, términos específicos, y posteriormente una traducción correcta y precisa:

- “Dicha incertidumbre se corresponde con un factor de cobertura k , de forma que:

$$u_o = \frac{U_o}{k}$$

Siendo u_o , la incertidumbre típica asociada al patrón”

- X “This uncertainty corresponds to a coverage factor k , as follows:

$$u_o = \frac{U_o}{k}$$

Being u_o , the typical uncertainty associated with the pattern”

- ✓ “This uncertainty corresponds to a k coverage factor, so that:

$$u_o = \frac{U_o}{k}$$

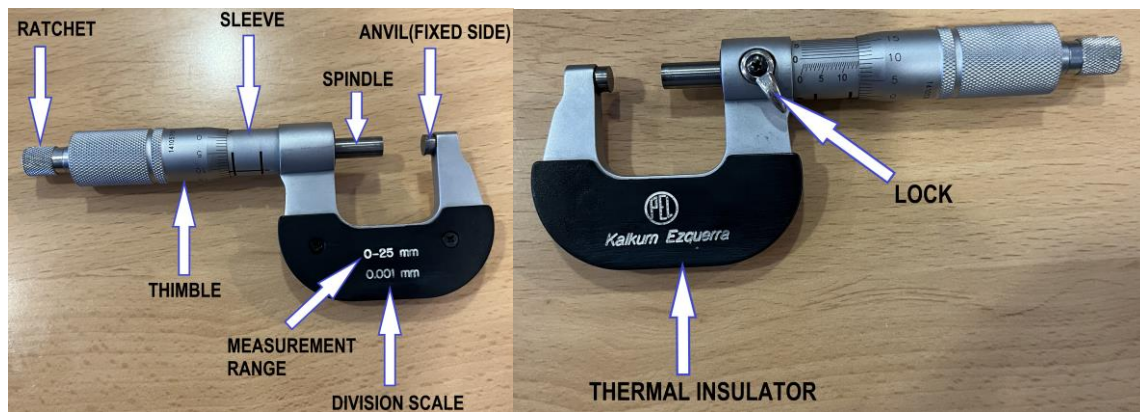
Being u_o , the standard uncertainty associated to that gauge block”

Asimismo, se muestra a continuación una pequeña parte del glosario realizado como ayuda a la comprensión (Anexo II) en el que se puede observar la traducción de español a inglés con la fonética en inglés y viceversa:

| Español | English | Phonetics |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Medida | Measurement | /'meʒ.ə.mənt/ |
| Variabilidad | Variability | /'veəriə'biləti/ |
| Incertidumbre | Uncertainty | /ʌn'sɜ:.tən.ti/ |
| Operador | Operator | /'ɒp.ər.eɪ.tər/ |
| Valor | Value | /'væl.ju:/ |
| Magnitud | Magnitude | /'mæg.nɪ.tʃu:d/ |
| Instrumento de medida | Measuring instrument | /'meʒərɪŋ ɪn.strə.mənt/ |
| Micrómetro milesimal | Millesimal Micrometer | /mɪ'lesɪməl maɪ'krɒmɪtəʳ/ |
| Resultado | Result | /'rɪ.zʌlt/ |

| English | Español | Fonética |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Measurement | Medida | /me'ðiða/ |
| Variability | Variabilidad | /barjaβili'ðað/ |
| Uncertainty | Incertidumbre | /inθerti'ðumbre/ |
| Operator | Operador | /opera'ðor/ |
| Value | Valor | /ba'lor/ |
| Magnitude | Magnitud | /mayni'tuð/ |
| Measuring instrument | Instrumento de medida | /instru'mento ðe me'ðiða/ |
| Millesimal Micrometer | Micrómetro milesimal | /mi'krometro milesi'mal/ |
| Result | Resultado | /resul'taðo/ |

Respecto al informe de calibración (Anexo III) del micrómetro de exteriores de dos contactos del laboratorio de Metrología y Calidad en la Escuela de Ingenierías Industriales, con un campo de medida de 0-25mm y división de escala 1:1000, que se muestra a continuación:



Se han obtenido los siguientes resultados:

- Para corrección nula e incertidumbre constante para todo el rango de medida (I):
A partir de la siguiente fórmula:

$$U = \text{máx}(U_i)_{\text{corregida}} = \text{máx}(U_{ci} + |\Delta x_{ci}|) \text{ mm}$$

Obtenemos, **U=0,006 mm**

Es decir, para este método de cálculo de la incertidumbre, cuando se realiza una medición con el micrómetro, puede haber una variación de 6 milímetros respecto a la medida tomada.

- Para corrección e incertidumbre constante:
A partir de las siguientes fórmulas:

$$u_i = \sqrt{u_{0i}^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{\delta_{ci}}{3} + \dots}$$

$$U = k \cdot \text{max}(u_i) \text{ mm}$$

Obtenemos, **U=0,003mm**

Es decir, para este método de cálculo de la incertidumbre, cuando se realiza una medición con el micrómetro, puede haber una variación de 3 milímetros respecto a la medida tomada.

- Para corrección nula e incertidumbre constante para todo el rango de medida (II):
A partir de las siguientes fórmulas:

$$u_i = \sqrt{u_{0i}^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{\Delta x_{ci}^2}{3} + \dots}$$

$$U = k \cdot \max(u_i) \text{ mm}$$

Obtenemos, **U=0,006 mm**

Es decir, para este método de cálculo de la incertidumbre, cuando se realiza una medición con el micrómetro, puede haber una variación de 6 milímetros respecto a la medida tomada.

2.5 Conclusiones

La traducción de los temas 9, 10, 11 y 12 de la asignatura de Metrología, nos han conducido a la conclusión de que el inglés es una lengua mucho más fácil para crear frases por una gramática más simplificada en la que no hay tantos tiempos verbales como en el castellano y su orden de sujeto-verbo-objeto no cambia generalmente. Asimismo, es fácil observar cómo el inglés, cuyo origen es germánico, tiene mucha influencia del francés, como, por ejemplo, una de las palabras que más se ha usado, “gauge”. Sin embargo, el castellano proviene del latín, como la palabra “calibrar” o el árabe, como la palabra “arroba”.

También, la pronunciación de ambas lenguas es muy distinta. El inglés tiene una mayor variedad de sonidos consonánticos y vocálicos, con unas reglas para pronunciar que no son tan consistentes como en el español, ya las combinaciones de letras pueden tener infinitud de pronunciaciones.

Respecto al informe de calibración del micrómetro de exteriores, se ha realizado con precisión y minuciosidad, proporcionando una evaluación exhaustiva de la precisión y fiabilidad del instrumento de medición. A través del proceso de calibración, se han verificado y ajustado los errores sistemáticos y aleatorios asociados al micrómetro, garantizando la validez de las mediciones obtenidas.

La incertidumbre que se produce al realizar una medición con el micrómetro, se encuentra dentro de los límites aceptables, ya que es un valor de incertidumbre de 0,003 mm para la corrección e incertidumbre constante y un valor de 0,006 mm para ambos métodos de corrección nula e incertidumbre constante. Por tanto, se puede afirmar que el micrómetro cumple correctamente sus funciones. Además, es conveniente saber que un correcto mantenimiento del micrómetro permitirá que su rendimiento sea óptimo a lo largo del tiempo. Así, evitar forzar el micrómetro apretando el bloque de galgas que se está midiendo es una forma de mantener el micrómetro en buen estado, de hecho, esa es la función de la carraca.

Por otro lado, se comprueba que, aunque el lenguaje sea diferente, los procesos a seguir son los mismos, es decir, los cálculos que se realizan no varían. Asimismo, las palabras que aparecen en los cálculos son las que más veces se repiten a lo largo del informe y, por tanto, permanecen en la memoria con facilidad. Así, son las palabras explicativas del principio del informe las más difíciles de aprender, pero las que nos permitirán explicar en una entrevista de trabajo lo que se ha hecho. Además, demostrar soltura en el dominio de palabras con un alto nivel de dificultad producirá en el entrevistador una sensación de sabiduría y compromiso con el aprendizaje, lo que aumentará las posibilidades de ser contratado.

Por otra parte, desde el punto de vista de un estudiante, me hubiera gustado tener la oportunidad de estudiar en mi ciudad los estudios que me gustan en inglés, por la multitud de puertas que se abren en el mercado laboral, y porque es evidente que es una desventaja respecto al resto del mundo que puede trabajar en cualquier parte, sin tener limitación del idioma, como es en nuestro caso. Creo que se debería de hacer este proceso de conseguir que todo el temario estuviese disponible en inglés, más pronto que tarde. Es evidente que empresas del prestigio y tamaño de Google o Amazon, ven Málaga como un centro de innovación y tecnología, con una gran inversión en infraestructuras, comprometida con las energías renovables y que, por su calidad de vida, atrae a multitud de personas. Por ello, debemos

aprovechar esta oportunidad laboral que se está creando en Málaga, y pasa por especializarnos en el inglés aplicado a la ingeniería.

2.6 Referencias bibliográficas

- Diccionarios impresos

Beigbeder, F. & Beigbeder, J. M. (2009). *Diccionario politécnico de las lenguas española e inglesa: inglés-español*. Madrid: Díaz de Santos. 3ª edición.

Diccionario Larousse. Español-inglés, English-Spanish. México: ediciones Larousse.

McGraw-Hill, (2003), *Dictionary of Engineering*.

Miranda, A. y Calle, J. (2000). *Diccionario de términos técnicos (inglés-español)*. Granada: Editorial Comares.

Robb, L. A. (1971), *Diccionario para ingenieros. Español/Inglés-Inglés/Español*. Compañía editorial continental, México.

Rojas, G. (2017). *Diccionario técnico inglés-español*

- Diccionarios on-line

DeepL Translator. Disponible en: <https://www.deepl.com/es/translator> [Consultado por última vez: 16 Mayo, 2023].

Diccionario Cambridge. Disponible en: <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles-espanol/> [Consultado por última vez: 16 Mayo 2023].

Diccionario de la Real Academia Española. Disponible en: www.rae.es. [Consultado por última vez: 17 Mayo, 2023].

Diccionario Merriam Webster. Disponible en: <https://www.merriam-webster.com/>[Consultado por última vez: 12 Mayo, 2023].

EasyPronunciation, Disponible en: <http://easypronunciation.com/es/spanish-phonetic-transcription-converter> [Consultado por última vez: 26 Mayo, 2023].

Lingorado. Disponible en: <http://lingorado.com/ipa/es/> [Consultado por última vez: 28 Mayo 2023].

Linguee. Diccionario inglés-español. Disponible en <http://www.linguee.es/> [Consultado por última vez: 20 Mayo, 2023].

OxfordReference. Disponible en: <http://www.oxfordreference.com/> [Consultado por última vez: 15 Mayo, 2023].

- Referencias institucionales

AENOR, Norma UNE 82-306-80: “*Micrómetros de exteriores*”

CEM, (2002), *Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional*.

Guía ISO, “Expresión de las incertidumbres en las medidas”.

CEM, (2003), *Procedimiento DI-005 para la calibración de micrómetros de exteriores de dos contactos*. Edición 0.

CEM,(2012), *Vocabulario Internacional de Metrología, conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. 3ª Edición.

AENOR, UNE-EN-ISO 17025:2005 “*Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*”.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE
INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

12 de Junio de 2023

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento

Área de conocimiento

Documento 3: ANEXOS

BASE DE DATOS LÉXICA(INGLÉS/ESPAÑOL-ESPAÑOL/INGLÉS). METROLOGÍA PARTE IV

Grado

Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor

- D. Álvaro Sánchez Aguilera
NIF: 77194358- X ☎ 639 261 278 ✉ Alvarosanchezaguilera@uma.es
Grado: Mecánica + Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Tutor

- Dña. Inmaculada Luque Vázquez

Cotutor

- Dña. Marisa Caccia

1 ANEXO I

INDEX

| | | |
|-------|---|-----|
| 1 | ANEXO I | 0 |
| 2 | Figure index | 3 |
| 3 | Table index | 4 |
| 4 | Texto original..... | 5 |
| 5 | Unit 9: VARIABILITY OF MEASUREMENTS..... | 83 |
| 5.1 | Uncertainty Concept..... | 83 |
| 5.2 | Uncertainty causes..... | 84 |
| 5.2.1 | Uncertainties due to the operator or measuring procedure | 85 |
| 5.2.2 | Uncertainties due to the measuring instrument | 88 |
| 5.2.3 | Uncertainties due to the piece or magnitude to be measured..... | 89 |
| 5.2.4 | Uncertainties due to environmental conditions or corrections..... | 91 |
| 5.3 | Other error causes | 92 |
| 5.3.1 | Systematic deviations from nominal or instrument drift | 92 |
| 5.3.2 | Gross errors or operator errors | 93 |
| 5.4 | Statistical concepts..... | 93 |
| 5.4.1 | Central Limit Theorem | 97 |
| 5.5 | Rejection criteria..... | 99 |
| 5.6 | Tolerance and measurement uncertainty | 104 |
| 6 | Unit 10: UNCERTAINTY CALCULATION | 106 |
| 6.1 | Introduction | 106 |
| 6.1.1 | Calibration correction..... | 106 |
| 6.2 | Documents on calculation of uncertainty | 107 |
| 6.3 | Variance propagation Law | 111 |
| 6.4 | Measurement uncertainty evaluation process..... | 113 |
| 6.4.1 | Measurement modeling | 114 |
| 6.4.2 | Uncertainty contribution assessment | 114 |
| 6.4.3 | Combined standard uncertainty determination | 120 |
| 6.4.4 | Expanded uncertainty determination..... | 121 |
| 6.5 | Equipment calibration..... | 124 |
| 6.5.1 | Local or partial calibration at one point..... | 125 |
| 6.5.2 | Calibration at various scale points..... | 130 |
| 6.5.3 | Measurement range global calibration | 131 |
| 6.6 | Measurement and calibration capability..... | 134 |
| 7 | Unit 11: THE METROLOGY LABORATORY | 136 |
| 7.1 | Introduction | 136 |
| 7.2 | Constructive and environmental conditions | 136 |
| 7.3 | Laboratory organization..... | 140 |
| 7.3.1 | Staff organization..... | 140 |
| 7.3.2 | Equipment organization | 141 |
| 7.4 | Calibration Plan..... | 143 |
| 7.4.1 | Traceability Chart..... | 144 |
| 7.4.2 | Level diagram | 145 |
| 7.4.3 | Calibration procedure..... | 147 |
| 7.4.4 | Result file..... | 149 |

| | |
|--|-----|
| 7.4.5 Calibration labels | 150 |
| 7.5 Intercomparison | 151 |
| 7.6 Laboratory accreditation..... | 152 |
| 7.7 Legal metrology..... | 153 |
| 7.8 Situation in Spain in the metrological field | 155 |

2 Figure index

| | | |
|----|--|-----|
| 4 | Unit 9: VARIABILITY OF MEASUREMENTS | |
| | Figure 1. Uncertainty causes..... | 85 |
| | Figure 2. Reading errors..... | 86 |
| | Figure 3. Parallax error..... | 86 |
| | Figure 4. Positioning errors..... | 87 |
| | Figure 5. Cosine error..... | 87 |
| | Figure 6. Spherical end patterns..... | 88 |
| | Figure 7. Excessive pressure..... | 88 |
| | Figure 8. Instrument wear uncertainties..... | 89 |
| | Figure 9. Shape defects of the pieces to be measured..... | 90 |
| | Figure 10. Measurement in horizontal position..... | 90 |
| | Figure 11. Normal distribution..... | 96 |
| | Figure 12. Chauvenet criterion application..... | 103 |
| 5. | Unit 10: UNCERTAINTY CALCULATION | |
| | Figure 1. GUM evolution..... | 108 |
| | Figure 2. EA 4-02 evolution..... | 110 |
| | Figure 3. Concepts related to quality management in measurement processes..... | 111 |
| | Figure 4. U Evaluation process..... | 113 |
| | Figure 5. Rectangular or uniform distribution..... | 118 |
| | Figure 6. Global correction..... | 133 |
| 6. | Unit 11: THE METROLOGY LABORATORY | |
| | Figure 1. Metrology laboratory structure..... | 136 |
| | Figure 2. Equipment file..... | 142 |
| | Figure 3. Internal coding example..... | 143 |
| | Figure 4. Traceability chart..... | 145 |
| | Figure 5. Level diagram..... | 146 |
| | Figure 6. Calibration group..... | 147 |
| | Figure 7. Result file extract..... | 150 |
| | Figure 8. Calibration label..... | 150 |
| | Figure 9. Metrological control..... | 154 |
| | Figure 10. Traceability scheme in Spain..... | 157 |

3 Table index

| | | |
|----|---|-----|
| 4 | Unit 9: VARIABILITY OF MEASUREMENTS | |
| | Table 1. Support points positions..... | 91 |
| | Table 2. Measurement records..... | 95 |
| | Table 3. Measurement series..... | 98 |
| | Table 4. Student's factor..... | 99 |
| | Table 5. Chauvenet coefficient..... | 100 |
| | Table 6. Table of results..... | 101 |
| 5. | Unit 10: UNCERTAINTY CALCULATION | |
| | Table 1. Variances according to distribution..... | 119 |
| | Table 2. Uncertainty balance..... | 120 |
| | Table 3. Normal distribution K values..... | 122 |
| | Table 4. Coverage factor according to the Vef factor..... | 123 |
| | Table 5. Partial calibration results..... | 131 |
| | Table 6. Corrected uncertainty..... | 132 |
| | Table 7. Uncertainty and local correction table..... | 134 |
| | Table 8. Calibration uncertainty summary table..... | 135 |
| 6. | Unit 11: THE METROLOGY LABORATORY | |
| | Table 1. Environmental conditions recommendations..... | 138 |

4 Texto original

TEMA 9: Variabilidad de las medidas

1. Concepto de incertidumbre

A un operario que desee determinar el valor de una magnitud puede resultarle suficiente el tomar un instrumento de medida, por ejemplo, un micrómetro milesimal, y realiza una medición que le pueda dar un valor como $L = 10,235$ mm, lo cual será válido en un cierto número de ocasiones, aunque, como se puede apreciar, con la sola indicación del mesurando no queda perfectamente acotada la precisión de dicho resultado. Puede dar un paso adicional y pensar que puesto que a la escala del aparato se pueden leer valores con hasta tres cifras decimales, y por representar este último dígito los micrómetros, el valor de la medición puede oscilar entre un número superior y otro inferior al mostrado, esto es, entre 10,234 y 10,236. Pudiendo representar la incertidumbre en el resultado como $L = 10,235 \pm 0,001$ mm. Resulta evidente, sin embargo, que no tenemos la seguridad de que este intervalo sea suficientemente correcto. En caso de necesitar una medida de precisión, habrá que calcular y añadir al resultado un término precedido de un signo \pm , conocido como incertidumbre del resultado de la medida, que cuantifica la precisión, entendida esta como un concepto cualitativo de la medida. En metrología el resultado de la medida de una magnitud M se expresa mediante la relación:

$$M = m \pm U$$

donde:

- m es el valor más probable de la magnitud M
- U es la incertidumbre de la medida

De esta forma se pretende indicar que el verdadero valor de la magnitud medida se encuentra en el interior del intervalo:

$$m - U < M < m + U$$

Pudiendo por ello definir la incertidumbre de una medida como:

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

“Valor de un intervalo, generalmente simétrico, dentro del cual se encuentra, con una alta probabilidad, el valor verdadero de la magnitud medida”

De donde queda implícito el carácter aleatorio de la incertidumbre de medida, sugiriendo la conveniencia de realizar un tratamiento estadístico de la incertidumbre que permita asegurar esa alta probabilidad de acotar el valor verdadero.

En realidad en Metrología no se considera la existencia de valores verdaderos sino que se suele hablar más bien de valores “convencionalmente verdaderos”, o más probables, puesto que su valor exacto no se conocerá nunca. Se ha abandonado por ello la clásica definición del error absoluto como diferencia entre valor medido x_m y el valor verdadero x_R .

$$\varepsilon = |X_m - X_R|$$

El término error ha sido sustituido por el de incertidumbre.

Para determinar la incertidumbre de un instrumento de medida, hay que compararlo con un patrón o instrumento de mayor precisión, con valor e incertidumbre conocidos, de forma que el instrumento a calibrar trabaje en la forma que le es habitual. Realizando una serie de medidas que facilitan indicaciones del instrumento a calibrar, en correspondencia con el valor o valores del patrón, se pone de manifiesto la posible discrepancia del patrón, lo que permite determinar la corrección a aplicar a las indicaciones del instrumento calibrado. Asimismo, es posible asignar un valor a la incertidumbre del instrumento calibrado, según un procedimiento bien elaborado, y de acuerdo con recomendaciones de organismos internacionales.

Dicha incertidumbre, o semiamplitud del intervalo centrado sobre el valor numérico de la medida, se calcula teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales a tal efecto, aunque en dicho cálculo se incluyen valoraciones subjetivas unidas a la experiencia y condiciones de medida de un determinado operador y laboratorio. En el cálculo de dicha incertidumbre interviene una parte aleatoria, con tratamiento estadístico, puesto que una medida es algo que se realiza en un determinado momento, en unas determinadas circunstancias, y el valor de dicha medida ha variado en el instante siguiente, constituyendo el conjunto de resultados sucesivos así obtenidos, una muestra estadística procedente de un fenómeno aleatorio, a partir de la cual es necesario deducir unas características poblacionales.

Asimismo, es necesario estimar la importancia de otras magnitudes y factores de influencia sobre la medida, y combinarlos en determinada manera con las influencias aleatorias, con objeto de extraer un intervalo que contenga el valor medido, con la certeza que se desee.

De acuerdo con la Recomendación 1 del CIPM, de 1981, la incertidumbre debe cuantificarse e interpretarse como una cantidad equivalente a una desviación típica, admitiéndose su multiplicación por un factor de incertidumbre k , normalmente de valor comprendido entre 1 y 3, y que debe especificarse como parte del resultado de la medida.

Resultado = Valor numérico \pm incertidumbre unidad (factor de incertidumbre)

Por ejemplo: 10,012 \pm 0,003 mm ($k=2$)

2. Causas de incertidumbre

La diferente naturaleza de los errores de medida se debe a que las causas que la provocan son a su vez de distinta naturaleza. Es imposible un conocimiento exacto de todas las causas de incertidumbre, ya

que éstas dependerán de las condiciones particulares de la medida, pero es conveniente conocer las más importantes y tener una idea que permita evaluar los errores más corrientes en todo proceso de medida.

En el tema primero se indicó la existencia de unas magnitudes que se denominaron de influencia y que se clasificaron en cuatro grupos. Utilizando esta misma clasificación, se puede sistematizar su estudio en causas de incertidumbres debidas a [Figura 1]:

- El operador o procedimiento de medida
- El instrumento de medida
- La pieza o magnitud de medida
- Las condiciones ambientales o correcciones

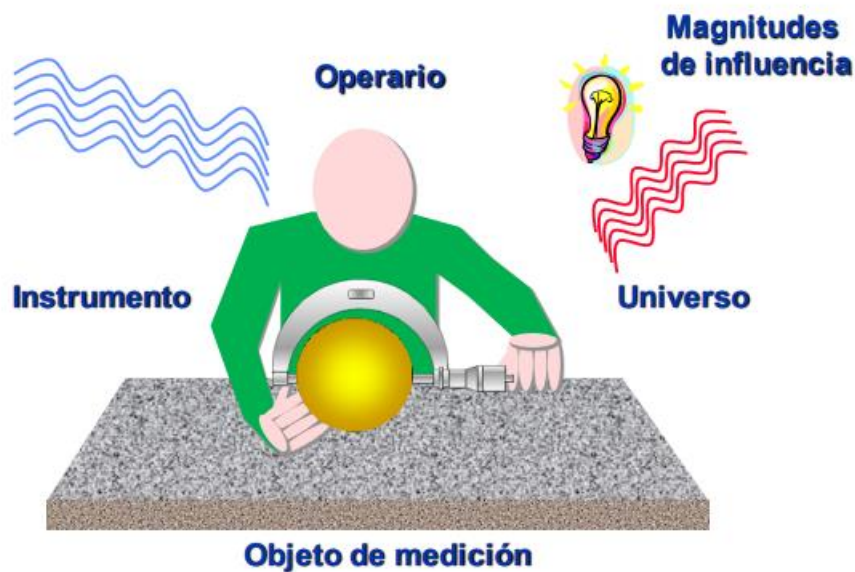


Figura 1. Causas de incertidumbres

2.1 Incertidumbres debidas al operador o procedimiento de medida

El operador influye en los resultados de la medida por la imperfección de sus sentidos así como por el grado de habilidad que posee. La tendencia actual en esta técnica es eliminar al máximo la intervención del operador, así como realizar diseños adecuados en los aparatos de medida para evitarlas. Las incertidumbres más usuales introducidas por el operador son:

Las incertidumbres más usuales introducidas por el operador son:

2.1.1 De lectura y/o paralaje

En los instrumentos de lectura no digital, los datos se obtienen de una graduación. En las lecturas de estas escalas resultan errores de apreciación, interpolación, coincidencia, etc., variables en forma muy compleja para cada persona [Figura 2]. Si además, la aguja está separada de la escala puede ocurrir el error de paralaje, que se comete cuando la visual forma un ángulo con la normal. Este error se corrige

situando la aguja muy cerca de la escala, y colocando en la escala un espejo, bastando al hacer la lectura tener la precaución de que coincida la aguja móvil con su imagen sobre el espejo. También se corrige este error haciendo que los espacios entre trazos de la escala sean lo mayor posible.

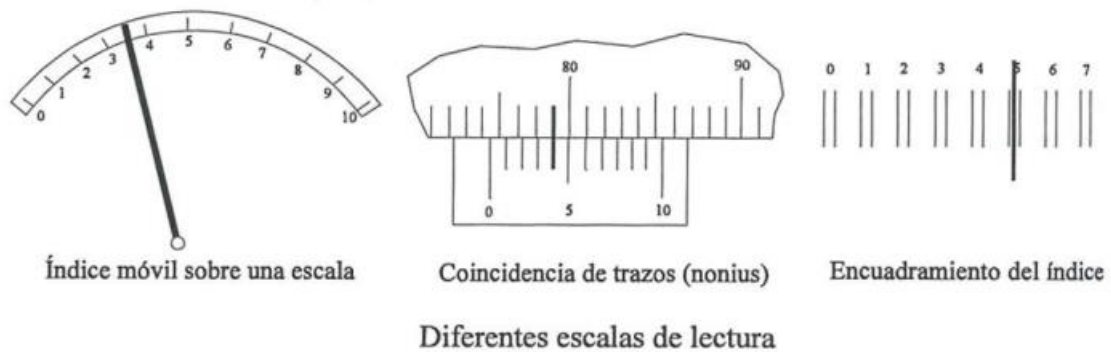


Figura 2. Errores de lectura

Caso de existir, el error de paralaje que se comete cuando la visual forma un ángulo α con la normal, en una escala separada del índice una distancia d , es [Figura 3]:

$$\epsilon_p = d \operatorname{tg} \alpha$$

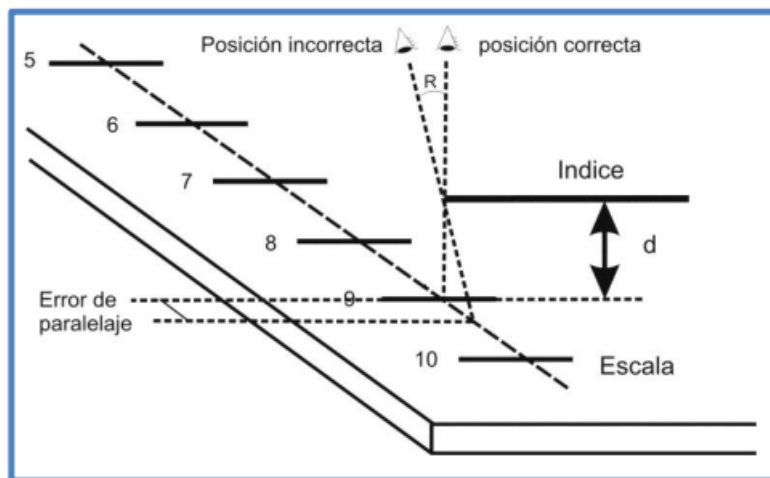


Figura 3. Error de paralaje

Por último conviene señalar que, por lo que a graduación se refiere, la mínima dimensión apreciable por el ojo humano normal (poder separador), es la comprendida en un ángulo visual de un minuto, lo cual para una distancia mínima de visión, también en ojo normal, de 250 mm, da una longitud apreciable de 0,05 mm.

En la práctica para leer adecuadamente en una escala se admite la necesidad de 10 veces más separación, es decir, un mínimo de 0,5 mm entre cada dos trazos consecutivos.

2.1.2 Por mal posicionamiento de la pieza

Se originan cuando el operador no coloca la pieza adecuadamente alineada con el instrumento de medida, o al contrario, en caso de pequeños aparatos manuales que miden sobre las piezas grandes. Es un error típico de los comparadores.

Otro ejemplo clásico de mal posicionamiento consiste en la colocación de la escala de medidas inclinada respecto a la dirección real de una pieza.

En general, casi todos los errores de posicionamiento se reducen a este caso de inclinación entre la escala y la dirección de la medida, por lo que son función del coseno del ángulo de inclinación y se les conoce también como errores del coseno.

$$\varepsilon = \frac{l}{\cos\alpha} - l = l \left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1 \right)$$

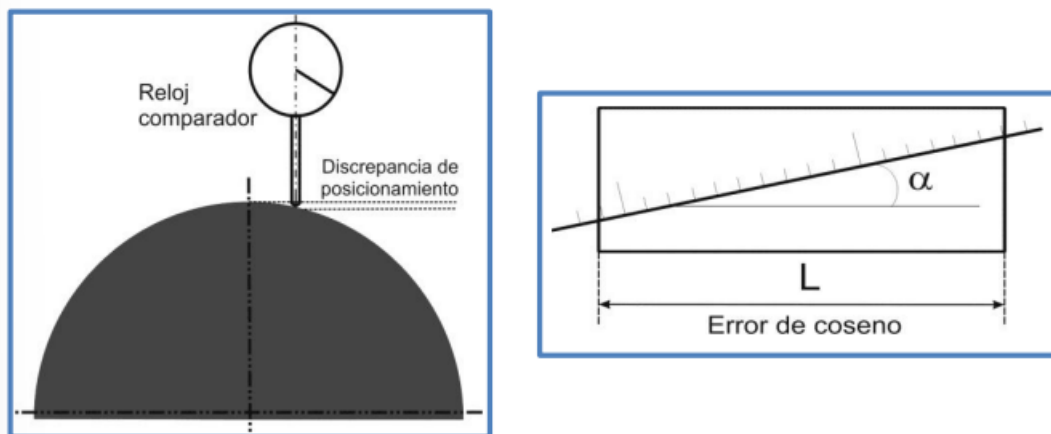


Figura 4. Errores de posicionamiento

En muchos casos, el ángulo es tan pequeño que el error resulta despreciable, pero puede ser significativo al crecer la longitud nominal que se mide, y complicarse si intervienen también las características del instrumento de medida. Así, por ejemplo, una colocación inadecuada de un instrumento cilíndrico en un micrómetro de exteriores, produce un error de [Figura 5]:

$$\varepsilon = D - D_0 = \frac{D_0}{\cos\alpha} + d \cdot \operatorname{tg}\alpha - D_0$$

$$\varepsilon = d \cdot \alpha + D_0 \frac{\alpha^2}{2}$$

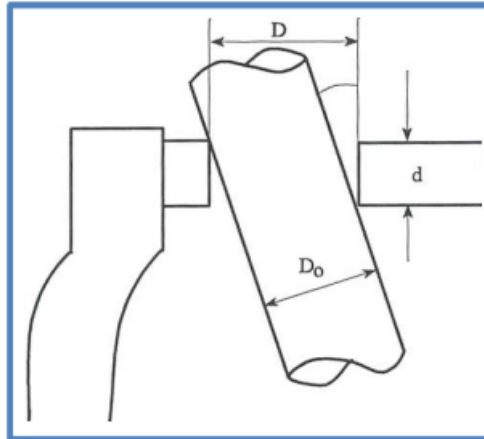


Figura 5. Error de coseno

La necesidad de evitar los errores de alineación en longitudes grandes, condujo al empleo de uno de los patrones de taller, más ingeniosos, la barra de extremos esféricos de diámetro igual a su longitud nominal. Evidentemente, en este elemento cualquier pequeña desalineación no modifica la longitud total l . Además, si se emplean dos de estas barras en combinación, una pequeña diferencia de alineación entre sus ejes e , no produce tampoco un error importante.

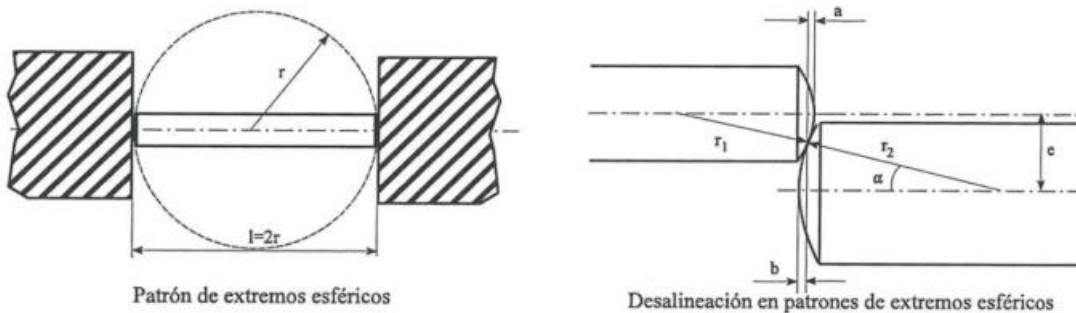


Figura 6. Patrón de extremos esféricos

2.1.3 Por presión excesiva

Son producidas por aplicar una presión excesiva al aparato medidor [Figura 7]. Actualmente, esta fuente de error está corregida en casi todos los instrumentos, en los cuales se limita la presión máxima a aplicar.

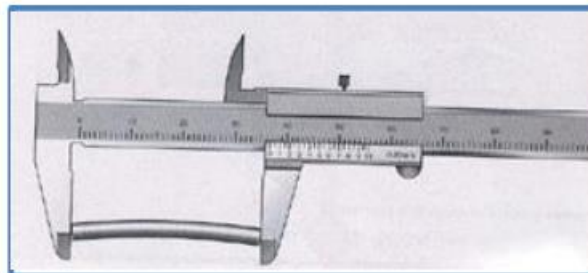


Figura 7. Presión excesiva

2.2 Incertidumbres debidas al instrumento de medida

Cualquiera que sea la precisión de diseño y fabricación de un instrumento, presentará siempre imperfecciones. Tanto éstas como las que irá adquiriendo con el uso, son fuentes de error atribuibles al instrumento.

2.2.1 De diseño y fabricación

Son defectos de planitud, paralelismo o concetricidad en los palpadores que han de entrar en contacto con las piezas, defectos en los órganos amplificadores (levas, engranajes, ejes, etc.), defectos en el grabado de las escalas, y cualquier otro que traiga el instrumento ya de fábrica. En general, las incertidumbres producidas por un instrumento en perfecto estado, no deben ser superiores a la décima parte de su escala, lo cual en el caso de instrumentos de precisión como puede ser una medidora de longitudes a cantos, exige certificado de incertidumbre de posición de cada uno de sus trazos en la regla patrón de referencia.

2.2.2 Por presión y forma de los contactos

Se deben a las deformaciones elásticas de los elementos en contacto bajo presión. En general se trabaja a muy bajas presiones de contacto (inferiores a 3 N) y con palpadores robustos, de forma que sean totalmente despreciables.

Cuando se realizan mediciones por comparación, no es necesario tener en cuenta estos errores de aplastamiento, a condición de que la pieza y el patrón de referencia sean del mismo material y presenten la misma forma geométrica.

Para realizar adecuadamente una medida mediante contacto entre un palpador y la superficie de una cierta pieza, es necesario que la forma de ambas superficies sea la apropiada. En general conviene emplear un palpador esférico para medir sobre superficies planas, mientras que los palpadores de superficie plana son propios para medidas sobre cilindros y esferas [Figura 8, b)].

2.2.3 Por desgaste del instrumento

El uso de los aparatos de medición como el de todo tipo de instrumentos, trae consigo un envejecimiento que va arrastrando cada vez más imprecisiones. De aquí la necesidad de verificaciones periódicas para comprobar si se mantiene dentro de sus especificaciones admisibles [Figura 8, a)].

A fin de reducir al mínimo estos efectos, las partes más expuestas al desgaste en los instrumentos de medida se realizan en materiales de gran resistencia; cromo duro, cromo níquel, metales preciosos, carburo de tungsteno, etc.

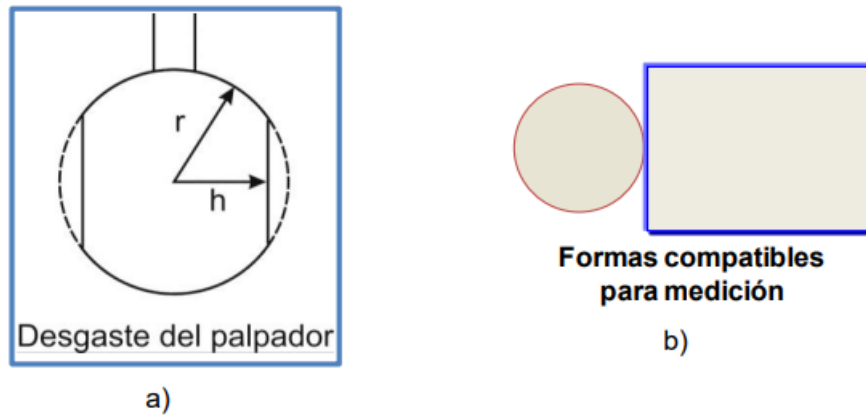


Figura 8. Incertidumbres debidas al instrumento

2.2.4 De alineación

Aparecen al comparar una pieza con su patrón y son mínimos cuando, para la realización de la medida comparativa, tanto la pieza como el patrón ocupan la misma posición. El error se debe a que, por muy perfectas que sean las guías sobre las que se desplaza el elemento de lectura o sensor, siempre existirá un cierto ángulo α de falta de alineación entre dos posiciones de lectura.

2.3 Incertidumbres debidas a la pieza o magnitud a medir

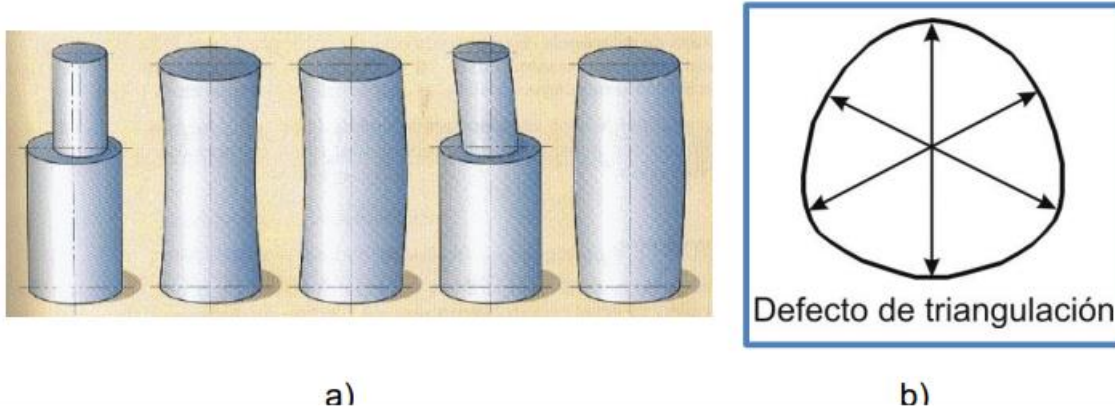
Cuando se efectúa la medida de una cierta cota, se sobrentiende que existe un sólo valor verdadero de dicha cota, pero en la realidad esto no sucede nunca, y las cotas se miden entre superficies de definición imperfectas, que poseen diferentes valores verdaderos de la misma

2.3.1 De forma

Al margen del estado microgeométrico que debe tener una calidad adecuada a la precisión de las cotas, puede presentarse distorsiones macrogeométricas que impidan la medición correcta de la cota [Figura 9, a)].

Un caso típico es el que se presenta en la medida del diámetro de un cilindro, en el que es necesario una verificación de la circularidad del mismo. En general, puede bastar la comparación de medidas según diferentes diámetros realizadas en diferentes condiciones para comprobar si existe ovalización u otro defecto de redondez, ya que se obtendrán diferentes resultados.

Sin embargo, pueden presentarse casos especiales, como la llamada “triangulación” de 3, 5, 7, o más vértices, en donde la pieza mantiene su diámetro constante en cualquier dirección a pesar de su defecto de circularidad [Figura 9, b)].



2.3.2 De deformación

Al igual que los palpadores de la máquina sufren deformaciones elásticas por la presión de contacto, las piezas por su propio peso, pueden tomar posiciones inadecuadas en la medición. Casos muy característicos de este fenómeno son la medida de una longitud en una varilla o regla apoyada en dos puntos [Figura 10, Tabla 1], y la contracción que presenta un bloque patrón al medirse en un interferómetro.

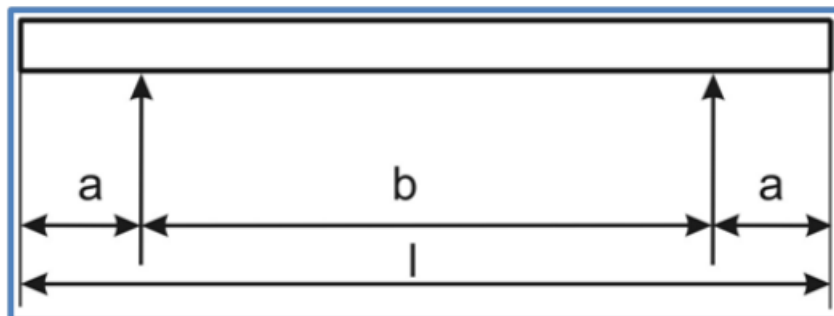


Figura 10. Medida en posición horizontal

Tabla 1. Posiciones de puntos de apoyo

| Puntos de apoyo | a | b |
|--|-----------------|-----------------|
| Mínima variación de la longitud de la fibra neutra | $0,220 \cdot l$ | $0,560 \cdot l$ |
| Caras paralelas (puntos de Airy) | $0,211 \cdot l$ | $0,578 \cdot l$ |
| Mínima flecha central | $0,223 \cdot l$ | $0,554 \cdot l$ |

2.3.3 De estabilización o envejecimiento

Existe un tipo de deformación poco conocido que es debido a modificaciones estructurales del material, y que puede llamarse incertidumbre de estabilización. Proviene del hecho de que en el temple de los aceros, el enfriamiento rápido necesario no permite que la fase austenita se transforme en la fase martensita, estable a la temperatura ambiente.

Queda un cierto porcentaje de austenita residual que se va transformando en martensita muy lentamente, en el transcurso de meses e incluso años. Como la estructura martensítica es un poco más voluminosa que la austenítica, esta transformación origina unas tensiones que producen a su vez una deformación que puede llegar a ser del orden de algunos micrómetros. La austenita residual, puede disminuirse mucho mediante un tratamiento térmico adecuado; en este sentido los aceros que se utilizan en los patrones materializados de medida, como bloques patrón, calibres, etc., se sometan a un envejecimiento que garantice la estabilidad dimensional en el tiempo.

2.4 Incertidumbres debidas a las condiciones ambientales o correcciones

Son aquellas producidas por causas externas al proceso de medida.

2.4.1 Por variación de temperatura

La temperatura ambiente en que se encuentran los instrumentos de medida y las piezas, reviste una importancia esencial en el terreno de la metrología dimensional. Esto se debe al conocido fenómeno de la dilatación de los cuerpos con la temperatura; la mayoría de estos y en especial los metálicos experimentan una dilatación reversible al aumentar la temperatura. El aumento de longitud de un cuerpo es aproximadamente proporcional a su longitud L y a la variación de temperatura ΔT , a través del coeficiente de dilatación lineal α :

$$L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

Según normas metrológicas comúnmente aceptadas, las cifras dimensionales se refieren siempre a una temperatura de referencia de 20°C (68°F), salvo indicación expresa de lo contrario.

Este factor de incertidumbre es importante, y conviene tenerlo en cuenta sobre todo cuando se trata de medir piezas de aluminio, por su mayor coeficiente de dilatación. También es importante no medir una pieza inmediatamente al salir de la máquina, pues puede dar un mayor grado de incertidumbre, debido a su más alta temperatura, originada en el mecanizado.

2.4.2 Por otros agentes exteriores

Influyen mínimamente, aunque deben controlarse para prevenir daños por corrosión. Los principales son la humedad, presión atmosférica, polvo y suciedad en general. También afecta el índice de refracción del aire, de importancia en interferometría.

Las vibraciones pueden alterar una medida y en general son más peligrosas las de mayor amplitud y frecuencia. La iluminación actúa sobre el operador, y las posibles corrientes de aire producen transporte de calor y movimientos indeseables. La mayoría de los agentes externos no pueden someterse a estudio y por tanto se acude a su reducción.

3. Otras causas error

Como la incertidumbre de medida tiene un carácter aleatorio, tal y como se ha indicado, no se podrán considerar componentes de la incertidumbre de medida los siguientes conceptos:

- Desviaciones sistemáticas o derivas del instrumento de medida.
- Errores gruesos o faltas del operador del instrumento.

3.1 Desviaciones sistemáticas al nominal o derivas del instrumento

En muchas ocasiones, al realizar sucesivas mediciones, se puede observar una discrepancia sistemática entre la lectura del valor medido en el instrumento y el valor admitido convencionalmente como válido determinado a través de la comparación con un patrón. La causa de la misma no se debe al azar sino a una causa determinada, conocida o no, que suele estar originada por el instrumento, o incluso por una tendencia del operador, no admitiendo por ello el tratamiento estadístico propio de las causas de incertidumbre.

Como ejemplo se puede considerar un desplazamiento de la escala del instrumento, errores de paso de husillo, errores de tarado, defectos locales en la escala del instrumento, etc.

La deriva en los valores de lectura de un instrumento puede ser debida al envejecimiento de las partes que lo constituyen, alteraciones metalúrgicas, etc., y su evolución ha de ser tenida en cuenta a lo largo de la historia de utilización del equipo.

La detección y eliminación en lo posible de estas desviaciones se consigue mediante la calibración del instrumento, realizando la medida de un patrón, es decir, una pieza o instrumento cuyo valor se conoce previamente con mayor precisión. De esta forma, si al medir un patrón de valor conocido, la lectura indicase un valor distinto, la diferencia entre ambos indicará la desviación sistemática, que podrá corregirse bien por un dispositivo adecuado del instrumento que, por ejemplo, permita variar la posición de tarado o puesta a cero, bien en forma de corrección a introducir por tablas o gráficas.

| | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Valor del patrón: | $x_0 \pm U_0$ |
| Valor de la medida del patrón: | $x_c \pm U_c$ |
| Desviación sistemática: | $D_s = \Delta_{X_s} = X_0 - X_c$ |

Sin embargo, este tratamiento de las desviaciones sistemáticas no siempre es práctico, y en muchas ocasiones es recomendable considerarlas como una componente adicional de la incertidumbre, a pesar de que conceptualmente no lo sean.

3.2 Errores gruesos o faltas del operador

Cuando se reitera una medida para aumentar su precisión y disminuir su incertidumbre, pueden cometerse errores gruesos o fallos que no se repiten. La falta o fallo se puede considerar como un error de tipo parasitario, de origen fuertemente subjetivo, que consiste en una equivocación importante en la

lectura, cálculo, posicionamiento, etc. Estos fallos, cuando se producen suelen ser afortunadamente de gran amplitud, por lo que se ponen inmediatamente de manifiesto.

Para entender su significado conviene destacar la diferencia existente entre incertidumbre y error grueso. Una fallo es aquel que se comete de forma ocasional es fácilmente evitable mediante una correcta realización de la medida.

Son ejemplos típicos de fallos la lectura de 257,426 mm en lugar de 251,426 mm en un lector óptico, la colocación de un palpador en una superficie diferente a la que realmente se desea medir, el cálculo del seno cuando se quería indicar el coseno, la división en un cálculo cuando se pretendía un producto, confundir un diámetro por un radio, equivocarse en la escala del instrumento, etc.

En ocasiones no es tan evidente distinguir entre un fallo y una contribución a la incertidumbre, por ejemplo un error de alineamiento es, en general, un fallo, pero en ocasiones la forma o disposición del instrumento y la pieza no permite asegurar que el error de alineamiento no tenga un cierto carácter aleatorio debido a la forma del mesurando y del instrumento.

Para poder distinguir cuando se ha cometido un error grueso en una medida y cuando esa falta de repetibilidad del instrumento es debida a la incertidumbre de la medida, se han desarrollado criterios de rechazo, que permitan filtrar las medidas consideradas como fallos. De todos ellos el más conocido y empleado en metrología es el Criterio de Chauvenet.

4. Conceptos estadísticos

Considérese que se desea determinar el valor de cierta magnitud, representada por X . El valor X no podrá conocerse exactamente debido a que, como se vio anteriormente, existe una gran cantidad de causas de incertidumbre que lo hacen inaccesible, por ello nos referiremos a él como el valor verdadero de la magnitud a medir. Para poder estimarlo se determinará un valor x , al que llamaremos valor estimado de la magnitud X , y que será el valor más probable, obtenido a través de sucesivas mediciones experimentales q_k de la magnitud a determinar. Estos q_k son los valores individuales medidos.

Si se realizan n mediciones, en condiciones de repetibilidad, se obtendrán respectivamente los valores individuales $q_1, q_2 \dots q_k \dots q_n$, que supondremos independientes.

Como valor estimado x del valor verdadero X , se empleará el estimador estadístico media aritmética, definida como:

$$\bar{q} = x = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

siendo el límite:

$$X = \lim_{x \rightarrow \infty} x = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

Para poder estudiar la dispersión con que se presentan los n valores de la serie de medidas, se va a emplear el estimador estadístico experimental varianza muestral, definido como:

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

El que aparezca en el denominador $n-1$ es debido a que de las n medidas, supuestas independientes, se ha utilizado ya una relación para la determinación de la media muestral x . Análogamente, el valor verdadero no determinable es la varianza, definido como:

$$\sigma_x^2 = \lim_{x \rightarrow \infty} s_q^2 = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (q_k - X_i)^2$$

La raíz cuadrada de la varianza muestral es un estimador de la desviación típica de los valores q_k ($k=1\dots n$), es decir:

$$s_q (q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - x_i)^2}$$

Para afianzar estos conceptos se mostrará a continuación el siguiente ejemplo. Con un micrómetro milesimal se mide un bloque patrón, de valor nominal 10 mm, un elevado número de veces ($n=5000$). Los valores de estas medidas varían entre 10,055 y 10,065 y se distribuyen en la forma indicada en la tabla [Tabla 2].

Tabla 2. Registros de medición

| q_k (mm) | n_k | $q_k \cdot n_k$ | $(q_k - x)^2 \cdot n_k \cdot [10^{-4}]$ |
|------------|-------|-----------------|---|
| 10,055 | 1 | 10,055 | 0,249 |
| 10,056 | 17 | 170,952 | 2,710 |
| 10,057 | 135 | 1357,659 | 12,092 |
| 10,058 | 503 | 5059,174 | 19,975 |
| 10,059 | 1110 | 11165,490 | 10,941 |
| 10,060 | 1470 | 14788,200 | 0,000 |
| 10,061 | 1120 | 11268,320 | 11,362 |
| 10,062 | 490 | 4930,380 | 19,741 |
| 10,063 | 125 | 1257,875 | 11,304 |
| 10,064 | 26 | 261,664 | 4,175 |
| 10,065 | 3 | 30,195 | 0,752 |
| Σ | 5000 | 50299,964 | 93,301 |

$$x = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k = \frac{50299,964}{5000} = 10,05999 \text{ mm}$$

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - x_i)^2 = \frac{93,301 \cdot 10^{-4}}{4999} = 1,866 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$$

$$s_q(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - x_i)^2} = 1,3662 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Media: 10,060

Desviación típica: 0,0014

En el límite, es decir cuando el número de medidas tiende a infinito, esta curva tiende a la ley de la distribución normal de Gauss [Figura 11], que tiene las siguientes propiedades:

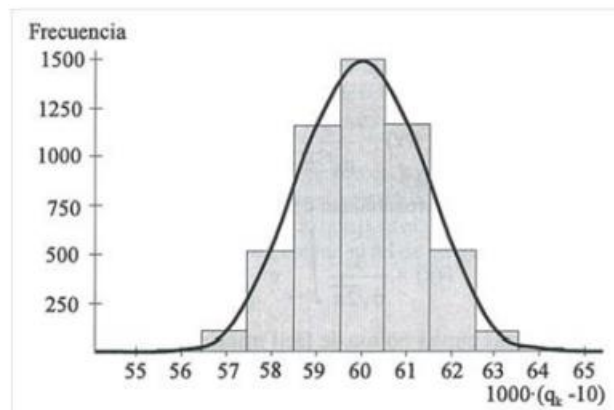


Figura 11. Distribución normal

- Es simétrica respecto a la media μ (X).
- La curva queda totalmente definida con el valor de la media μ y la desviación típica σ .

La función de probabilidad de la ley normal es de la forma (donde x sería equivalente a la variable medida q):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

y la función de distribución (probabilidad de encontrarse entre $-\infty$ y x):

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

Dado que estas curvas no son de fácil manejo para el cálculo, se emplean tablas en su forma normalizada de $N(0,1)$, mediante el cambio de variable:

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad dy = \frac{dx}{\sigma}$$

con lo que:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}}$$

$$F(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

El porcentaje de área de la curva correspondiente entre las abscisas $(\mu-k\sigma)$ y $(\mu+k\sigma)$, y por tanto, la posibilidad de obtener medidas en un intervalo en torno de la media son las siguientes:

| k | $\mu \pm k\sigma$ | $1 - \alpha$ (%) |
|------|----------------------|------------------|
| 0,67 | $\mu \pm 0,67\sigma$ | 50,0 |
| 1,00 | $\mu \pm 1,00\sigma$ | 68,3 |
| 1,50 | $\mu \pm 1,50\sigma$ | 86,6 |
| 1,96 | $\mu \pm 1,96\sigma$ | 95,0 |
| 2,00 | $\mu \pm 2,00\sigma$ | 95,4 |
| 2,50 | $\mu \pm 2,50\sigma$ | 98,8 |
| 2,58 | $\mu \pm 2,58\sigma$ | 99,0 |
| 3,00 | $\mu \pm 3,00\sigma$ | 99,7 |

Por todo lo anterior, se puede convenir que la media, o su estimador, constituye el valor más probable de la medida; y la desviación típica, o su estimador, está relacionado con la calidad de la medida, y por tanto con su incertidumbre.

Cuando se realice una medida m , con dicho instrumento, se podrá expresar como: $m \pm 2\sigma$, con lo que en dicho intervalo estará la media μ con una probabilidad del 95,4%. Por lo que, si se ha convenido que μ es el verdadero valor de la magnitud, 2σ es la incertidumbre de la medida con un nivel de confianza del 95,4%. Para el ejemplo, se tendrá:

$$10,060 \pm 2 \cdot 0,0014 \text{ mm}$$

10,060 ± 0,003 mm

Por otra parte, tal como se indicó, la pieza que se mide era un bloque patrón de valor nominal 10,000 mm, por lo que el micrómetro, al medir en las mismas condiciones y con una pieza de valor nominal entorno a 10 mm, tiene una falta de repetibilidad del orden de ±0,003 mm y una desviación sistemática de +0,060mm.

4.1 Teorema Central del Límite

Muchas de las observaciones físicas, y en particular los resultados de mediciones, se asemejan a la distribución de la ley Normal de Gauss, sin embargo, para algunas casos en que existan dudas, se pueden reducir a esta distribución mediante la aplicación del Teorema Central del Límite, cuyo enunciado expresa:

"Si una población tiene una varianza σ^2 y media μ , la distribución de la media muestral de n medidas independientes, tiende a una distribución normal de media μ y varianza σ^2/n , al aumentar el tamaño de la muestra."

Es decir, si se realizan p series de medidas independientes de la misma magnitud, con n medidas cada una, y se estima sus medias y varianzas, se obtiene una nueva población estadística de valores de medias estimadas \bar{x}_i [Tabla 3]:

Tabla 3. Series de medidas

| | Medidas | Media | Varianza |
|--------|--|-------------|--------------|
| Series | $q_{11}, q_{21}, \dots, q_{n1}$ | \bar{x}_1 | s_1^2 |
| | $q_{12}, q_{22}, \dots, q_{n2}$ | \bar{x}_2 | s_2^2 |
| | | | |
| | $q_{1p}, q_{2p}, \dots, q_{np}$ | \bar{x}_p | s_p^2 |
| | $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p$ | μ | σ^2/n |

De este teorema se desprenden las siguientes consecuencias:

- Todo proceso de medida debe tener una media y una varianza finitas.
- Si la media y la varianza muestrales difieren significativamente para distintas muestras de una misma población, el proceso de medida no está bien establecido.
- Si se toma una serie de n medidas y se da la media como resultado, la varianza de la media, y por tanto el cuadrado de la incertidumbre de medida, se reduce en un factor de 1/n.

Se definen, por ello, los dos siguientes estimadores estadísticos:

– \bar{x} media de los valores estimados x_i ($i=1 \dots p$):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^p x_i}{p} = \frac{\sum_{i=1}^p \frac{\sum_{k=1}^n q_{ki}}{n}}{p}$$

que es la media de las medias de los valores individuales medidos.

- s_x^2 varianza de las medias de los valores estimados:

$$s_x^2 = \frac{s_q^2}{n}$$

donde s_q^2 se definió como la varianza de los valores individuales medidos q_k ($k = 1 \dots n$), o varianza muestral. En el caso de que el número n de repeticiones de las medidas individuales sea inferior a 10, la expresión del cálculo de la varianza s_q^2 proporciona un valor subestimado de la contribución de incertidumbre. En este caso conviene estimar el valor de s_q^2 basándose en la experiencia (por ejemplo, los resultados de mediciones anteriores similares) o bien multiplicar dicho valor por un coeficiente mayorante denominado factor de Student, en función del número de mediciones realizadas, tal y como se muestra en la tabla siguiente [Tabla 4].

Tabla 4. Factor de Student

| Número medidas | Factor Multiplicador | Número medidas | Factor Multiplicador |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| 2 | 7,0 | 6 | 1,3 |
| 3 | 2,3 | 7 | 1,3 |
| 4 | 1,7 | 8 | 1,2 |
| 5 | 1,4 | 9 | 1,2 |

5. Criterios de rechazo

Se ha mencionado anteriormente la conveniencia de emplear algún tipo de filtro para poder rechazar aquellos errores gruesos o faltas, cuya inclusión en el conjunto de valores medidos falsearían el cálculo de la media y de la varianza o desviación típica. Se habrá de adoptar la decisión de aceptar o rechazar los valores que presumiblemente sean errores parasitarios, teniendo en cuenta que ésta podrá influir en el resultado final de la medición, ya que si se acepta que son debidos al azar, y se eliminan, puede mejorar erróneamente el resultado, mientras que en caso contrario, la aceptación de una falta empeorará el resultado.

Los criterios de rechazo pretenden introducir un cierto grado de objetividad en esta decisión de aceptar o rechazar una medida dudosa, mediante el análisis de los valores más alejados en el conjunto de mediciones reiteradas. Existen dos grupos de criterios de rechazo, en función de que tengan carácter determinista o carácter probabilístico.

Se desaconseja el empleo de criterios del primer grupo, debido a que no poseen fundamento científico, a pesar de que su sencillez ha hecho que se usen en determinadas aplicaciones. A este grupo pertenecen el criterio de rechazo del valor de máxima desviación respecto de la media, así como el de máxima desviación respecto de la mediana.

El primero se podría enunciar de la siguiente manera:

- Si $n \leq 20$ rechazar una medida q_k / $d_k = \max (d_i) = \max |x - q_i| \quad \forall i=1..20$
- Si $n > 20$ rechazar dos medidas q_k, q_p tal que $d_k = \max (d_i) = \max |x - q_i|$
 $\forall i = 1 \dots n$ y $d_p = \max (d_i) = \max |x - q_i| \quad \forall i=1..n, i \neq k$

Mientras que para el segundo bastaría sustituir, para los dos casos, la media x por la mediana x^* .

En cuanto al grupo de los probabilísticos, se podrían destacar, ordenados cronológicamente, los siguientes:

- Criterio de Chauvenet
- Criterio de Wright y Hayford
- Criterio de Chauvenet modificado
- Criterio de Huber

El criterio de Chauvenet fue propuesto por el astrónomo norteamericano W. Chauvenet en 1863, admitiendo una distribución normal para las medidas. Se establece un intervalo de confianza con un nivel de significación variable, en función del número de medidas realizadas, según la ley:

$$1 - \frac{1}{2n}$$

Es decir, deben rechazarse todas las medidas cuya probabilidad de aparición sea inferior a $1/2n$, donde n es el número de medidas realizadas. En la práctica, esto supone que, una vez calculadas la media x y la desviación típica s de una serie de medidas q_i ($i=1 \dots n$), han de rechazarse aquellas cuya desviación a la media sea:

$$|q_i - x| > k(n) \cdot s_q$$

$$\{x - k \cdot s_q; x + k \cdot s_q\}$$

donde $k(n)$ es un coeficiente que depende del número n de medidas realizadas, y cuyo valor se indica en la Tabla 5:

Tabla 5. Coeficiente de Chauvenet

| n_c | K(n) | n_c | K(n) | n_c | K(n) |
|-------|------|-------|------|-------|------|
| 2 | 1,15 | 11 | 2,00 | 20 | 2,24 |
| 3 | 1,38 | 12 | 2,04 | 25 | 2,33 |
| 4 | 1,54 | 13 | 2,07 | 30 | 2,40 |
| 5 | 1,65 | 14 | 2,10 | 40 | 2,48 |
| 6 | 1,73 | 15 | 2,13 | 50 | 2,57 |
| 7 | 1,80 | 16 | 2,15 | 100 | 2,81 |
| 8 | 1,86 | 17 | 2,18 | 300 | 3,14 |
| 9 | 1,92 | 18 | 2,20 | 500 | 3,29 |
| 10 | 1,96 | 19 | 2,22 | 1000 | 3,48 |

Una vez eliminadas las medidas que no cumplan el criterio de Chauvenet, con las restantes se calcula la media y el estimador de la desviación típica, y se vuelve a aplicar el criterio, repitiendo el proceso hasta que todas las medidas cumplan:

$$|q_i - x| = K(n) \cdot s_q$$

Considérese el siguiente ejemplo; se han realizado 50 medidas de una cota de una pieza, con el siguiente resultado [Tabla 6]:

Tabla 6. Tabla de resultados

| q_i (mm) | n_k | $q_i \cdot n_k$ | $(q_i - x)^2 \cdot n_k$ |
|------------|-------|-----------------|-------------------------|
| 8,70 | 2 | 17,4 | 0,157 |
| 8,80 | 4 | 35,2 | 0,130 |
| 8,90 | 14 | 124,6 | 0,090 |
| 9,00 | 18 | 162,0 | 0,007 |
| 9,10 | 7 | 63,7 | 0,101 |
| 9,20 | 4 | 36,8 | 0,194 |
| 9,40 | 1 | 9,4 | 0,176 |
| Σ | 50 | 449,1 | 0,855 |

Media: $x = 8,98$ mm

Desviación típica: $s_q = 0,13$ mm

$K(50) = 2,57$

$$|q_i - 8,982| > 2,57 \cdot 0,13 = 0,34 \text{ mm}$$

$$q_i = 8,98 \text{ mm} \pm 0,34 \text{ mm}$$

$$q_{i \text{ mín}} = 9,321 = 9,30 \text{ mm}$$

$$q_{i \text{ máx}} = 8,643 = 8,60 \text{ mm}$$

los segundos valores se obtienen al redondear a la división de escala.

De acuerdo con estos valores límites, se rechazará el valor $9,40 > q_{i \text{ máx}} = 9,30 \text{ mm}$, que aparecía una única vez. Ningún valor es inferior al límite inferior.

Repitiendo el proceso de cálculo de la media y la desviación típica con los 49 valores restantes, para aplicar nuevamente el criterio de rechazo, se tiene:

Media: $x = 8,97 \text{ mm}$

Desviación típica: $s_q = 0,12 \text{ mm}$

$K(49) = 2,56$ (interpolando)

$$|q_i - 8,97| > 2,56 \cdot 0,12 = 0,30 \text{ mm}$$

$$q_i = 8,97 \text{ mm} \pm 0,30 \text{ mm}$$

$$q_{i \text{ máx}} = 9,28 \text{ mm} = 9,30 \text{ mm}$$

$$q_{i \text{ mín}} = 8,67 \text{ mm} = 8,70 \text{ mm}$$

Comprobando que todos los valores se encuentran ahora dentro de este intervalo, por lo que los estadísticos calculados son ya estimadores aceptables del proceso.

Por otro lado, el criterio de Chauvenet modificado trata de limitar aún más la utilización de conjuntos de medidas poco representativos. Dicha modificación consiste en aplicar adicionalmente las siguientes consideraciones:

1. En cada etapa de aplicación del criterio de Chauvenet sólo se puede eliminar un único valor, aquél que se encuentre más alejado. De esta manera, si se considera la existencia de p valores, q_1, q_2, \dots, q_p , que incumplen el criterio:

$$|q_j - x| = K(n) \cdot s_q \quad j = 1 \dots p$$

Se eliminará únicamente el valor que verifique:

$$q_j = \text{máx}|q_j - x| \quad j = 1 \dots p$$

Conservándose el resto de los valores para realizar el cálculo de los nuevos estadísticos, con los que nuevamente se aplicará el criterio.

2. No se pueden eliminar más de dos valores en el proceso global, lo cual significa que el número máximo de veces que se puede aplicar el criterio de Chauvenet es de tres. Si en cada una de las dos primeras aplicaciones se han eliminado sendos términos, en la tercera aplicación todos los valores han de verificarlo, en caso contrario, se rechazará la totalidad de conjunto y será necesario volver a obtener un nuevo conjunto de mediciones.
3. Para poder repetir la aplicación del criterio, es preciso que el número de medidas que quedan no sea inferior a diez. Lo cual se reduce a la condición de que no puede haber menos de diez valores en la segunda aplicación del criterio, en caso contrario también sería necesario rechazar la totalidad de conjunto y volver a determinar un nuevo conjunto de mediciones.

En el diagrama de flujo se refleja el resumen de la aplicación del criterio de Chauvenet, teniendo en cuenta las tres consideraciones anteriores [Figura 12].

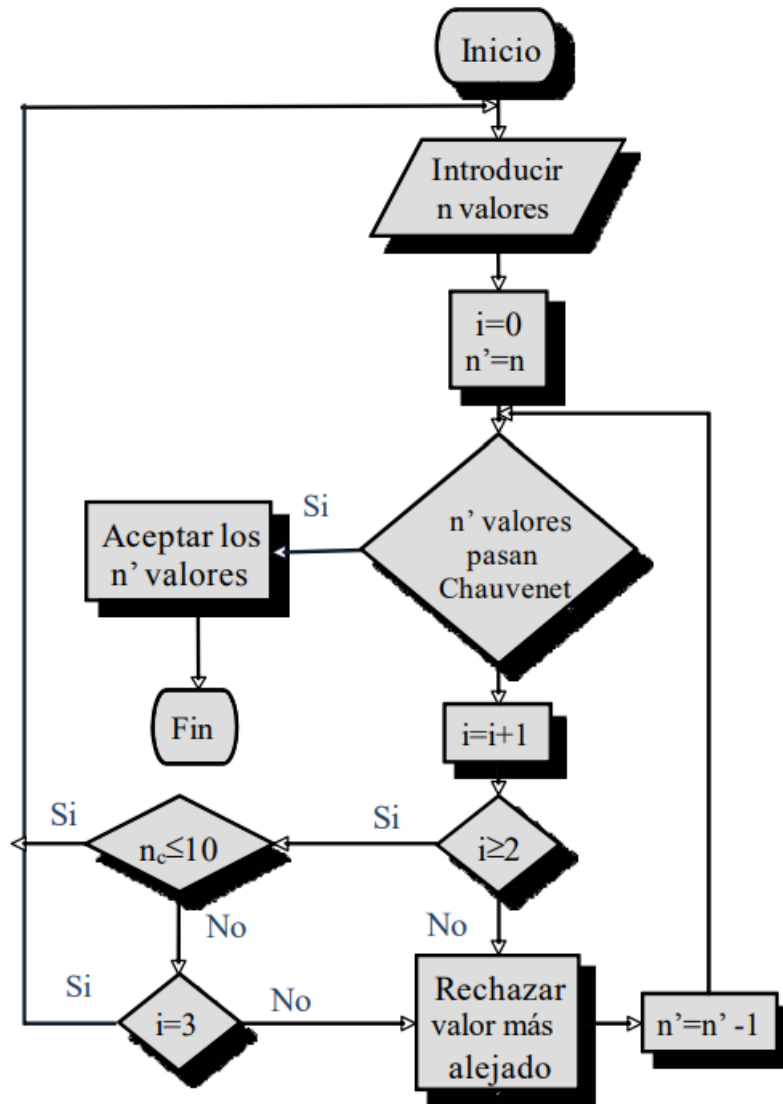


Figura 12. Aplicación del Criterio de Chauvenet

El siguiente criterio, también basado en la ley normal, fue propuesto por T.W. Wright en 1884, planteando un intervalo de amplitud predeterminada, igual a la media más 3,37 veces la desviación típica muestral, limitando por ello su empleo a tamaños de muestras elevados. Una modificación que permite eliminar este requisito es el mencionado criterio de Wrigth y Hayford, en el que rechazan los valores que se encuentran fuera del siguiente intervalo:

$$\{ x - k' s_q; x + k' s_q \}$$

donde:

$$k' = 2,361 \text{ para } n \leq 20$$

$$k' = 2,698 \text{ para } n > 20$$

Teniendo en cuenta que en Metrología es frecuente la consideración de pequeños tamaños de muestras, al criterio de Chauvenet anteriormente considerado se le puede realizar una modificación adicional,

empleando la distribución de la t de Student, en lugar de la normal. De esta forma, el criterio de Chauvenet modificado se puede enunciar como aquel que rechaza las medidas cuyos valores no se encuentran dentro del intervalo caracterizado por una t de Student de $n-1$ grados de libertad y definido para un nivel de confianza de $1-1/2n$:

$$\{ x - t s_q ; x + t s_q \}$$

Por último, se incluye una breve referencia al criterio de Huber-Hogg-Barnett, como uno de los que plantean el empleo de estimadores robustos, ya que se ven menos afectados por los errores parásitos que la media y desviación típica muestral. En este criterio se emplea como estimador de la evolución central a la mediana x^* , y como estimador de la dispersión a la mediana corregida de desviaciones de la mediana d^* [SEBASTIÁN, M.A., 1984]:

$$d^* = \frac{\text{med } |x - x^*|}{0,6745}$$

El criterio rechaza aquellas medidas cuyos valores no se encuentren comprendidos en el siguiente intervalo de aceptación:

$$\{ x^* - k^* s_q^* ; x^* + k^* s_q^* \}$$

donde:

$$k^* = 2,361 \text{ para } n \leq 20$$

$$k^* = 2,698 \text{ para } n > 20$$

6. Tolerancia e incertidumbre de medida

Cuando se diseña un producto que entraña cierta responsabilidad es preciso prescribir unos límites a la variación de los valores de sus cotas funcionales, apareciendo el concepto de intervalo de tolerancia como el conjunto de valores, limitado superior e inferiormente, dentro del cual debe encontrarse una magnitud para que se acepte como válida.

Puesto que la mayor parte de las aplicaciones metrológicas consisten en comprobar si un determinado valor de una magnitud se encuentra en el interior o fuera de un cierto intervalo de confianza, será preciso medir, siendo errónea la decisión adoptada si la medida resultante no se obtiene con el nivel de precisión necesario (incertidumbre). Por tanto, para poder aceptar que el valor del mensurando sea admisible, es preciso que el intervalo de incertidumbre esté contenido en el interior del intervalo de tolerancia.

Para evitar situaciones de solapamiento parcial entre estos intervalos, y por ello situaciones dudosas, se suele emplear un criterio de seguridad consistente en definir como intervalo de decisión el correspondiente a la tolerancia efectiva, obtenida como diferencia entre la tolerancia y la incertidumbre [Figura 13]. Si denominamos T al intervalo de tolerancia y $2u$ al intervalo de incertidumbre, para considerarlo admisible se limita el cociente de ambos entre los siguientes valores:

$$3 \leq \frac{T}{2U} \leq 10$$

Radizando la elección de estos valores en la búsqueda de un compromiso entre el coste de medición y el de rechazo.

Esto plantea una relación tolerancia/incertidumbre obtenida determinísticamente, por lo que otros autores, conscientes de que dicha elección debe justificarse de forma estadística, han desarrollado metodologías alternativas que permiten obtener el valor máximo de la incertidumbre de un método de medida, acorde con el mantenimiento de la eficacia del Control de Calidad del proceso de fabricación, lo cual permitiría conocer las posibilidades de cada instrumento en el entorno del Control de Calidad.

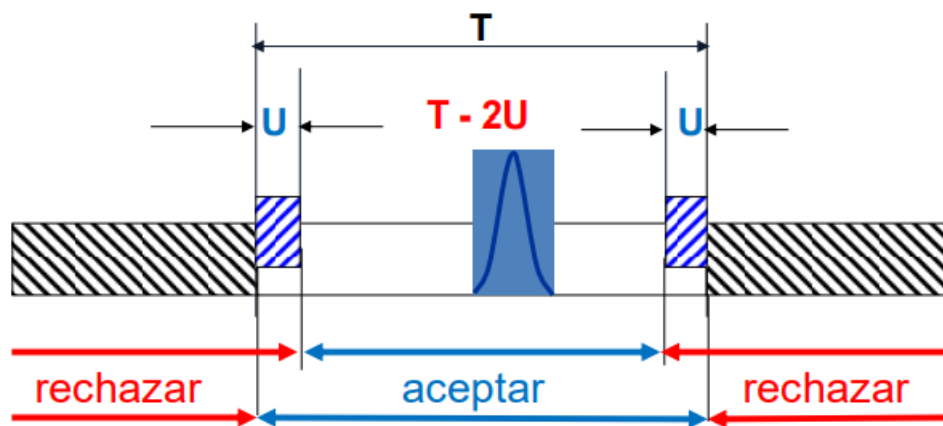


Figura 13. Tolerancia efectiva

Tema 10: Cálculo de incertidumbre

1.Introducción

Como ya se ha visto anteriormente, cuando se realiza una medición, las indicaciones del instrumento obtenidas de las sucesivas mediciones del mensurando, están sujetas a una variabilidad inevitable, debido a la naturaleza aleatoria proveniente de la magnitud medida, incluso, cuando dichas mediciones se llevan a cabo en las mismas condiciones de referencia (condiciones de repetibilidad: mismo operador, mismo procedimiento, mismo equipo, mismas condiciones ambientales y a intervalos de tiempo cortos).

1.1 Corrección de calibración

Si no se pueden mantener las condiciones de referencia cuando se realizan mediciones, será necesario aplicar correcciones a los valores indicados (valores brutos); así, el resultado de la medición se

corresponderá con el que se habría obtenido con los valores de las magnitudes en dichas condiciones de referencia.

Sin embargo, cuando se habla de mantener condiciones de referencia, se están identificando los valores medios de las magnitudes significativas pero no la variabilidad definida por los intervalos establecidos para las mismas, ya que ello conllevaría la necesidad de introducir exactamente todas las correcciones necesarias, lo cual no sería factible, ni técnica ni económicamente.

Por ejemplo, en el caso de magnitudes de influencia, si la temperatura media de un mensurando es de 23 °C y el intervalo de variabilidad definido para ella es 23 °C ± 2 °C, aunque apliquemos una corrección a la medida, debido a que la magnitud de influencia está a 23 °C cuando el valor de referencia debiera estar a 20 °C, seguirá existiendo una dispersión de la temperatura que determinará una incertidumbre. Incluso, si la corrección a aplicar debida a una magnitud de influencia fuera nula, lo que ocurre normalmente, su incertidumbre no lo es, ya que existe una desviación típica asociada a la variación de dicha magnitud de influencia. Esto último correspondería al caso de un mensurando que se ha mantenido en un intervalo 20 °C ± 2 °C; en esta situación, la corrección es nula ya que el valor medio de la temperatura se mantiene en los valores de referencia pero existe una incertidumbre debido a su variación.

Además de las correcciones debidas a las magnitudes de influencia, la exigencia de trazabilidad impone la utilización de instrumentos calibrados, lo cual determina la incorporación de la denominada corrección de calibración, $c_c(\Delta x_c)$, que en caso más sencillo, se obtiene de la siguiente expresión:

$$x_0 = x_c + \Delta x_c$$

donde x_0 es el valor estimado del patrón y x_c es la media de las indicaciones del instrumento de medida cuando se tiene como entrada el patrón. La expresión de la corrección de calibración resulta:

$$c_c(\Delta x_c) = x_0 - x_c$$

Es necesario observar que la corrección de calibración tiene una variación asociada a la imperfección del patrón (identificada a través de la incertidumbre del patrón en el certificado de calibración), así como a la dispersión de las indicaciones que interviene en la medición del patrón.

Por ello, queda patente que no es posible obtener valores exactos cuando se realiza una medida, ya que existen correcciones residuales que provienen de la inestabilidad de las magnitudes de influencia o de la inexactitud de patrones y equipos de medida. La corrección residual es desconocida pero es posible acotarla, lo que nos lleva a definir la incertidumbre como una cota superior de la corrección residual.

Asimismo, cuando se decide interrumpir la aplicación de sucesivas correcciones, el valor obtenido suele denominarse valor convencionalmente verdadero, esto es, el mejor valor que puede obtenerse con los medios disponibles.

2. Documentos sobre cálculo de Incertidumbre

Inicialmente, no existía un criterio mayoritariamente aplicable al cálculo de la incertidumbre, lo cual dificultaba la comparación entre los resultados obtenidos con métodos e instrumentos análogos cuando eran efectuados por diferentes observadores. Por ello, el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) creó un grupo de trabajo que analizó los resultados procedentes de una encuesta que con anterioridad había realizado la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIMP) y en la que habían participado Laboratorios Nacionales y Organismos cualificados de Metrología de diferentes países. Las conclusiones constituyeron la recomendación INC-1 (1980) sobre “Expresión de las Incertidumbres Experimentales”, que fue aprobada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) en 1981 y ratificada en 1986. Esta recomendación supuso la base sobre la que posteriormente ISO (Organismo Internacional de Normalización) desarrolló el documento en el que se plasmaban las directrices necesarias para la expresión de la incertidumbre, proporcionando la base para la comparación internacional de los resultados de medida. Dicho documento es la “Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida” (GUM) [Figura 1].

La primera recomendación del CIPM destacaba la naturaleza única de cualquier tipo de error, a pesar de que durante mucho tiempo fue frecuente utilizar dos tipologías de errores, el error sistemático y el error aleatorio. Un análisis de sus definiciones inclina a pensar que esta división no tiene demasiado sentido. En efecto, se suele definir el error sistemático como aquel que permanece constante al medir una magnitud en las mismas condiciones, y que varía cuando las condiciones cambian. Respecto a esta definición, hay que decir que establece una componente del error que no puede determinarse nunca, ya que no es posible medir en las mismas condiciones. Por otra parte, se ha visto que determinados errores, considerados como sistemáticos, han pasado a ser aleatorios al mejorar las técnicas de medición. Además, las condiciones de medición pueden variar de forma aleatoria, por lo que con tiempo suficiente se podría siempre considerar como aleatorias todas las fuentes de incertidumbre.

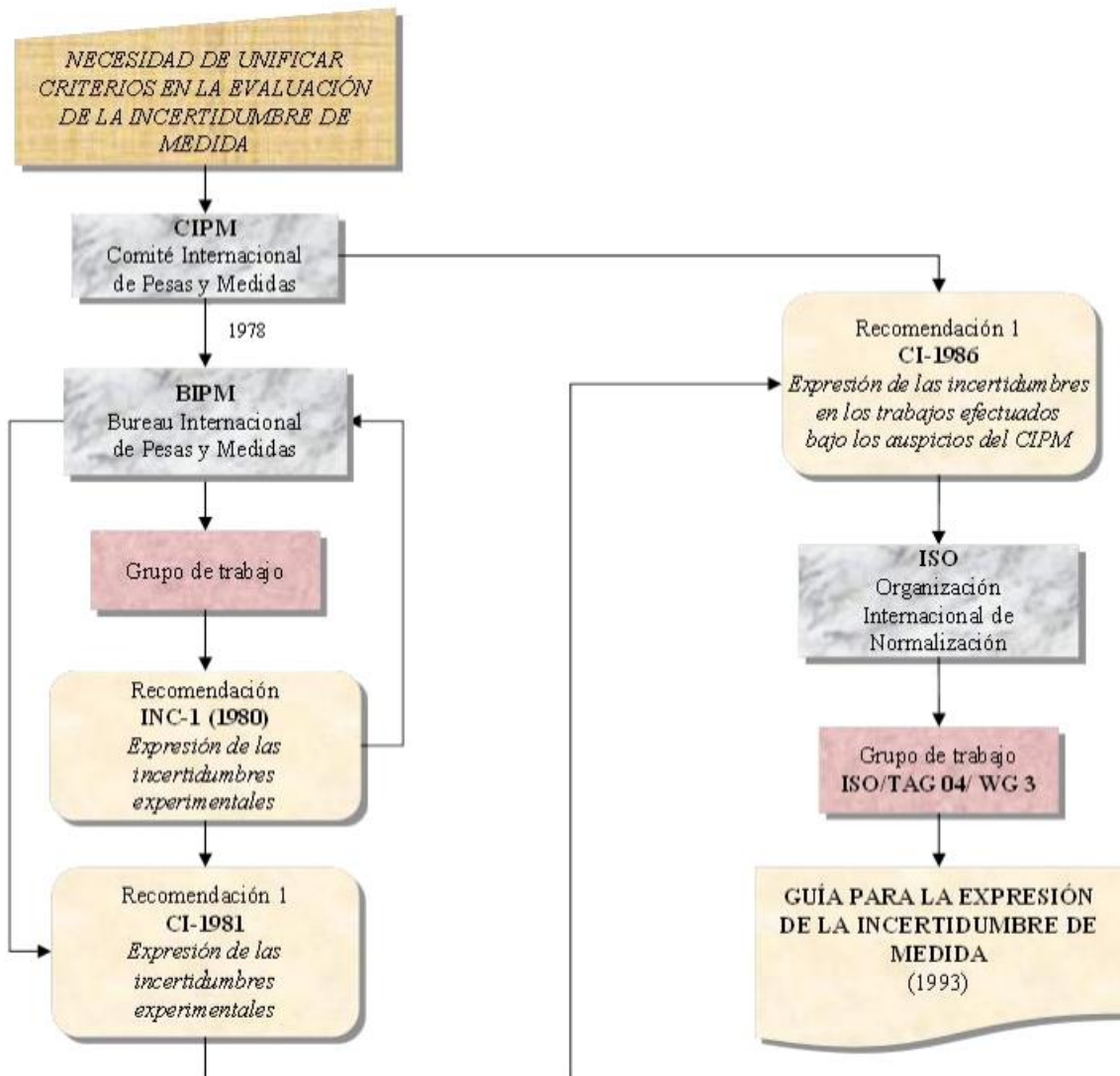


Figura 1. Evolución GUM

Los aspectos fundamentales recogidos en los respectivos textos se resumen en los siguientes principios:

- Dependiendo del método empleado para su determinación numérica, las componentes de la incertidumbre de medida pueden agruparse en dos categorías:
 Tipo A: las que se evalúan a través del análisis estadístico sobre serie de observaciones.
 Tipo B: las que se evalúan por otros métodos.
- Ambos tipos de componentes deben cuantificarse mediante varianzas o cantidades equivalentes, debiendo caracterizarse las situaciones de dependencia, en su caso, por las correspondientes covarianzas
- La incertidumbre así determinada puede multiplicarse por un factor superior a la unidad, al objeto de obtener una incertidumbre total mayor, pero a condición de indicar siempre el valor de dicho factor.

Es de destacar que, según esta clasificación, todas las componentes de incertidumbre se consideran de la misma naturaleza, aunque provengan de fuentes distintas (estimadas, conocidas previamente, calculadas por procedimientos estadísticos, etc.).

Previamente a la publicación de la GUM, en el entorno europeo y para el ámbito de la calibración, la Western European Calibration Cooperation (WECC), organismo de colaboración y reconocimiento mutuo entre los servicios de calibración de Europa Occidental¹ elaboró el documento WECC 19-1990, “Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration” [WECC, 1990], en el que ya se recogían algunas de las ideas que aparecerían en dicha Guía. Sin embargo, si bien en la GUM se establecían las normas generales para la evaluación y la expresión de la incertidumbre de medida que pueden aplicarse en la mayoría de los campos de las mediciones físicas, el documento WECC estaba centrado en el método más adecuado para las mediciones realizadas por laboratorios de calibración y para la expresión de la incertidumbre en los certificados de calibración. En España, estas recomendaciones fueron recogidas por la Red Española de Laboratorios de Ensayo (RELE) en el documento G-RELE-02 (1995) [RELE, 1995].

En 1994 se formó la European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL) mediante la unión de WECC y WELAC (Western European Laboratory Accreditation Cooperation), agrupando a 17 organismos nacionales de acreditación europeos². Se procedió a la revisión del documento WECC en 1997, elaborando el EAL-R2 [EA, 1997], que sustituyó a aquél con idéntico título. A través de dicho documento se pretendía armonizar la evaluación de la incertidumbre de medida en el seno de la EAL, proporcionando una incertidumbre unificada en los certificados de calibración emitidos por los laboratorios acreditados, además de servir de ayuda a los organismos de acreditación para asignar coherentemente las Capacidades de Medida y Calibración (CMC) de los laboratorios por ellos acreditados (entonces denominada Capacidad Óptima de Medida). El contenido de este documento respetaba las recomendaciones establecidas en la Guía ISO, aunque concentrando la metodología en los laboratorios de calibración, e incluyendo una serie de comentarios sobre la CMC (menor incertidumbre que un laboratorio puede conseguir dentro de su alcance de calibración).

Finalmente, tras la fusión en 1997 de la EAL y la EAC (European Accreditation of Certification), se generó la European Cooperation for Accreditation (EA), a través de la cual se han establecido los denominados Acuerdos Multilaterales de Reconocimiento (MLA - Multilateral Agreements), mediante los cuales los organismos de acreditación de diferentes países se reconocen entre sí por medio de auditorías cruzadas (Peer Reviews) y, por tanto, reconocen a las entidades acreditadas por cada uno de ellos en una estructura similar a la de las intercomparaciones de los laboratorios nacionales, para permitir la trazabilidad. Actualmente, el documento EA-4/02 M: 2013 “Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration” es el que recoge los requisitos para la evaluación de incertidumbre de calibración en el seno de EA.

En España, el documento equivalente, editado por ENAC, era el CEA-ENAC-LC/02 [1998]: “*Expresión de la Incertidumbre de medida en las Calibraciones*” [Figura 2], pero actualmente es directamente la referencia EA.

Básicamente, este documento resume los conceptos fundamentales de la guía ISO, introduce algunas simplificaciones y establece que los organismos acreditados deben emitir sus certificados de calibración con un intervalo de incertidumbre expandida que se corresponda con una probabilidad de cobertura o nivel de confianza del 95%, lo que supone, en la mayoría de los casos, un factor de cobertura $k=2$, al satisfacerse las condiciones que el teorema central del límite precisa para asegurar que la distribución resultante final sea prácticamente normal.

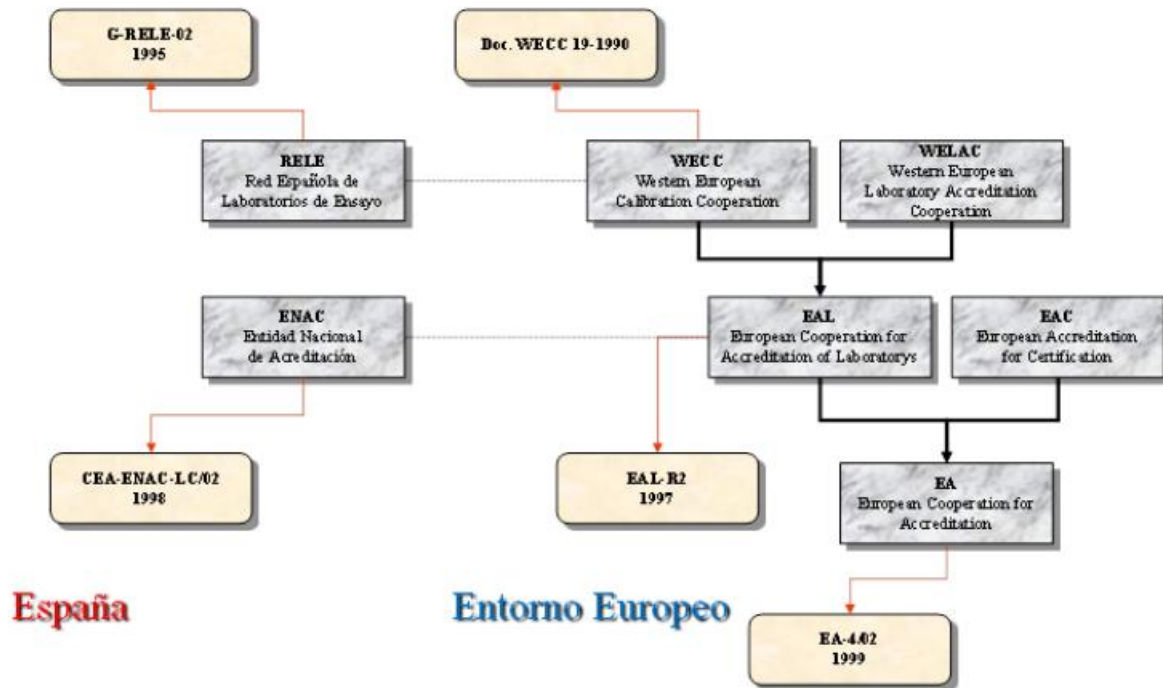


Figura 2. Evolución EA-04/02

Sin embargo la aplicación del concepto de incertidumbre no sólo se ha restringido dentro del ámbito metrológico (sea en medición, calibración o intercomparación de laboratorios), sino que ha trascendido a una estructura superior y globalizadora, caracterizada por los sistemas de gestión de la calidad.

Así, por ejemplo, en la norma ISO 9000:2015 [UNE-EN ISO 9000:2015] se recoge una identificación de términos relativos al aseguramiento de la calidad en procesos de medición, en los que viene identificado el concepto de confirmación metrológica (conjunto de operaciones necesarias para asegurar que un equipo de medición cumple con los requisitos establecidos para su uso previsto, incluyendo la calibración o verificación, los ajustes o reparaciones necesarios, la comparación con los requisitos metrológicos -rango, resolución, errores máximos permitidos- así como el sellado y etiquetado). En dicha norma se recoge una representación gráfica de la relación existente entre dichos conceptos, que se puede sintetizar básicamente en la siguiente figura [Figura 3].

Por su parte, en las normas ISO 9001:2015 [UNE-EN ISO 9001:2015] e ISO 9004:2018 [UNEEN ISO 9004:2018] se recogen distintas referencias sobre el control de los dispositivos de medición que aseguren la conformidad del producto con los requisitos establecidos. Finalmente, la norma ISO 10012:2003

[UNE EN-ISO 10012:2003] contempla de forma específica los sistemas de gestión de las mediciones, estableciendo los requisitos para los procesos y los equipos de medición.

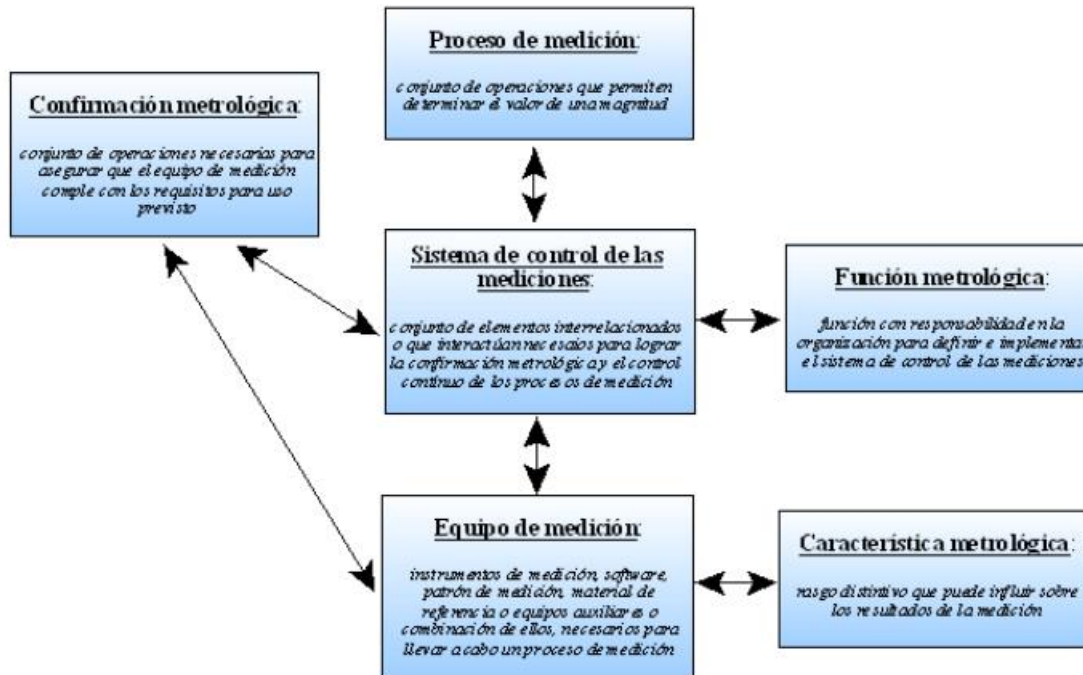


Figura 3. Conceptos relativos a la gestión de la calidad en los procesos de medición

La situación actual de la incertidumbre, por tanto, se puede resumir en la existencia de una serie de organismos a nivel nacional e internacional, que permiten asegurar tanto la trazabilidad de las medidas (a través de las intercomparaciones de los laboratorios de más alto nivel), como la acreditación de los laboratorios y, por tanto, la caracterización de la calibración de éstos mediante la realización de auditorías cruzadas. Esto ha permitido generar una estructura metrológica y de aseguramiento de la calidad concordante con la aplicación de los estándares internacionales, mediante la cada vez mayor interrelación de los diferentes organismos, así como la elaboración de una Guía, aceptada internacionalmente, que establece los criterios y pasos que permiten determinar la incertidumbre de una medida y el nivel de confianza del intervalo, definido a través de la incertidumbre expandida que, a diferencia de la concepción tradicional, se asocia al campo de valores dentro de los cuales se halla el verdadero valor del mensurando, estando centrado en el resultado de la medida y no en magnitudes desconocidas.

En los apartados siguientes se mostrará el proceso propuesto por la GUM.

3. Ley de propagación de varianza

En metrología, uno de los criterios de clasificación de los métodos de medida es el que los divide en métodos de medidas directas o indirectas. En el primer caso, el instrumento es aplicado sobre el mensurando y se obtiene el valor de la magnitud directamente en el dispositivo indicador. Dicho valor es un valor representativo del mensurando, independientemente de la necesidad de aplicar correcciones.

En el método de medida indirecta, la magnitud que se desea medir (magnitud de salida) procede de una relación funcional entre otras magnitudes (magnitudes de entrada), medidas o materializadas.

En realidad, cualquier medida puede considerarse indirecta si se expresan explícitamente las correcciones aplicadas, pues siempre ha de existir al menos la corrección de calibración (apdo. 1.1).

$$x' = x + c_c$$

Considérese la variable Y, definida como el valor verdadero de la magnitud de salida, que es función de un conjunto de N magnitudes de entrada X_i ($i = 1 \dots N$).

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

Las magnitudes de entrada incluyen, tanto las procedentes de los certificados de calibración de los patrones empleados, como las propias del proceso de medición y las magnitudes de influencia.

Como no se conocen los valores verdaderos de las magnitudes X_i , para los cálculos se emplean los valores estimados x_i , como datos de entrada para la evaluación de la incertidumbre total del resultado de la medida, apareciendo así el estimador de la medida como:

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

3.1.1 Magnitudes de entrada independientes

Cuando las variables de entrada x_i son independientes, la varianza del resultado y se estima mediante la Ley de Propagación de Varianzas, cuya expresión es:

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

Las derivadas parciales $\frac{\delta f}{\delta x_i}$ se denominan *coeficientes de sensibilidad*, c_i , e identifican en qué grado se ve afectada la variable de salida y en función de las variaciones de las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N .

Designando los productos de dicho coeficiente por la desviación típica correspondiente por:

$$u(y) = c_i \cdot u(x_i)$$

La ley de propagación de varianzas se expresa según la forma utilizada en el documento EA, es decir:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

3.1.2 Magnitudes de entrada correlacionadas

Para el caso en que se conozca que las magnitudes de entrada estén correlacionadas entre sí -no sean independientes-, se habrá de considerar el estadístico covarianza, que será estimada a partir de los estimadores de sus incertidumbres típicas y de su coeficiente de correlación, r . En efecto, si se sabe que dos magnitudes de entrada X_i , X_j se encuentran correlacionadas entre sí (dependen la una de la otra, en cierto grado), la covarianza estimada es:

$$u(x_i, x_j) = u(x_i)u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (i \neq j)$$

El valor absoluto del coeficiente de correlación es siempre menor o igual que 1, resultando cero entre variables independientes; pero puede ser positivo o negativo por lo que la contribución de los términos de covarianza en la ley de propagación de varianzas interviene con signo, sumando o restando, a diferencia de los términos de las varianzas que son siempre positivos. La determinación del grado de correlación de las magnitudes de influencia se basa en la experiencia.

Por tanto, considerando de nuevo la función $y = f(x_1, x_2 \dots x_N)$, cuando existe correlación entre las variables de entrada, la varianza de salida se estima mediante la ley de propagación de varianzas y covarianzas, quedando expresada por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right]^2 u^2(x_i) + \sum_{i,j=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right] \left[\frac{\delta f}{\delta x_j} \right] u_{x_{ij}}$$

O, considerando los coeficientes de sensibilidad c_i :

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

4. Proceso de evaluación de la incertidumbre de medida

La siguiente figura identifica el diagrama correspondiente al conjunto de etapas que deben completarse en el desarrollo del proceso de cálculo de la incertidumbre de medida [Figura 4].

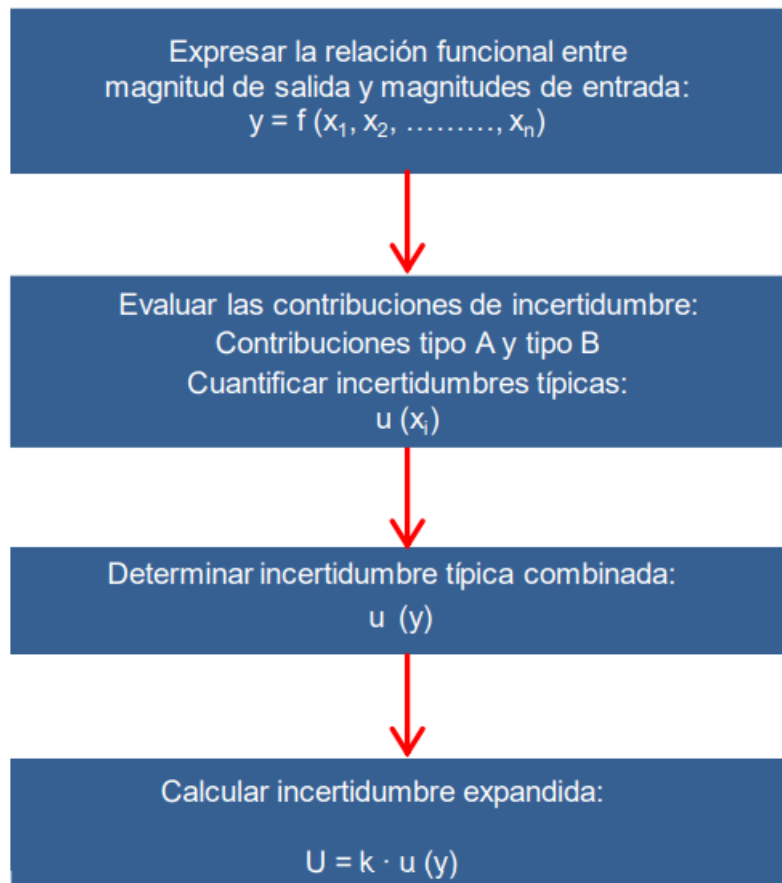


Figura 4. Proceso de evaluación de U

4.1 Modelización de la medición

La primera etapa del proceso de cálculo de incertidumbre es describir el proceso de medición a través de un modelo matemático que relacione el mensurando con las distintas magnitudes que intervienen en dicho proceso.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (1)$$

Esta función modelo f representa el procedimiento de medición y el método de evaluación, describiendo cómo se obtienen los valores de Y a partir de los valores de las magnitudes X_i . Dicha función puede ser una sencilla única expresión analítica o referirse a una función compleja, o incluso, determinarse experimentalmente.

La función f debe interpretarse como aquella que contiene todas las magnitudes susceptibles de contribuir significativamente a la incertidumbre del resultado de medida, incluyendo todas las correcciones. Por tanto, esta función debe modelar la medición de forma que se asegure la exactitud exigida por el resultado de medida, de lo contrario, será necesario introducir magnitudes de entrada adicionales.

Una estimación del mensurando Y , estimación de salida expresada por y , se obtiene de la ecuación (1), utilizando las estimaciones de entrada x_i

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$$

Cada x_i puede representar magnitudes medidas, correcciones de errores sistemáticos, etc.; a su vez, cada valor de x_i tiene asociada una incertidumbre típica $u(x_i)$ que contribuirá a la incertidumbre de la medida U .

4.2 Evaluación de las contribuciones de incertidumbre

En esta etapa es necesario cuantificar la incertidumbre típica, es decir, la incertidumbre correspondiente a una desviación típica ($k=1$) para cada uno de las componentes identificadas en la modelización del proceso de medida.

Como ya se ha indicado anteriormente, la Recomendación INC-1 las magnitudes X_i pueden clasificarse de acuerdo a cómo se haya obtenido su valor e incertidumbre (Tipo A o B, según la Recomendación INC-1):

- Magnitudes cuyo valor e incertidumbre son obtenidos directamente en la medición
- Magnitudes cuyo valor e incertidumbre proceden de fuentes externas (patrones, datos de referencia, ...)

Dicha clasificación no supone en ningún caso una diferencia de la naturaleza de dichas componentes; ambas están basadas en distribuciones de probabilidad y son cuantificadas mediante varianzas o desviaciones típicas, independientemente del tipo de evaluación aplicado.

Sin embargo, esta clasificación de las fuentes de incertidumbre en dos tipos es arbitraria, ya que una misma componente de la incertidumbre puede, en ocasiones, evaluarse mediante métodos estadísticos (y por tanto considerarse de tipo A) y, en otras ocasiones, estimarse o evaluarse por otros métodos (con lo que se considerará de tipo B), aunque en todos los casos se admite su origen aleatorio. Para demostrar que esto no representa ninguna dificultad se presenta el siguiente ejemplo.

Se considera un determinado patrón que se lleva a calibrar a un laboratorio de referencia, el cual emite un certificado de calibración indicando la incertidumbre de dicho patrón. Esta incertidumbre, que ha sido calculada en el laboratorio de referencia por métodos estadísticos, es del tipo A. Sin embargo, cuando dicho patrón es utilizado por otro laboratorio para calibrar sus instrumentos, la incertidumbre del patrón no se calculará, al ser un dato extraído del certificado de calibración, y por ello se considerará del tipo B.

4.2.1 Evaluación tipo A

La evaluación tipo A de la incertidumbre típica (incertidumbre asociada a la magnitud considerada, u) se emplea cuando se han realizado una serie de observaciones independientes de la magnitud de entrada en condiciones de repetibilidad, es decir, bajo las mismas condiciones de medida, pudiéndose observar,

si se ha realizado con la suficiente resolución, una dispersión de los valores obtenidos. Si X_i es la variable de entrada, medida de forma repetida, se puede determinar el valor estimado x_i como la media aritmética de todos los valores observados q_k ($k=1 \dots n$):

$$\bar{q} = x_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

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

$$S^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - x_i)^2$$

Siendo $S^2(q_k)$ conocida como varianza estimada estadísticamente. Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada, $S(q_k)$, denominada desviación típica experimental, caracterizan la variabilidad de los valores observados q_k , o más específicamente, su dispersión alrededor de su media \bar{q} .

Siendo la desviación típica experimental:

$$S_q(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - x_i)^2}$$

Asimismo, aplicando el Teorema Central del Límite³, la mejor estimación de la varianza de la media aritmética es la varianza experimental de la media aritmética, que viene dada por:

$$S^2(x_i) = \frac{S^2(q_k)}{n}$$

$$s(x_i) = \frac{S(q_k)}{\sqrt{n}}$$

Por tanto, la incertidumbre típica asociada a la variable de entrada es la desviación típica experimental:

$$u(x_i) = S(x_i)$$

4.2.2 Evaluación tipo B

La evaluación tipo B de la incertidumbre típica $u(x_i)$, o la varianza estimada $u^2(x_i)$, asociada al estimado x de la magnitud de entrada X_i , se realiza a partir de la información previa relativa a su variabilidad, que puede incluir:

- Resultados de medidas anteriores
- Experiencia o conocimiento general del comportamiento y propiedades de los materiales y los instrumentos utilizados
- Especificaciones del fabricante
- Datos suministrados por certificados de calibración u otros certificados
- Incertidumbre asignada a valores de referencias procedentes de libros o manuales
- Variaciones conocidas de las magnitudes de influencia

La evaluación tipo B está basada en la experiencia y en los conocimientos generales y puede ser tan fiable como una evaluación de tipo A, sobre todo cuando ésta procede de un número reducido de observaciones.

Suelen ser consideradas como tipo B las incertidumbres provenientes de:

- El patrón
- Las magnitudes de influencia
- Los procedimientos de medida y conocidas de antemano
- La utilización de relaciones empíricas con incertidumbre conocida

La incertidumbre tipo B que más se emplea es la incertidumbre del patrón. Normalmente los laboratorios de metrología se diseñan para que las magnitudes de influencia no interfieran de forma significativa en las medidas usuales que se realizan. Por ello las incertidumbres tipo B, de difícil cálculo, sólo es necesario considerarlas en medidas de una precisión cercana o superior a los límites de diseño del laboratorio. Según recoge la GUM, en la evaluación se pueden distinguir los siguientes casos:

A. *Cuando de una magnitud de entrada sólo se conoce un único valor (por ejemplo una única medida, el resultado de una medición previa, un valor procedente de bibliografía o el valor de una corrección), se tomará dicho valor como el estimado x_i , mientras que para las incertidumbres típicas, $u(x_i)$, se aceptarán los valores que se proporcionen o calculen a partir de datos fiables de incertidumbre, en caso contrario se estimarán a través de la experiencia.*

Patrón calibrado

La incertidumbre de calibración vendrá recogida en su certificado de calibración. En él se indican las incertidumbres expandidas por lo que será necesario dividir dicho valor por el factor de cobertura asociado k del certificado. De esta forma:

$$u(x_i) = \frac{U_0}{k}$$

B. *Cuando para la magnitud de entrada puede aceptarse una cierta distribución estadística, se tomará el valor esperado como estimador x_i y la raíz cuadrada de la varianza de su distribución como su incertidumbre típica asociada $u(x_i)$.*

Efecto conocido de una magnitud de influencia sobre las indicaciones del equipo

Cuando a través de las instrucciones del fabricante o por la experiencia se conoce la función de distribución de la variación de las indicaciones con respecto a alguna magnitud de influencia, se utiliza la misma desviación típica de la distribución como contribución a la incertidumbre.

$$u(x_i) = \sigma(x_i)$$

Falta de repetibilidad en la medida durante el proceso de medición

Si consideramos que el método de medición exige que se realicen m medidas del mensurando, la incertidumbre típica de la contribución a la incertidumbre, análoga a la ya vista para la repetibilidad en calibración, se expresa como:

$$u(x_i) = \frac{S(q_k)_{med}}{\sqrt{m}}$$

Sin embargo, cuando se está llevando a cabo una medición, las reiteraciones de medida del mensurando son escasas (normalmente se mide una única vez pero en ocasiones se toman tres lecturas). Por tanto, al objeto de no tener que calcular para cada proceso de medición el valor de esta componente, y dado que la muestra de calibración es suficientemente significativa, se asume que la desviación estándar de las lecturas del proceso de medida es igual a la de calibración:

$$S^2(q_k)_{med} = S^2(q_k)_{cal}$$

Finalmente, la incertidumbre típica asociada a esta componente será definida por:

$$u(x_i) = \frac{S(q_k)_{cal}}{\sqrt{m}}$$

- C. *Cuando de la magnitud de entrada sólo pueden estimarse los límites superior e inferior $a_i + y$ $a_i -$ (límites de error de un instrumento de medida, campo de variación de la temperatura, etc.), se acepta una distribución rectangular para la posible variabilidad de la magnitud de entrada.*

En este caso, frecuente en la práctica metrológica, la magnitud de entrada presenta una variabilidad dentro de un rango de valores acotados para el que no se presupone ninguna situación más probable dentro de dicho rango, es decir, todos los valores son equiprobables, lo cual se corresponde a la ya mencionada distribución rectangular [Figura 5].

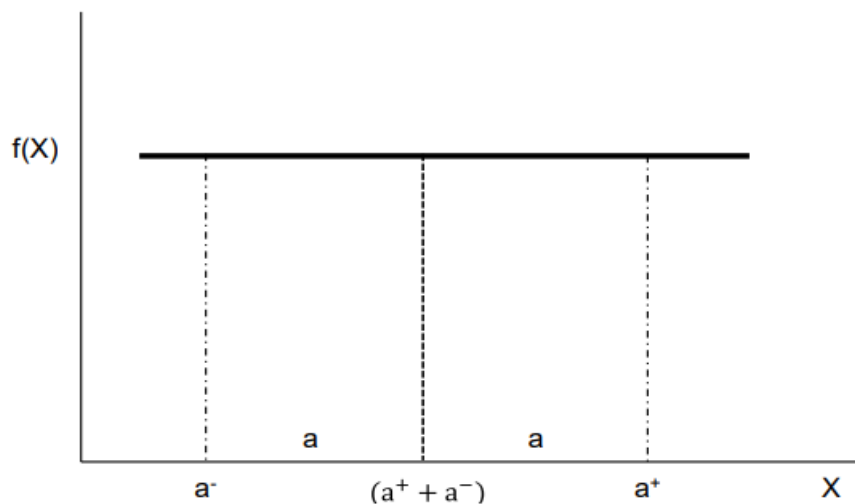


Figura 5. Distribución rectangular o uniforme

En este caso, el punto medio se puede tomar como valor más probable de x_i :

$$x_i = \frac{(a^+ + a^-)}{2}$$

y como estimador de la varianza:

$$u^2 = \frac{(a^+ - a^-)^2}{12}$$

o, llamando a la diferencia entre los dos límites:

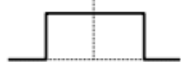

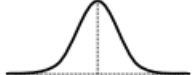
$$a = \frac{(a^+ - a^-)}{2}$$

resulta:

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

En el caso de que se supongan otras distribuciones, se emplearán respectivamente los valores que recogidos la Tabla 1:

Tabla 1. Varianzas según distribuciones

| Distribución | Denominador | $u^2(x_i)$ | Gráfica |
|--------------|-------------|----------------------------|---|
| Rectangular | 3 | $u^2(x_i) = \frac{a^2}{3}$ |  |
| Triangular | 6 | $u^2(x_i) = \frac{a^2}{6}$ |  |
| Normal | 9 | $u^2(x_i) = \frac{a^2}{9}$ |  |

Resolución o división de escala del equipo de medición

La resolución o división de escala del equipo, ya sea analógico o digital, siempre es fuente de incertidumbre. Si E es la división de escala del equipo, el valor de la magnitud se situará en el intervalo $[-E/2, +E/2]$, con una probabilidad constante en todo el intervalo. Por ello:

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

Efecto de la temperatura

Las indicaciones del equipo pueden fluctuar debido a las variaciones de la temperatura durante la medida. Estas variaciones suelen estar especificadas por el fabricante o conocidas en base a la experiencia. Así, si ΔT es la diferencia de temperatura durante el proceso de medición, la aportación de esta componente de incertidumbre vendrá dada por la expresión:

$$u(x_i) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha \cdot L \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$$

donde:

α = coeficiente de dilatación lineal

L = longitud de referencia

ΔT = variación de temperatura

Deriva de patrones

Es frecuente considerar la deriva de los patrones cuando se conoce el historial de sus calibraciones o se disponen de documentos que especifiquen la forma de cuantificar dicha deriva. La desviación típica de esta contribución viene expresada por:

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

Otras contribuciones

Las contribuciones expuestas anteriormente son las más habitualmente suelen encontrarse en los procedimientos de estimación de incertidumbre de medida y en la práctica metroológica.

Sin embargo, en ciertas ocasiones, es posible que alguna de ellas no sea suficientemente significativa y, por tanto, pueda desestimarse. Por tanto, es la función metroológica la que debe establecer en su proceso de medición, cuáles son las contribuciones significativas, incorporándolas a la incertidumbre en base a su experiencia.

Los procedimientos de calibración, fundamentalmente, los procedentes de organismos metroológicos de referencia, basados en la GUM y el documento EA-04/2, desarrollan la estimación de incertidumbre de forma específica para cada equipo, por tanto, constituyen un buen punto de partida para el establecimiento de las contribuciones.

4.2.3 Presentación del balance de incertidumbres

El análisis de la incertidumbre para una medición debe incluir una lista de todas las fuentes de incertidumbre, junto con las incertidumbres típicas de medida asociadas y los métodos para evaluarlas. Al objeto de facilitar la gestión de los datos de dicho análisis pueden presentarse de forma tabulada de acuerdo al siguiente modelo [Tabla 2]:

Tabla 2. Balance de incertidumbre

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

4.3 Determinación de la incertidumbre típica combinada

4.3.1 Magnitudes de entrada independientes

La incertidumbre típica del resultado de medida y (estimador del mensurando Y) se obtiene a partir de las incertidumbres típicas de las n variables de entrada estimadas, x_1, x_2, \dots, x_N mediante la ley de propagación de varianzas. Se denomina incertidumbre típica combinada, $u_c(y)$, y es la raíz cuadrada de la varianza combinada $u_c^2(y)$.

$$u^2 (y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right]^2 u^2 (x_i) \quad \text{Varianza combinada}$$

$$u (y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right]^2 u^2 (x_i)} \quad \text{Incertidumbre típica combinada}$$

Donde, f es la función modelo y cada $u (x_i)$ es una incertidumbre típica evaluada según sea tipo A o tipo B.

4.3.2 Magnitudes de entrada correlacionadas

Cuando existe correlación entre las variables de entrada, la expresión de la varianza combinada se generalizará a:

$$u^2 (y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right]^2 u^2 (x_i) + \sum_{i,j=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right] \left[\frac{\delta f}{\delta x_j} \right] u_{x_{ij}}$$

En relación a los términos de covarianzas, EA-4/02 indica que la covarianza correspondiente a los mensurandos X_i y X_j puede considerarse nula o despreciable si:

- Las medidas de ambos son independientes, al proceder de observaciones repetidas en mediciones independientes, diferentes y no simultáneas
- Alguna de las magnitudes de la pareja puede considerarse constante
- El análisis de ambas magnitudes no evidencia la existencia de correlación entre las mismas.

4.4 Determinación de la incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida se representa por U y se obtiene multiplicando la incertidumbre típica combinada $u (y)$ por un factor de cobertura k :

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

Por tanto, el resultado de una medida se puede expresar en la forma:

$$Y = y \pm U$$

Identificando Y como el mejor estimador del mensurando Y , y el intervalo $[y - U, y + U]$ como aquel que contiene una fracción importante de la distribución de valores que podrían razonablemente ser atribuidos a Y .

La determinación de la incertidumbre expandida necesita la obtención del factor de cobertura k , para el que el documento EA-4/02 recomienda el valor 2, siempre que pueda atribuirse al mensurando una distribución normal (criterio de normalidad) y que la incertidumbre típica evaluada sea suficientemente fiable (criterio de fiabilidad). En este caso, el nivel de confianza del intervalo de incertidumbre es del 95% aproximadamente [Tabla 3].

Tabla 3. Valores de k para una distribución normal

| Nivel de confianza (p) (porcentaje) | Factor de cobertura (k _p) |
|--|--|
| 68,27 | 1 |
| 90 | 1,645 |
| 95 | 1,960 |
| 95,45 | 2 |
| 99 | 2,576 |
| 99,73 | 3 |

Sin embargo, la hipótesis de distribución normal no es siempre fácil de confirmar experimentalmente, por ello, el documento EA distingue los casos en los que la función de distribución de la variable de salida, Y, puede asimilarse a una normal de aquellos en los que dicha hipótesis no es admisible. Asimismo, en el primer caso, diferencia la situación en la que la estimación de la incertidumbre típica es suficientemente fiable de la que no lo es.

I. Criterio de normalidad

Se acepta que la distribución resultante es normal cuando tres o más componentes de incertidumbre contribuyen con valores del mismo orden de magnitud y proceden de variables independientes con distribuciones normales, triangulares, uniformes o de aspecto similar (Teorema Central del Límite).

II. Criterio de fiabilidad

Siempre que las contribuciones tipo A consideradas en la determinación de $u_c(y)$ se hayan basado en, al menos, 10 observaciones la fiabilidad se considera suficiente.

En la mayoría de las aplicaciones metrologías, estas condiciones se satisfacen pero, en el caso de cumplirse los requisitos para suponer una distribución normal, pero no disponer de una incertidumbre típica suficientemente fiable (al menos 10 medidas en contribuciones tipo A o poder utilizar una tipo B en su lugar), es necesario incrementar convenientemente el factor de incertidumbre para conseguir una probabilidad de cobertura en torno al 95%. Por ello, debe estimarse el número de grados de libertad efectivos, v_{ef} , de la incertidumbre típica, obtenido a partir de los grados de libertad v_i de cada una de sus contribuciones. Para ello, la guía ISO y el documento EA recomiendan la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

En esta fórmula, las estimaciones tipo A de n medidas se incorporan con $v = n-1$ grados de libertad. La determinación del número de grados de libertad de las estimaciones tipo B se realizan admitiendo que dichas estimaciones se establecen de forma muy segura. Por ejemplo, en el caso de distribución uniforme, su amplitud se escoge de forma que la probabilidad de encontrar valores fuera del intervalo resulte prácticamente despreciable. En estas condiciones, el número de grados de libertad es muy elevado y, en la práctica se admite que $v_i \rightarrow \infty$, es decir, a efectos prácticos las contribuciones tipo B no intervienen en el cálculo de v_{ef} .

La siguiente tabla [Tabla 4] muestra el valor del factor de cobertura (k) en función del número efectivo de grados de libertad calculado. Dicha tabla está basada en una distribución de Student evaluada para una probabilidad de cobertura aproximada del 95%, redondeando el valor de v_{ef} al entero más próximo por defecto.

Tabla 4. Factor de cobertura según número de v_{ef}

| 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 |

Por último, cuando no sea justificable la hipótesis de normalidad, es necesario identificar una función de densidad que se adapte razonablemente a la variable de salida, y con ella debería obtenerse el valor de k para un intervalo de confianza aproximado del 95%. En esta situación, si una contribución domina sobre todas las demás, el valor de k debe calcularse a partir de dicha distribución. Si son dos contribuciones las predominantes, debería obtenerse previamente la distribución resultante de las dos mediante la convolución correspondiente, determinando k sobre dicha distribución.

4.4.1 Expresión de la incertidumbre

Según recomendaciones de la GUM, el valor numérico de la incertidumbre de medida debe expresarse, como máximo, con dos cifras significativas. Sin embargo, en determinadas ocasiones, esto puede suponer expresarlo por debajo de la propia división de escala del equipo, lo cual no se justifica desde el punto de vista práctico; por ello, es usual que dicho resultado sea expresado como múltiplo de la división de escala, a pesar de que la incertidumbre resultante haya sido inferior.

Asimismo, el resultado de la medición debe redondearse en su expresión final a la menor cifra significativa del valor de la incertidumbre expandida asignada al resultado de la medición.

Cuando se exprese la incertidumbre, es aconsejable tener en cuenta la recomendación que EA-4/02 específica sobre la regla de redondeo a emplear:

Si el redondeo reduce el valor numérico de la incertidumbre de medición en más de un 5%, debe utilizarse el valor redondeado hacia arriba

Ejemplo: Se obtiene una incertidumbre de medida $U=0,0215686$ mm, siendo la división de escala del equipo $E=0,01$ mm

$$\frac{0,0215686 - 0,02}{0,0115686} \times 100 = 7,27 \% \geq 5\% \Rightarrow U = 0,03 \text{ mm}$$

Es decir, el documento EA sólo permite redondear por defecto cuando el resultado está muy próximo al valor anterior de la escala.

Por último, en el resultado final, el valor de la corrección de la medición y el valor del mensurando deben expresarse con las mismas cifras significativas que la incertidumbre asignada al mismo.

¿Es posible expresa dicha incertidumbre como 0,02 o es necesario expresarla a 0,03?

5. Calibración de equipos

Como se ha descrito ampliamente, la mejor forma de asegurar la trazabilidad de un sistema de medida es mediante calibración, definida como la operación que permite determinar la corrección de calibración que es necesaria aplicar al equipo de medida cuando trabaja en condiciones análogas a las de calibración y su componente de incertidumbre. Sin embargo, si las condiciones de trabajo difieren, además será necesario incorporar las correcciones adicionales necesarias y sus correspondientes incertidumbres.

La finalidad de la calibración es poner de manifiesto las discrepancias existentes entre el instrumento o patrón que se calibra y el elemento de referencia, de características metrológicas suficientemente estables y conocidas. Se acuerda adoptar como resultado de la calibración de un instrumento de medida las correcciones obtenidas al medir patrones conocidos en diferentes puntos de su intervalo de medida; por tanto, el primer objeto de dicha calibración es la medición de las correcciones de calibración, estimando su valor resultante y la incertidumbre asociada a dicha corrección.

La correcta valoración de un instrumento supone el reconocimiento de que sus indicaciones (indicaciones brutas) pueden no corresponder al valor verdadero de la magnitud medida (mensurando); por ello, es necesario introducir correcciones a las indicaciones brutas para obtener los valores corregidos, lo que determina siempre la aparición de las correspondientes incertidumbres, ya que no es posible conocer los valores exactos de dichas correcciones. Es decir, cualquier corrección, aunque sea nula, introduce una componente de incertidumbre.

Asimismo, considerando que las calibraciones que sustentan las cadenas de trazabilidad no permiten recoger las innumerables situaciones que después de la calibración se presentan para un equipo o sistema de medida, y teniendo en cuenta que la diseminación de patrones primarios puede presentar diferencias según los países y servicios de calibración, en la asignación de incertidumbre se introduce un cierto grado de subjetividad y, por tanto, se hace necesario garantizar que las medidas de determinados grupos de usuarios sean equivalentes y de la calidad preestablecida. Estas razones justifican la realización de intercomparaciones, las cuales tienen como objetivo reforzar “horizontalmente” la trazabilidad diseminada “verticalmente”. Dichas comparaciones son obligatorias en el caso de laboratorios acreditados y, cada vez más, se realizan entre centros de medición y ensayos industriales.

En cuanto al proceso de calibración, es necesario que se desarrolle de acuerdo a las directrices establecidas en el documento del Plan de Calibración: “Procedimiento de Calibración”, garantizando así la homogeneidad y unificación en su realización.

Podemos distinguir diferentes modelos de calibración:

A. Calibración local en un punto

B. Calibración local en varios puntos

C. Calibración global de la escala

a. Corrección nula e incertidumbre constante para todo el rango

b. Corrección e incertidumbre constante para todo el rango

c. Corrección e incertidumbre para cada punto del rango

5.1 Calibración local o parcial en un punto

Este modelo sólo aplica al caso de que un instrumento vaya a ser utilizado en el entorno del punto concreto de la escala en el que se va a calibrar. Esta situación es poco frecuente en la práctica; lo usual es calibrar el intervalo de medida del instrumento, en cuyo caso, la calibración local en un solo punto sería un estimador muy pobre de la incertidumbre asociada al equipo completo. No obstante, el desarrollo de este modelo de calibración proporciona la metodología para los modelos siguientes.

5.1.1 Balance de incertidumbre

El primer paso en la evaluación de un equipo es identificar, de acuerdo a sus características metrologías, cuáles van a ser las componentes de incertidumbre a tener en cuenta, es decir, qué aportaciones son consideradas más significativas para cuantificar la inexactitud del equipo. Estas componentes pueden deberse, tanto a condiciones de calibración como a condiciones de uso o medición del equipo.

Una vez identificadas dichas aportaciones, se desarrolla el correspondiente Balance de Incertidumbre (tabla 2, apartado 4.2.3), en el que cada componente de incertidumbre queda identificada por su estimador, incertidumbre típica, función de distribución, coeficiente de sensibilidad y, finalmente, su varianza de aportación.

5.1.2 Incertidumbre de calibración

Obtener la incertidumbre de calibración implica extraer del balance de incertidumbre exclusivamente aquellas aportaciones que provienen de las condiciones de calibración.

El proceso a seguir es:

- Medir n_c veces el patrón de valor e incertidumbre conocidos
- Calcular los estimadores estadísticos x_c y S^2_{qc} .
- Determinar la corrección de calibración c_c (Δx_c)

La función modelo, considerando únicamente las componentes del patrón y el equipo, vendrá dada por las correcciones a aplicar en cada una de ellas:

$$c = c_c(\Delta x_c) + c_E = (x_0 - x_c) + c_E$$

donde, x_0 = valor estimado del patrón

x_E = valor estimado de los resultados que ofrece el equipo

c_E = corrección a aplicar debida a la desviación de la escala respecto a la referencia

Pero, como ya se ha explicado en apartados anteriores, si se trabaja condiciones de referencia, lo cual es habitual en la práctica metrológica, las correcciones adicionales a la de calibración, tienen valor nulo (no así sus incertidumbres asociadas), por tanto:

$$c = c_c(\Delta x_c) = (x_0 - x_c)$$

De esta forma, para la calibración local de un instrumento es necesario disponer de un patrón certificado en el entorno del punto deseado, de media x_0 e incertidumbre expandida U_0 (que se supone entre 3 y 10 veces inferior a la esperada para el instrumento). Dicha incertidumbre se corresponde con un factor de cobertura k , de forma que:

$$u_0 = \frac{U_0}{k}$$

siendo u_0 la incertidumbre típica a asociada a dicho patrón. Sobre el patrón, se reiterarán n_c medidas con el instrumento a calibrar ($n > 10$ para que la muestra sea suficientemente significativa), obteniéndose:

$$q_{c1}, q_{c2}, \dots, q_{cn}$$

- *Estimador de la media de calibración:*

$$\bar{q} = x_c = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} q_{ck}$$

En cuanto a la variabilidad de las medidas:

- *Estimador de la varianza de calibración:*

$$S^2(q_{ck}) = \frac{1}{n_c - 1} \sum_{k=1}^{n_c} (q_{ck} - x_c)^2$$

Aplicando el Teorema Central del Límite, al haber adoptado como valor más probable el estimador de la media, la varianza del valor medio de calibración será n_c veces inferior a la de las medidas individuales de calibración:

$$S^2(x_c) = \frac{S^2(q_{ck})}{n_c}$$

En cuanto a la varianza de aportación de la componente c_E :

$$u_E^2 = \frac{(E/2)^2}{3}$$

Finalmente, la varianza combinada correspondiente al conjunto de aportaciones consideradas (con variables de entrada supuestas independientes) se obtiene mediante la aplicación de la Ley de Propagación de Varianzas, según la expresión:

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

expresando la ecuación en función de los coeficientes de sensibilidad:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2$$

De acuerdo a ello:

$$u_c^2 = u_0^2 + u_E^2$$

$$u_c = \sqrt{u_0^2 + S^2(x_c) + u_E^2}$$

$$U_c = k \cdot u_c$$

La calibración estricta finaliza en este punto, ofreciendo como resultado de la misma los parámetros:

$$c = c_c(\Delta x_c) \text{ y } U_c(k=)$$

En este caso, el más sencillo, las contribuciones son únicamente la del patrón y la del equipo objeto de calibración (componentes de repetibilidad en calibración y de resolución). Pero además, puede ser necesario incorporar más aportaciones (con sus correspondientes incertidumbres típicas).

Así, por ejemplo, pueden ser consideradas adicionalmente la propia de las condiciones ambientales durante el proceso de calibración $c_{\Delta L}$, deriva en el tiempo de algunos instrumentos y patrones c_{δ} , etc., resultando la nueva función modelo:

$$C = C_c + C_E + C_{\Delta L} + C_{\delta} + \dots$$

Y como ya se ha visto dichas correcciones adicionales son de valor nulo. Por tanto, sólo es necesario expresar sus incertidumbres típicas y determinar sus varianzas de aportación (según apartado 4.2.2.):

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

$$u(c_{c.a.c.}) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha \cdot L \cdot \Delta T_c}{\sqrt{3}}$$

$$u(c_{der}) = \frac{der}{\sqrt{3}}$$

De esta forma, la función modelo queda nuevamente definida por la expresión:

$$c = c_c = \Delta x_c = x_0 - x_c$$

y la incertidumbre típica combinada, aplicando la ley de propagación de varianzas:

$$u_c = \sqrt{u_0^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{(\alpha \cdot L \cdot \Delta T_c)^2}{3} + \frac{der^2}{3} + \dots}$$

Finalmente, la incertidumbre expandida será:

$$U_c = k \cdot u_c$$

Y como en el caso anterior, se presenta como resultado los valores de $c = c_c (\Delta x_c)$ y $U_c (k=)$.

5.1.3 Incertidumbre de medición

La incertidumbre obtenida en el apartado anterior no es un adecuado estimador de la inexactitud del equipo cuando está en uso, es decir, cuando el equipo realiza una medición. La razón fundamental es que en U_c sólo están contempladas las condiciones de calibración, no se tiene en cuenta las influencias que actúan en el proceso de medición. Por tanto, para poder asignar una incertidumbre al resultado de una medida, es necesario que ésta haya sido determinada a partir de la varianza combinada, suma del conjunto de varianzas de aportación de las componentes que afectan, tanto al proceso de calibración como al de medición, es decir, la suma de todas las influencias.

Posteriormente, cuando el instrumento calibrado mida un mensurando desconocido, en el entorno del punto calibrado, con unas referencias similares a las de calibración, proporcionará m medidas brutas, q^k

$$q'_1, q'_2, q'_3, \dots, q'_m$$

- *Estimador de la media de medición:*

$$\bar{q}' = x' = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m q'_k$$

El resultado de la medición se expresará:

$$R = x' + c(c_c + c_e) = x' + x_0 - x_c \quad (c_e = 0)$$

La dispersión de las indicaciones obtenidas al reiterar medidas, en condiciones de repetibilidad, sobre el mensurando.

- *Estimador de la varianza de medición:*

$$s^2(q'_k) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (q'_k - x')^2$$

La incertidumbre combinada vuelve a obtenerse mediante ley de propagación de varianzas, resultando:

$$u = \sqrt{u_0^2 + S^2(x_c) + S^2(x') + u_E^2}$$

Dado que, normalmente, el patrón utilizado en calibración presente un nivel de definición muy bueno, de nivel superior a la propia resolución del instrumento, S_c coincide prácticamente con la variabilidad del instrumento. Sin embargo, S_m recoge la variabilidad del instrumento más la de la propia indefinición del mensurando, por tanto:

$$S_m \geq S_c$$

correspondiendo la igualdad a un mensurando con un nivel de definición similar al del patrón de calibración. Esta última circunstancia puede identificarse como el óptimo y determina la incertidumbre típica.

Asimismo, las reiteraciones del mensurando son escasas; en ocasiones $m=3$, y en la mayoría de las veces, $m=1$. Por tanto, la variabilidad S_m no es suficientemente significativa.

Por todo ello, de acuerdo al apartado 4.1.2, caso B:

$$S^2(q'_k) = S^2(q_{ck})_1$$

La incertidumbre combinada queda:

$$u = \sqrt{u_0^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3}}$$

Como puede apreciarse, al igual que el caso anterior, la incertidumbre de la medida con un instrumento calibrado que trabaja en condiciones similares a la de calibración, queda al menos expresada en función de la contribución del patrón y del instrumento (repetibilidad cuando se está calibrando, repetibilidad cuando mide un mensurando desconocido y resolución).

Asimismo, se pueden adicionar cuantas componentes de incertidumbre sean necesarias para completar el balance de incertidumbres final.

Por tanto, considerando el conjunto de contribuciones adicionales:

$$u = \sqrt{u_0^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{(\alpha \cdot L \cdot \Delta T_c)^2}{3} + \frac{(\alpha \cdot L \cdot \Delta T_m)^2}{3} + \frac{\delta^2}{3} + \dots}$$

Quedando finalmente:

$$U = k \cdot u$$

Esta incertidumbre es la que se asigna al resultado de una medida realizada con el instrumento considerado, de forma que la expresión de dicho resultado quedará: Expresar un resultado de acuerdo a la expresión anterior supone corregir el valor ofrecido por el instrumento (o la media si $m=3$) con el valor de desviación obtenido en la calibración (Δx_c) cada vez que se realice una medición.

$$R = (x' + \Delta x_c) \pm U \quad (k=)$$

Sin embargo, es posible considerar la corrección de calibración como una componente más de incertidumbre, en cuyo caso, su varianza de aportación se determinará considerando que se dicha componente se distribuye de acuerdo a una función rectangular:

$$u_{\Delta x_c}^2 = \frac{(\Delta X_c)^2}{3}$$

Si se decide considerar esta condición, el criterio se denomina de corrección nula, quedando la expresión de un resultado ofrecido por el instrumento de la forma:

$$R = x' \pm U \quad (k=)$$

Esta situación resulta más cómoda de cara al usuario, por cuanto que la corrección de calibración ha quedado ya incluida en la incertidumbre. Sin embargo, si la corrección es importante, la incertidumbre se verá incrementada innecesariamente.

En definitiva, considerar el criterio de corrección nula o el de corrección al resultado dependerá de los requisitos que apliquen al proceso metroológico que se esté realizando.

5.2 Calibración en varios puntos de la escala

En la práctica metrológica habitual, un equipo suele ser empleado en todo su intervalo de medida, no en una parte concreta de la escala. Por tanto, la calibración en un solo punto no garantizaría la fiabilidad del equipo para su uso total; asimismo, tampoco sería factible la calibración en todos los puntos de su escala.

Por tanto, al objeto de alcanzar una situación de compromiso entre el coste y bondad requerida en el proceso, la calibración se realizará eligiendo varios puntos de la escala del equipo, situados de forma aproximadamente equidistante, y aplicando sobre cada uno de ellos el modelo de calibración local. Como ya es sabido, será necesario disponer de patrones certificados para cada punto de calibración, de forma que la trazabilidad quede garantizada.

Todos estos requerimientos deben estar recogidos debidamente el correspondiente procedimiento de calibración. Los resultados obtenidos en dicho proceso pueden presentarse tabulados, de acuerdo con el siguiente modelo [Tabla 5]:

Tabla 5. Resultados de las calibraciones parciales

| Punto calibración | Valor patrón | Resultados calibración local | | |
|-------------------|--------------|------------------------------|----------|---------------------------|
| | | Incertidumbre | | Corrección de calibración |
| | | Calibración | Medición | |
| P1 | x_{01} | U_{c1} | U_1 | Δx_{C1} |
| P2 | x_{02} | U_{c2} | U_2 | Δx_{C2} |
| P3 | x_{03} | U_{c3} | U_3 | Δx_{C3} |
| --- | --- | --- | --- | --- |

5.3 Calibración global del intervalo de medida

Una vez evaluado el equipo en los puntos de la escala seleccionados, de acuerdo al procedimiento de calibración que le aplica, es necesario establecer algún criterio globalizador para expresar la incertidumbre que acompañe al resultado de cualquier medida ofrecida por el equipo.

En muchas ocasiones, cuando se trata de equipos sencillos, para facilitar su utilización en el proceso metrológico, se adopta el criterio de asignar una única incertidumbre para todo el intervalo de medida.

En cuanto a la corrección, podrá considerarse corrección nula o corrección constante para todo el intervalo de medida. Sin embargo, existen otras situaciones en las que la opción anterior no se suele utilizar, sobre todo en equipos complejos. En esos casos, se adopta el criterio de asignar una incertidumbre específica a cada punto de la escala.

Por último, aunque los criterios mencionados pueden ser considerados, tanto en la evaluación de la incertidumbre de calibración como en la de uso del equipo, será esta última situación la que se tenga en cuenta en los apartados siguientes.

5.3.1 Determinación de la incertidumbre de uso según el criterio de incertidumbre constante y corrección nula para todo el intervalo de medida

$$R = x' \pm U \quad (k=)$$

5.3.1.1 Corrección nula e incertidumbre constante para todo el intervalo de medida I

Este caso, uno de los más frecuentes y extendidos, supone que sólo se dispone de las incertidumbres de calibración y de las correcciones de calibración de los puntos de la escala evaluados. Es la situación típica donde el usuario del equipo no es el calibrador del mismo y, por tanto, dispone únicamente del certificado de calibración, a partir del cual deberá determinar la incertidumbre de uso (local o global). Dicha incertidumbre vendrá dada por la denominada incertidumbre corregida.

Incertidumbre local de uso en cada punto calibrado [Tabla 6]:

$$U_i = (U_i)_{\text{corregida}} = U_{ci} + |\Delta x_{ci}|$$

Tabla 6. Incertidumbre corregida

| Punto calibración | Valor patrón | Resultados calibración local | | Incertidumbre corregida |
|-------------------|--------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | | Incertidumbre | Corrección de calibración | |
| P1 | x_{01} | U_{c1} | $c_{c1} (\Delta x_{c1})$ | $U_{c1} + \Delta x_{c1} $ |
| P2 | x_{02} | U_{c2} | $c_{c2} (\Delta x_{c2})$ | $U_{c2} + \Delta x_{c2} $ |
| P3 | x_{03} | U_{c3} | $c_{c3} (\Delta x_{c3})$ | $U_{c3} + \Delta x_{c3} $ |
| | | | | |

Incertidumbre global de uso para todo el intervalo de medida:

$$U = \text{máx} (U_i)_{\text{corregida}} = \text{máx} (U_{ci} + |\Delta x_{ci}|)$$

Así, el resultado de una medida, para cualquier punto del intervalo de medida, tendría una incertidumbre constante, igual a U , y corrección nula. Esta solución se justifica cuando el valor de la corrección es pequeño, por ejemplo, cuando resulta inferior a la incertidumbre asociada.

5.3.1.2 Corrección nula e incertidumbre constantes para todo el intervalo de medida II

Cuando se dispone de todos los datos del proceso de calibración, lo usual cuando el usuario del equipo es quien además realiza su calibración, es posible determinar la incertidumbre combinada a partir de las varianzas de aportación de las componentes de incertidumbres que se hayan establecido en el balance de incertidumbre, incluyendo la aportación de la corrección de calibración. Incertidumbre local de uso en cada punto calibrado:

$$u_i = \sqrt{u_{0i}^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{\Delta x_{ci}^2}{3} + \dots}$$

Incertidumbre global de uso para todo el intervalo de medida:

$$U = k \cdot \text{máx}(u_i)$$

5.3.2 Determinación de la incertidumbre de uso según el criterio de incertidumbre y corrección constante para todo el intervalo de medida

$$R = (x' + \overline{\Delta X_c}) \pm U \quad (k =)$$

Al igual que en caso anterior, usuario y calibrador son el mismo agente, por tanto, el punto de partida vuelve a ser el balance de incertidumbre. De acuerdo con la GUM, es posible estimar una corrección media única, $\overline{\Delta X_c}$, denominada corrección global [Figura 6]:

$$\overline{\Delta X_c} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta x_{cj}$$

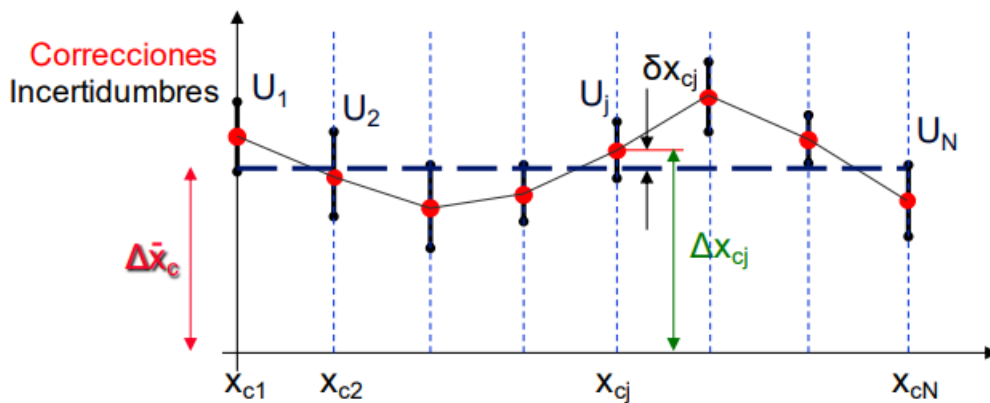


Figura 6. Corrección global

Definiendo la corrección residual como:

$$\delta_{ci} = \Delta x_{ci} - \overline{\Delta X_c}$$

de media nula y varianza:

$$u^2(\delta_{ci}) = \frac{\delta x_{ci}^2}{3}$$

Por tanto: - Incertidumbre local de uso en cada punto calibrado:

$$u_i = \sqrt{u_{0i}^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{\delta_{ci}}{3} + \dots}$$

- Incertidumbre global de uso para todo el intervalo de medida:

$$U = k \cdot \text{máx}(u_i)$$

5.3.3 Corrección e incertidumbre para cada punto del rango

Cuando los requisitos metrologicos del cliente (tolerancias) exigen trabajar en condiciones muy ajustadas y, por tanto, no es posible asignar una única incertidumbre constante con corrección nula o constante, es necesario recurrir a otros modelos, tales como las técnicas de regresión.

De esta forma, para cada punto del intervalo de medida se identifica una corrección y una incertidumbre específicas [Tabla 7].

Tabla 7. Tabla de incertidumbres y correcciones locales

| Punto calibración | Valor patrón | Resultados calibración local | |
|-------------------|--------------|------------------------------|---------------------------|
| | | Incertidumbre | Corrección de calibración |
| P1 | X_{01} | U_1 | ΔX_{C1} |
| P2 | X_{02} | U_2 | ΔX_{C2} |
| P3 | X_{03} | U_3 | ΔX_{C3} |
| | | | |

A partir de los resultados de las calibraciones locales, se calculará una curva de regresión para las correcciones y otras para las incertidumbres (habitualmente rectas). Esta forma:

$$U(x) = ax + b; \quad \Delta X_{C1} = a'x + b'$$

En el caso de que el modelo lineal no sea suficientemente fiable para representar los valores, podrá ser necesario recurrir a otros modelos de mayor orden.

6. Capacidad de medida y calibración

De acuerdo a EA, la capacidad de medida y calibración (CMC) se define como: “la incertidumbre de medida más pequeña que un laboratorio puede conseguir, dentro del alcance de su acreditación, cuando realiza calibraciones más o menos rutinarias de patrones de medida casi ideales, utilizados para definir, realizar, conservar o reproducir una unidad de esa magnitud o uno o más de sus valores, o cuando

realiza calibraciones rutinarias de instrumentos de medida casi ideales utilizados para medir una magnitud”.

Por “calibraciones más o menos rutinarias” se entiende que el laboratorio debe ser capaz de conseguir la capacidad óptima de medida indicada en los trabajos usuales para los que ha sido acreditado. Obviamente, existen casos en los que el laboratorio podría mejorar dicha capacidad como resultado de investigaciones y adopción de precauciones adicionales, pero estos casos no se contemplan en la definición de la CMC, a no ser que la política explícita del laboratorio así lo contemple.

La inclusión del calificativo “casi ideal” en la definición significa que la CMC no debe depender de las características del instrumento calibrado. El concepto “casi ideal” indica, pues, que no existe una contribución significativa a la incertidumbre de medida atribuible a efectos físicos que puedan deberse a imperfecciones del instrumento calibrado. Sin embargo, se entiende que este tipo de instrumento casi ideal debe existir. Si se establece que, en un caso concreto, incluso el instrumento más cercano al “ideal” que existe contribuye a la incertidumbre de medida, esta contribución deberá incluirse en la determinación de la capacidad óptima de medida, indicando que dicha capacidad se refiere a la calibración de ese tipo de instrumento.

Para evaluar la capacidad óptima de medida, deben tenerse en cuenta todos los componentes que realizan una contribución significativa a la incertidumbre de medida.

La capacidad de medida y calibración es uno de los parámetros que se utilizan para definir el alcance de la acreditación de un laboratorio de calibración. Los otros son: magnitud física, rango de medida y método de calibración o tipo de instrumento calibrado. Dicha CMC se indica en el Anexo Técnico al certificado de acreditación. Es uno de los datos fundamentales que pueden encontrarse en los directorios de laboratorios acreditados que los organismos de acreditación publican periódicamente. Se trata de un dato que permite a los clientes potenciales de los laboratorios acreditados juzgar la capacidad de un laboratorio para realizar un determinado trabajo de calibración en el laboratorio o “in situ”.

La siguiente tabla [Tabla 8] muestra un ejemplo del cuadro resumen del cálculo de incertidumbre realizado sobre un instrumento.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--|------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Valor nominal (mm) | 0 | 2,4 | 4,9 | 7,5 | 9,9 | 12,5 | 15 | 17,6 | 20,1 | 22,5 | 25 |
| Valor patrón (μm) | 0,00 | 2400,13 | 4900,15 | 7499,94 | 9900,03 | 12500,10 | 15000,24 | 17600,19 | 20100,13 | 22500,07 | 25000,07 |
| Lectura del equipo (mm) | 0 | 2,4026 | 4,9024 | 7,5013 | 9,9016 | 12,5016 | 15,001 | 17,6006 | 20,1008 | 22,5009 | 25,0006 |
| Corrección local: c_i (μm) | 0 | -2,47 | -2,25 | -1,36 | -1,57 | -1,5 | -0,76 | -0,41 | -0,67 | -0,83 | -0,53 |
| $U_{\text{combinada}}$ (μm) | 0,44 | 0,44 | 0,38 | 0,41 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,50 | 0,39 | 0,44 | 0,40 |
| k | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| U (μm) | 0,88 | 0,87 | 0,76 | 0,82 | 0,77 | 0,78 | 0,79 | 1,00 | 0,79 | 0,89 | 0,79 |
| U (μm) (CMC) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

Tema 11: El laboratorio de metrología

1. Introducción

El campo de la medición abarca desde los Laboratorios Nacionales, con la misión específica de la conservación, reproducción y diseminación de la unidades de medida, hasta el propio taller de fabricación, en donde una serie de instrumentos ayudan a conseguir la forma deseada de las piezas marcadas en los planos.

Entre ambos extremos existen diferentes tipos de centros de medición, con diferentes misiones y características; para su estudio y como más representativo, se ha elegido de forma genérica el Laboratorio de Metrología, capaz de proporcionar medidas de precisión y dar calibración a los equipos de los departamentos de control de calidad de los diferentes talleres de fabricación [Figura 1].



Figura 1. Estructura de laboratorios metroológicos

2. Condiciones constructivas y ambientales

Como ya hemos dicho anteriormente, toda medida de una magnitud está afectada de una incertidumbre, debido entre otras causas a:

- La falta de precisión de los instrumentos de medida
- La influencia sobre la magnitud a medir y sobre los medios de medición de un cierto número de magnitudes o causas de influencia, como las condiciones ambientales y los operadores.

Para disminuir este problema los laboratorios de metrología precisan un ambiente controlado, al menos para los principales parámetros que pueden influir en las magnitudes medidas o en los instrumentos que sirven para su medición. Es difícil aislar estos parámetros y hacerlos independientes de las condiciones externas, y a veces internas, del laboratorio. Se consigue normalmente mantenerlos dentro de unos límites determinados, haciendo compatible la variación de los valores de las magnitudes de influencia con la precisión deseada para las medidas.

La construcción de un laboratorio de metrología supone un gasto inicial elevado, que ha de ser estudiado cuidadosamente para que el funcionamiento sea correcto con un coste de mantenimiento mínimo. Las condiciones constructivas exigibles para el funcionamiento de un laboratorio quedarán definidas cuando se conozca la precisión que se quiere conseguir, las máquinas y equipos que se van a instalar, y las condiciones ambientales que es necesario mantener [Tabla 1].

Localización del laboratorio

Para conseguir que sus condiciones ambientales sean poco influenciadas por las exteriores, el laboratorio debe encontrarse lo más aislado posible. La situación ideal del mismo es un sótano, integrado total o parcialmente en otras construcciones, para evitar al máximo las pérdidas de calor, con una sola puerta

de acceso para el trabajo diario y una segunda puerta para entrada de maquinaria y a efectos de seguridad, situada en el extremo opuesto del laboratorio y que, en condiciones normales, se encuentre herméticamente cerrada.

Las ventanas, si existen, estarán orientadas al norte, evitando la radiación solar directa y tendrán doble cristal, asegurando la estanqueidad con juntas. El aislamiento de las paredes puede reforzarse con el empleo de materiales de construcción para el aislamiento térmico, acústico y de humedad; se consigue al máximo si se rodea al laboratorio de una galería visitable que forme una cámara de aire. El suelo ha de ir protegido principalmente contra vibraciones mediante una caja de construcción específicamente antivibratoria cuyo espesor total es de unos 50 cm. En el interior de la sala conviene colocar un suelo de madera o hule grueso para prevenir posibles caídas de instrumentos o de las piezas que se miden. El techo necesita una protección impermeabilizante contra la lluvia y cámara de aire, que se consigue con un falso techo. Debe evitarse la escayola, por la constante producción de polvos muy finos.

Tabla 1. Recomendaciones sobre condiciones ambientales

| CONDICIONES | METROLOGIA DIMENSIONAL |
|-----------------------------------|--|
| TEMPERATURA | Zona de interferometría: $20\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ Zona de calibración: $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ Zona de medición: $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ |
| | Variaciones de temperatura = 2 °C/h En laboratorios patrón = $2\text{ °C}/4\text{ horas}$ |
| HUMEDAD RELATIVA | Máximo del 50% (mínimo del 40% por razones fisiológicas) |
| POLVO | Retener partículas mayores de $1\text{ }\mu\text{m}$ Máximo 200 partículas/cm ³ |
| VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN DEL AIRE | Realizar de 10 a 20 cambios/hora Inyección de aire limpio del 10 al 20% Velocidad máxima en el puesto de trabajo $0,15\text{ m/s}$ |
| SOBREPRESIÓN ESTÁTICA | De 12,5 a 25 Pa |
| VIBRACIONES | Con una frecuencia de 200 Hz la aceleración máxima $0,003\text{ g}$ |
| RUIDO | Máxima 60 dB |
| ALUMBRADO | General de 800 a 1000 lux sobre puesto de trabajo (mínimo de 550 lux en cualquier punto del laboratorio) Lámparas fluorescentes con difusor |
| PUESTA A TIERRA | Restringido para el laboratorio |

Temperatura

Es posiblemente la más importante de las magnitudes de influencia, pues su variación es capaz de dilatar los cuerpos, cambiar las características de los componentes electrónicos, modificar la viscosidad de los líquidos, etc. La instalación de un sistema de aire acondicionado es necesaria para mantener esta magnitud dentro de los límites requeridos.

Se mantendrá una renovación del aire de 10 a 20 cambios por hora, con una entrada de aire limpio (filtrado y seco) de 10 a 20%, distribuido lo más uniforme posible y con una velocidad en el puesto de trabajo igual o inferior a 0,15 m/s. En su diseño se tendrá en cuenta:

- Número de personas que habitualmente permanecen en el laboratorio, que son fuente de calor (equivalente a una estufa de 100 w).
- Calor disipado por los equipos
- Forma de distribución de la corriente de aire:
 - De flujo no laminar, con salidas de aire en el techo a intervalos regularmente distribuidos y recogida del aire en la parte inferior de las paredes o en el propio techo. Es el más generalizado y económico.
 - De flujo laminar, Puede ser horizontal, entre dos paredes opuestas, o vertical de suelo a techo. En Alemania se ha ensayado un sistema de este tipo pero con recogida en orificios laterales situados en la parte inferior, en lugar de en el suelo.

Humedad

El acabado de los instrumentos, los patrones y las partes metálicas de las piezas a medir son muy sensibles a la oxidación, razón por la cual se trabaja en ambientes relativamente secos, para evitar la condensación del vapor de agua sobre la pieza o equipo, al llegar la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura de saturación a temperatura ambiente. El límite inferior se puede fijar en el 40% por razones fisiológicas y de bienestar de las personas que allí trabajan.

Presión

Las variaciones de la presión atmosférica modifican el índice de refracción del aire, alterando las mediciones de tipo óptico, en cuyo caso se introduce la correspondiente corrección respecto al vacío. En el resto de medidas no tiene un efecto notorio.

Es conveniente mantener una ligera sobrepresión estática respecto al exterior, para que, en los momentos de apertura de puertas, las partículas de polvo tiendan siempre a salir hacia fuera. **Limpieza del aire**

Un laboratorio de metrología debe ser un área lo más limpia posible. Se puede decir que una sala de metrología se considera limpia cuando las partículas que están en suspensión en el aire son inferiores a 1 μm . Una posible solución para la limpieza del aire será la instalación de filtros en los conductos de entrada de aire y en los de recirculación del local, colocación de dobles puertas, cortinas de aire en las

entradas, así como la utilización de ropa y calzado especial. El humo producido al fumar, es una fuente de suciedad que debe estar prohibido en todas las salas de calibración e interferometría.

Vibraciones

El laboratorio de metrología debe estar alejado de zonas y lugares donde se originen vibraciones tales como, secciones de prensa, compresores, máquinas rotativas, etc. Una primera medida para su atenuación y eliminación hasta niveles no perjudiciales para trabajos de metrología sería disponer de apoyos antivibratorios y amortiguadores sobre los que descansen los equipos e instrumentos de medida.

Ruidos

Se debe trabajar con el menor nivel de ruido posible, para que no perturbe el trabajo normal de las personas. Es recomendable no sobrepasar los 60 dB.

Iluminación

Debe ser uniforme, sin deslumbramientos, reflejos molestos ni zonas oscuras. Se estima suficiente un nivel medio de 800 a 1000 lux. La relación de contraste no debe superar la relación de 3 a 1 entre la zona de trabajo y la más próxima y de 10 a 1 entre la zona de trabajo y las oscuras. Es conveniente utilizar "luz fría" fluorescentes en el techo. Si fuera necesaria mayor iluminación se usará alumbrado auxiliar localizado, también fluorescente.

Alimentación eléctrica

Muchos equipos que se utilizan se deben conectar a la red de alimentación y por tanto sus características están afectadas por la variación de los parámetros que caracterizan dicha red como son la frecuencia, forma de onda y amplitud. La C.E.I. recomienda para la alimentación de instrumentos de medida eléctricos:

Tensión nominal $220 \pm 1\%$ V

Distorsión armónica $> 5\%$

por lo que resulta muy conveniente proveer a la red de una estabilización general o bien equipos individuales para alimentar a uno o varios instrumentos de medida.

Puesta a tierra

Se dispondrá de un sistema que asegure potenciales respecto a tierra, iguales en todo el laboratorio, o al menos en una zona de medida concreta. Es recomendable una tierra independiente de la general, a la que se llama "no perturbada" y a la que se conectan los aparatos de medida.

Mobiliario

Se dotará al laboratorio de mesas fuertes y resistentes, recubiertas de plástico para dar una buena superficie de apoyo a los aparatos de medida y a las piezas que se estén midiendo. También se dispondrá de carros móviles, mesas, estantes para equipos, extintores portátiles contra incendios, etc.

3. Organización de un laboratorio

3.1 Organización del personal

Así como en la mayoría de los campos de la técnica han surgido sistemas de automatización de los procesos productivos, los cuales relegan la parte humana a la de simple testigo o control del proceso, en el caso de la técnica metrología la participación del hombre es insustituible. No es posible realizar una auténtica metrología sin metrologos. Las máquinas ofrecen lecturas pero la aptitud del técnico (formación, conocimientos técnicos, experiencia) que realiza la medición hará que el resultado de una medida adquiera validez metrología.

De forma general, el personal del laboratorio se distribuye en los diferentes departamentos que integran el mismo, tales como:

- Directivo
- Técnico
 - Cualificado
 - Formación
- Operativo
 - Mantenimiento de equipos
 - Mantenimiento de condiciones ambientales
- Gestión, archivos, calidad
 - Control de documentos y archivo de registros
 - Elaboración, revisión y aprobación de certificados, etc.

En cuanto al personal técnico, en líneas generales, puede organizarse de acuerdo con el siguiente organigrama.

Grupo de medición

Tienen por misión efectuar las medidas concretas, según los métodos establecidos. Es deseable una especialización por magnitudes que posean suficiente entidad, y así dentro del campo de la metrología dimensional o geométrica se pueden distinguir los siguientes puntos de trabajo:

- Bloques patrón (interferometría y comparación)
- Longitudes y cotas lineales en piezas (medidoras universales y utillaje diverso)
- Angulos (mesas y reglas de senos, platos giratorios, instrumentos ópticos)
- Formas (comparadores específicos y máquinas de medición de formas)
- Estado superficial (rugosímetro)
- Planitud y alineaciones (mesas e instrumentos ópticos)

Grupo de calibración

Tiene por misión ejecutar el Plan de Calibración del laboratorio, dentro de las especificaciones y plazos previstos para el mismo.

Grupo de estudio

Existen en laboratorios de superior categoría, con la misión específica fundamental de elaborar los métodos de medida a emplear por los grupos de medición y calibración.


Además de estos grupos, que realizan las operaciones técnicas el laboratorio dispone de personal que realiza trabajos de:

- Mantenimiento de equipos
- Mantenimiento de condiciones ambientales de los locales
- Control de documentos y archivo de registros
- Elaboración, revisión y aprobación de certificados, etc.

3.2 Organización de equipos

El laboratorio estará provisto de todos los equipos necesarios para la ejecución correcta de las calibraciones y mediciones. Debe disponer de un inventario actualizado de todos sus equipos, que incluya los auxiliares utilizados en el laboratorio.

Aquellos equipos que se utilicen directa o indirectamente en la realización de las medidas y que puedan afectar a los resultados de las mismas, deben disponer del correspondiente registro o ficha de equipo [Figura 1].

| | | | | |
|-------------------------------|--|---------------------------------|--|---|
| DESCRIPCIÓN: | | MICROMETRO EXTERIORES | |  |
| CAMPO DE MEDIDA / DIV. ESCALA | | 0 - 25 mm / 0,001 mm | | |
| FABRICANTE / MODELO | | Mitutoyo / 293 - 503 | | |
| Nº SERIE / CODIF. INTERNA | | 6196916 / D.02.10-01 | | |
| UBICACIÓN: | | A - D2 | | |
| ALCANCE DE USO: | | Medición y apoyo en calibración | | |
| FECHA PUESTA EN SERVICIO: | | 18/02/08 | | |
| INSTRUCCIONES DEL FABRICANTE: | | SI | | |
| PROCEDIMIENTO CALIBRACIÓN: | | PT06 | | |
| MÉTODO MANTENIMIENTO: | | PG05 | | |
| MÉTODO VERIFICACIÓN: | | PG05 | | |
| OBSERVACIONES: | | | | |

| TRAZABILIDAD | | | | MANTENIMIENTO/VERIFICACION INTERMEDIA | | |
|--------------|--------|----------------|-------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| FECHA | CENTRO | Nº CERTIFICADO | INCERTIDUMBRE | FECHA | OPERACION | RESULTADO |
| 18/02/08 | CEMUM | 2008/001 | Segun tabla en CC | | | |
| 26/02/09 | CEMUM | 2009/001 | Segun tabla en CC | | | |
| 20/02/10 | CEMUM | 2010/003 | Segun tabla en CC | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Figura 1. Ficha de equipo

La norma UNE-EN ISO/IEC 17025 indica el contenido de los registros y, entre otros, comprende:

- Nombre del equipo
- Nombre del fabricante, número de serie
- Identificación interna dentro del laboratorio
- Fecha de recepción
- Fecha de puesta en servicio. Previamente, si es necesario, deberá llevarse a cabo su calibración
- Historial de cualquier daño, malfuncionamiento, modificación o reparación
- Detalles sobre realización de mantenimiento

En cuanto al punto tercero, es libre para cada laboratorio y debe realizarse de forma clara y permanente sobre el equipo, bien con una etiqueta o grabado sobre él. De esta forma se evita el riesgo de confusión entre varios instrumentos del mismo tipo y permite un seguimiento personalizado del mismo. Un ejemplo de identificación interna podría ser el siguiente [Figura 2]:

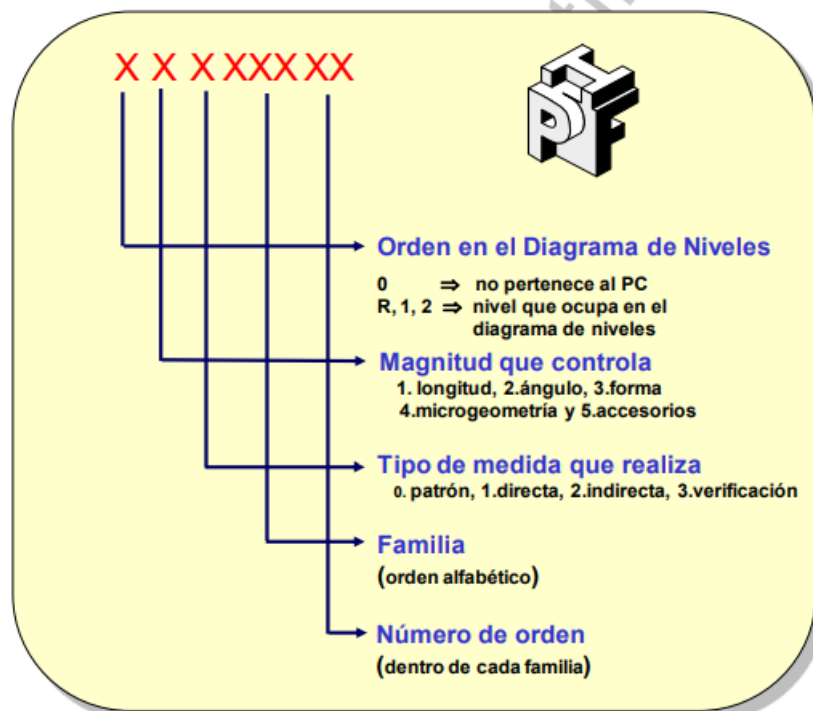


Figura 2. Ejemplo de codificación interna

Uno de los muchos estudios que se pueden realizar, con los datos existentes en cada ficha o registro de un instrumento, es el conocimiento de la cumplimentación del trabajo de medición, con la siguiente información:

- Equipos que están dentro de su período (%)
- Equipos que no lo están (%)
- Equipos incorrectos, si existen, que se están utilizando

4. Plan de Calibración

En un laboratorio, la correcta elección de los instrumentos de medida no es suficiente, es necesario asegurar que, durante toda la vida del instrumento, su fiabilidad y precisión estén siempre dentro de las especificaciones iniciales requeridas para su utilización.

Por tanto, los instrumentos de medida deben ser calibrados periódicamente con unas incertidumbres de calibración compatibles con las especificaciones y exigencias del producto que se está fabricando y asegurar que los medios de calibración son trazables a través de una cadena de calibración a los patrones nacionales.

El vocabulario internacional de términos de metrología define Calibración como: “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 los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizada por patrones”. Es decir, conjunto de operaciones que tienen por objeto determinar el valor de la incertidumbre de un patrón, instrumento de o equipo de medida, procediendo a su ajuste o expresando aquella mediante tablas o curvas de corrección.

En muchas ocasiones la calibración da lugar a la emisión de un Certificado de Calibración, ya que actualmente es una exigencia de los sistemas de calidad.

Para que el resultado de dos mediciones, realizadas en puntos alejados, sea compatible, sería preciso que ambas estuvieran referidas a un patrón común. Esta doble comparación resulta frecuentemente imposible, incluso para las distintas fábricas de una misma empresa. Además, al medir, sólo pretendemos conocer el valor de una magnitud con un grado de aproximación, o incertidumbre. Para poder lograrlo, es necesario conocer el estado del instrumento de medida o sistema de medida utilizado, es decir, en cuánto difieren las indicaciones del instrumento del valor verdadero (que siempre es desconocido). Como aproximaciones a los valores verdaderos se utilizan los valores de magnitudes físicas materializadas por los patrones o en su caso por los materiales de referencia.

Por tanto, para calibrar un instrumento hace falta otro de mayor precisión, entendiendo como tal, la aptitud de un instrumento para dar indicaciones próximas al valor verdadero, que nos proporciona el valor convencionalmente verdadero necesario para contrastar la indicación del instrumento problema. Al aplicar sistemáticamente este principio llegamos a establecer, en sentido ascendente, una cadena ininterrumpida de comparaciones, que relaciona las medidas realizadas por un instrumento determinado con los patrones de más alto nivel.

Se llama Trazabilidad a la propiedad de la medida, por la cual esta medida se puede relacionar o referir a los patrones nacionales o internacionales adecuados por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones.

Todas las normas y recomendaciones internacionales en materia de ensayos y control de calidad exigen que las mediciones efectuadas en la práctica de ambas actividades, tengan trazabilidad a los patrones adecuados, generalmente patrones nacionales o internacionales y a través de estos a las unidades básicas

SI. La satisfacción de este requisito implica, evidentemente, que los instrumentos de medida estén calibrados y de esta forma garantizar la bondad y la trazabilidad de los resultados de las mediciones.

Recibe el nombre de Plan de calibración la calibración sistemática y organizada del total de los instrumentos y accesorios de un centro de medición y supone la ordenación de todos los instrumentos de mayor a menor precisión.

La documentación necesaria para soportar el plan de calibración de un laboratorio de metrología está compuesta por la siguiente información:

- Carta de trazabilidad
- Diagrama de niveles
- Etiqueta de calibración
- Procedimientos de calibración
- Archivo de resultado

4.1 Carta de trazabilidad

Refleja gráficamente la cadena de laboratorio o centros de nivel metrológico superior que enlazan los patrones de un centro de trabajo con los del laboratorio nacional de forma que quede suficientemente asegurado el enlace final a las unidades básicas [Figura 3].

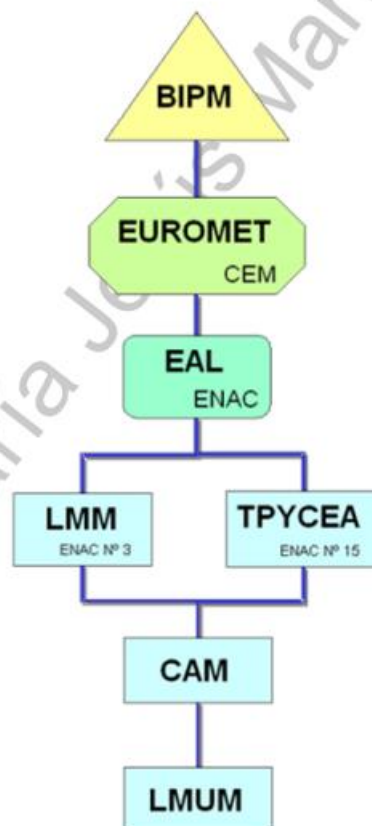


Figura 3. Carta de trazabilidad

4.2 Diagrama de niveles

Es un gráfico en el que figuran, agrupados y ordenados por niveles de precisión, todos los patrones, instrumentos y equipos de medida de un laboratorio [Figura 4].

Los criterios para la formación de un grupo son:

- Que todos los instrumentos que comprende se calibran con los mismos patrones
- Que utilizan los mismos procedimientos
- Que sus incertidumbres se estimen con las mismas ecuaciones de cálculo

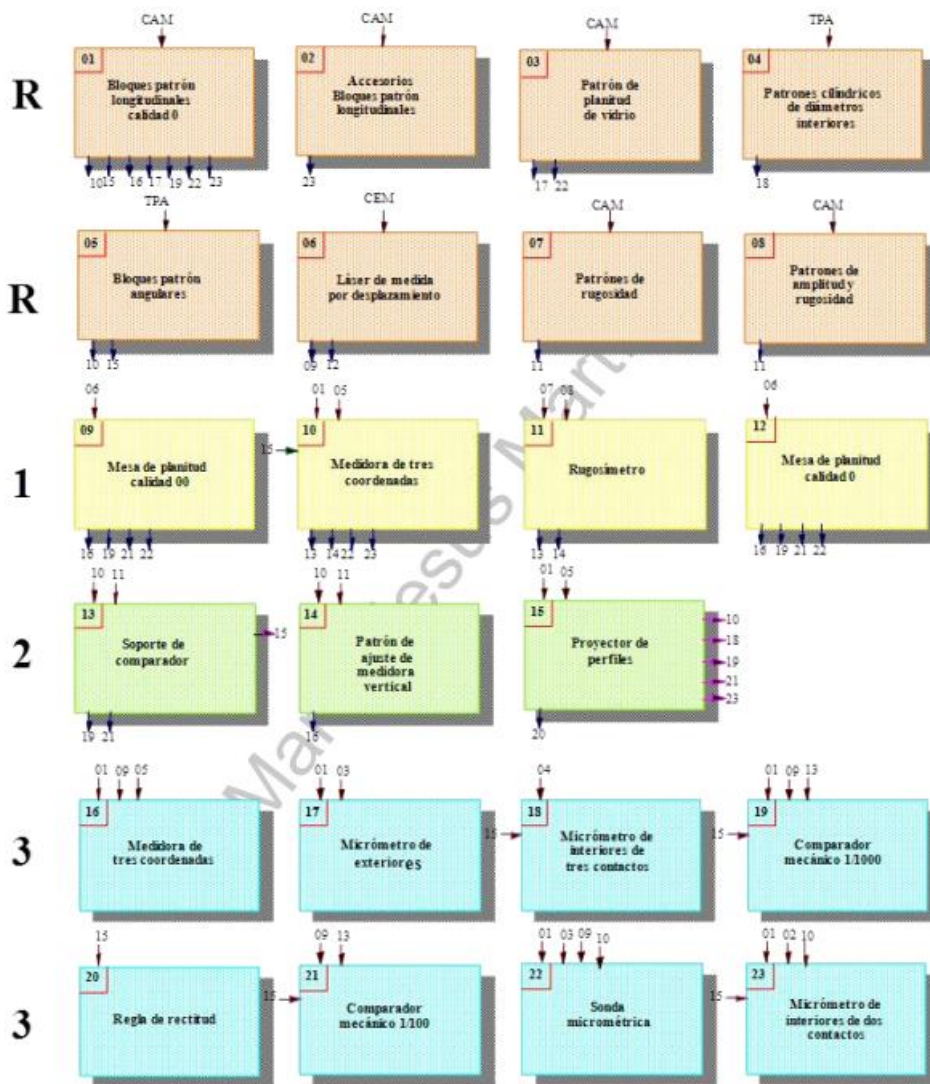


Figura 4. Diagrama de niveles

En un grupo puede haber un solo elemento, varios similares o accesorios o componentes análogos de diferentes aparatos. En cuanto a los niveles, el primer nivel lo forman los patrones primarios del centro, es decir, aquellos elementos o instrumentos de máxima precisión cuyos valores se consideran como verdaderos, sin calibración alguna por parte del propio centro. Estos patrones primarios han de calibrarse

periódicamente en otro centro de nivel superior y sus valores e incertidumbres han de tenerse certificados para un cierto plazo de validez. A este nivel se le denomina Nivel de referencia (nivel R ó 0). Los siguientes niveles, menos el último se forman con los grupos de elementos que son calibrados por los niveles superiores y calibran a los de niveles inferiores. El último nivel está formado por los grupos que una vez calibrados no se emplean en ninguna otra calibración interna del laboratorio; este nivel generalmente es el más numeroso.

En cada grupo y mediante flechas que entran y salen de él, se indica de qué otros grupos recibe calibración y a quién se la da. El diagrama de niveles permite observar la disposición relativa de toda la instrumentación del laboratorio dentro de una estructura jerárquica. Es necesario observar un principio fundamental: cualquier cadena de calibración de instrumentos ha de ser descendente a través de los niveles, sin saltos atrás y sin cerrarse sobre sí misma. Con ello se asegura la calibración de todo instrumento por otro más preciso.

Además, de las flechas verticales, en un diagrama de niveles pueden aparecer flechas en dirección horizontal. Con ellas se indican los instrumentos, que no utilizándose como patrones para el instrumento objeto de calibración, actúan como instrumentos auxiliares de calibración (comprobaciones previas, puesta a cero, etc.) [Figura 5].

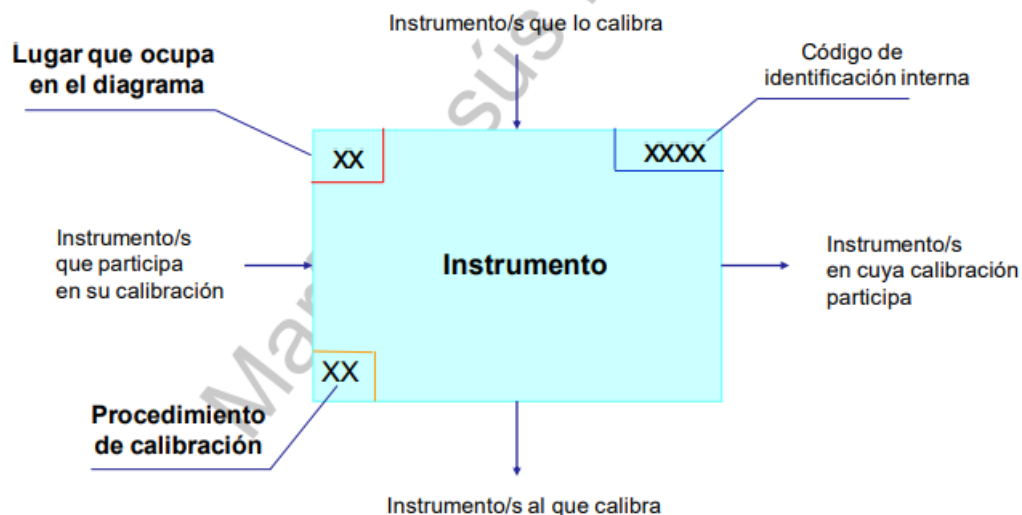


Figura 5. Grupo de calibración

En el plan de calibración, uno de los puntos más importantes es la determinación de los intervalos de tiempo en los que se considera válida una determinada calibración de un patrón o instrumento de medida, con objeto de prevenir toda degradación de la calidad de la medida a efectuar y asegurar su fiabilidad en el tiempo. No hay un criterio único en la fijación del tiempo, ya que para cada calibre o elemento de control se deberá tener en cuenta:

- Grado de precisión del instrumento (calidad)
- Frecuencia de uso
- Estabilidad y deriva

- Rentabilidad económica

Estos intervalos de tiempo, establecidos inicialmente para un instrumento dado, no son constantes y difieren de un equipo a otro, debiendo ser revisados y si se presenta el caso readaptarlos en función de la experiencia. Además, toda intervención sobre un instrumento de medida que pueda modificar sus características metrológicas, exige modificar la periodicidad previamente establecida.

Cuando los instrumentos comprendidos bajo un mismo número han sido calibrados, se tacha o colorea el cuadro que los identifica, con lo que en todo momento se sabe cuál es el nivel de calibración realizado. Al cabo del tiempo fijado para la calibración completa del laboratorio (uno o dos años), el diagrama habrá sido completamente tachado y se sustituirá por otro nuevo, con las modificaciones correspondientes a los instrumentos dados de alta y baja, para recomenzar el plan de calibración, cuya ejecución es una tarea permanente del laboratorio.

4.3 Procedimiento de calibración

Este documento, identificable fácilmente con el grupo del diagrama de niveles mediante la misma numeración, debe contener toda la información necesaria y definir, de la forma más concreta posible, las operaciones que el metrólogo debe efectuar para realizar la calibración. Los procedimientos pueden referirse a:

I. Las exigencias de calibración externa, para los instrumentos del nivel de referencia, así como los detalles de su preparación para salir del laboratorio y de su recepción una vez calibrados. Los aspectos fundamentales que deben ser recogidos en este tipo de documentos son:

- a. Protocolo Calibración
- b. Criterios de aceptación
- c. Incertidumbre global de uso
- d. Actualización de los datos de calibración de patrones
- e. Mantenimiento y Verificaciones intermedias

II. Las calibraciones internas, con el proceso detallado de calibración y cálculo de incertidumbres y todos los detalles para el correcto desarrollo de las mismas, particularizando para cada uno de los grupos de calibración.

El procedimiento de calibración se crea generalmente para un tipo de instrumentación; si fuese necesario crear uno para un instrumento específico, se parte del procedimiento general, haciendo unas referencias específicas según necesidad del caso concreto que se estudia.

Para garantizar que el proceso de calibración se lleva a cabo de forma rigurosa, completa y sistemática, los procedimientos de calibración deben contemplar los siguientes contenidos:

1. Objeto y alcance

- Identificación equipo (general y específica)
- Codificación interna
- Procedimiento de referencia

2. Definiciones

- Configuración equipo (esquema)
- Generales metrológicas
- Específicas metrológicas

3. Abreviaturas y símbolos

- Identificación de parámetros y equipos en el documento

4. Documentos de referencia

- Identificación de documentos de aplicación
- Generales • GUM, EA 4/02, ...
- Específicos
- Normas de equipos, procedimientos de calibración,..

5. Desarrollo

- Generalidades
- Equipos y Materiales
- Operaciones iniciales
- Proceso de calibración
- Comprobaciones previas
- Calibración
- Toma y tratamiento de datos

6. Resultados

- Cálculo de incertidumbre
- Interpretación de resultados

7. Documentación asociada

- Documentos generados en el desarrollo del procedimiento
Anexo: Ejemplo numérico
- Aplicación a un caso práctico

4.4 Archivo de resultados

Es cualquier sistema que permita almacenar y tener fácilmente disponible toda la información proporcionada por la realización de las operaciones de calibración. Al incluir en un archivo la información sobre la última calibración realizada, debe retirarse la anterior y enviarla a otro archivo.

El estudio de los resultados de un equipo o instrumento permite obtener la siguiente información:

- Poder modificar los períodos de calibración
- Evaluar los errores y conocer la deriva, o el desgaste, de los equipos

La muestra un extracto de un archivo de resultados en el que se muestran los registros de calibración para cada punto calibrado así como los valores correspondientes a los patrones y a las variables de calibración determinadas [Figura 6].

| Marca | | | | | | | | | | | | Versión | |
|--|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|----|
| Modelo | | | | | | | | | | | | Técnico | |
| Nº Serie (codificación interna) | | | | | | | | | | | | | |
| Total ptos calibración I = | 11 | | | | | | | | | | | | |
| Nº medidas en cada punto J = | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Campo de medida C = _____ | División de escala: E (µm) = | | | | | | | | | | | 1 | |
| Ptos de calibración | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
| Valor nominal (mm) | 0 | 2,4 | 4,9 | 7,5 | 9,9 | 12,5 | 15 | 17,6 | 20,1 | 22,5 | 25 | | |
| Desviación del patrón al nominal: d _n (µm) | 0,00 | 0,13 | 0,15 | -0,06 | 0,03 | 0,10 | 0,24 | 0,19 | 0,13 | 0,07 | 0,07 | | |
| Incertidumbre típica del patrón: u _n (µm) | 0,00 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,13 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,13 | | |
| Desviación al nominal de las indicaciones del ME al medir los patrones: d _{ij} (µm) | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| | 1 | 4 | 3 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | | |
| | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | | |
| | 0 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | | |
| | -2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | | |
| | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | | |
| | -1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | | |
| | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | | |
| -1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | -1 | 1 | 2 | 1 | | | |
| Valor medio: \bar{d} (µm) | 0 | 2,6 | 2,4 | 1,3 | 1,6 | 1,6 | 1 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | | |
| Desviación típica: S _i (µm) | 1,05409255 | 0,84327404 | 0,51639778 | 0,67494856 | 0,51639778 | 0,51639778 | 0,66666667 | 1,0749677 | 0,42163702 | 0,73786479 | 0,51639778 | | |
| Corrección local: c _i (µm) | 0 | -2,47 | -2,25 | -1,36 | -1,57 | -1,5 | -0,76 | -0,41 | -0,67 | -0,83 | -0,53 | | |
| Incertidumbre típica de la corr. local: u(c _i) (µm) | 0,44095855 | 0,43552358 | 0,38220043 | 0,4079846 | 0,38663488 | 0,39008947 | 0,39449914 | 0,49812777 | 0,39331391 | 0,44280125 | 0,39532366 | | |
| Incertidumbre expan. de la corr. Local (k=2): U _i (µm) | 0,8819171 | 0,87104716 | 0,76440086 | 0,8159692 | 0,77326977 | 0,78017894 | 0,78899829 | 0,99625554 | 0,78662782 | 0,8856025 | 0,79064732 | | |

Figura 6. Extracto de archivo de resultados

4.5 Etiquetas de calibración

Es un adhesivo para colocar en cada elemento, una vez calibrado [Figura 7]. La información mínima que debe contener es la siguiente:

- Identificación del laboratorio que realizó la calibración
- Identificación del elemento
- Número de informe de medición
- Fecha de la próxima calibración

La etiqueta debe poder indicar que el equipo tiene una limitación de uso, porque no cumple con las especificaciones, pero puede ser utilizado con algún tipo de restricción, por ejemplo no se han calibrado algunos campos de medida y por lo tanto no debe utilizarse para efectuar medidas en esos campos. Para

informar al usuario de que el equipo tiene alguna limitación se debe cruzar la etiqueta por una raya roja, y la información completa se buscará en el certificado de calibración. Si el equipo está fuera de uso, se le puede poner una etiqueta que así lo indique, o en la etiqueta normal, se cruza por dos rayas, que siguen las diagonales.

| | |
|--|----------------------|
|  | |
| INSTRUMENTO: | CÓDIGO INTERNO: |
| Nº DE SERIE: | FECHA CALIBRACIÓN: |
| Nº DE INFORME: | PRÓXIMA CALIBRACIÓN: |

Figura 7. Etiqueta de calibración

5. Intercomparación

La confianza en las medidas realizadas por un laboratorio está basada en:

1. Certificado de sus patrones de referencia por un laboratorio de nivel superior
2. Plan de Calibración que determina las:
 - Correcciones
 - Incertidumbres

Ambas condiciones necesarias para asegurar la trazabilidad de las medidas no son suficientes para garantizar la compatibilidad de las mismas cuando son realizadas por diferentes laboratorios.

En una medición intervienen además de los equipos, que han podido ser calibrados por el mismo laboratorio de nivel superior y tienen por tanto la misma trazabilidad, otros componentes tales como el mesurando, el procedimiento de medición, los operadores y las condiciones ambientales, que son propios de cada centro o laboratorio y posiblemente distintas entre ellos. Por este motivo, para asegurar la trazabilidad y compatibilidad de los resultados obtenidos, es necesario participar en los denominados Ejercicios de Intercomparación.

La norma UNE EN ISO 17025 indica: “El laboratorio debe tener procedimientos de control de la calidad para realizar el seguimiento de la validez de los ensayos y las calibraciones llevados a cabo”. Esto incluye, como requisito imprescindible, la participación en programas de intercomparación.

La participación en ejercicios de intercomparación es una herramienta fundamental para demostrar la competencia técnica de los ensayos realizados en el laboratorio y permite:

- Comparar los resultados propios con los obtenidos por otros laboratorios
- Confirmar la correcta validación inicial de un método
- Utilizar los datos obtenidos de la participación en intercomparaciones para la validación de métodos de medida
- Determinar errores sistemáticos
- Mejorar el método de ensayo empleado
- Obtener información de los métodos empleados por otros laboratorios
- Realizar un seguimiento de la exactitud y precisión del método empleado
- Fomentar la colaboración entre laboratorios
- Demostrar la competencia técnica frente a terceros

En una intercomparación, además de los participantes, es necesario un laboratorio de nivel metrológico superior, Laboratorio Piloto, cuya relación de incertidumbres viene dada por:

$$\frac{U_j}{U_p} \geq 1$$

donde: U_j = incertidumbre del laboratorio participante

U_p = incertidumbre del laboratorio piloto

El laboratorio piloto establecerá un reglamento para el correcto desarrollo de la intercomparación . En él se detallará, entre otros: mensurando, Patrón Viajero, métodos que pueden emplearse, número de medidas, incertidumbre de los participantes, condiciones ambientales, criterios de aceptación, calendario, normas para el transporte y manipulación de los mensurandos, responsabilidades de los participantes etc.

El laboratorio piloto mide normalmente al principio y al final de la intercomparación, para confirmar que el patrón está dentro de sus especificaciones.

La evaluación de cada laboratorio participante se lleva a cabo mediante el denominado Coeficiente de Compatibilidad (C_j), cuya expresión es:

$$C_j = \frac{|x_j - x_p|}{\sqrt{U_j^2 + U_p^2}}$$

Se acepta que los resultados de las medidas de un laboratorio participante son compatibles cuando la diferencia en valor absoluto entre el valor del resultado dado por él y el valor convencionalmente verdadero correspondiente definido por el laboratorio piloto, es menor o igual que el valor resultante de la incertidumbre combinada de ambos laboratorios. Por tanto:

$C_j \leq 1$ Laboratorio compatible

$C_j > 1$ Laboratorio incompatible

En el caso de que el laboratorio participe con varios mensurandos, es posible determinar un coeficiente total para dicho laboratorio (media aritmética de los coeficientes obtenidos de forma individual para cada mensurando). De igual forma, puede expresarse un coeficiente global para el conjunto de la intercomparación.

6. Acreditación de laboratorios

La ley 21/1992 de Industria define la Acreditación como el reconocimiento formal de la competencia técnica de Reconocimiento formal de la competencia de un organismo evaluador de la conformidad para el desarrollo de la actividad solicitada.

Mediante la actuación de los organismos de evaluación de la conformidad se pretende demostrar que los productos y servicios puestos a disposición de la sociedad son conformes con ciertos requisitos relacionados generalmente con su Calidad y la Seguridad. Dichos requisitos pueden estar establecidos por ley y tener por tanto carácter reglamentario o estar especificados en normas, especificaciones u otros documentos de carácter voluntario. El valor de dichas actividades de evaluación depende en gran medida de la credibilidad de los organismos que las realizan y de la confianza que el mercado y la sociedad en general tenga en ellos. Dicha credibilidad se garantiza mediante la acreditación, la cual garantiza la competencia técnica y su subordinación a normas de carácter internacional.

La actual infraestructura de la calidad y seguridad industrial en nuestro país hace que las actuaciones de los agentes acreditados sean válidas a través de ENAC (Entidad Nacional de Acreditación), que a su vez es reconocida a nivel internacional estableciéndose lo que podría llamarse "trazabilidad de las actuaciones".

ENAC evalúa el cumplimiento de los requisitos establecidos en las siguientes Normas Internacionales o documentos reglamentarios para el funcionamiento de los distintos evaluadores de la conformidad:

- Laboratorios de Ensayo UNE-EN ISO/IEC 17025
- Laboratorios de Calibración UNE-EN ISO/IEC 17025
- Laboratorios Clínicos UNE-EN ISO 15189
- Biobancos ISO 20387
- Entidades de Inspección UNE-EN ISO/IEC 17020
- Entidades de Certificación de Productos UNE-EN ISO/IEC 17065
- Entidades de Certificación de Sistemas de Gestión UNE-EN ISO/IEC 17021-1
- Entidades de Certificación de Personas UNE-EN ISO/IEC 17024
- Verificadores Medioambientales Reglamento CE 1221/2009
- Verificadores de emisiones de gases de efecto invernadero UNE-EN ISO 14065 Proveedores de Programas de Intercomparación UNE-EN ISO/IEC 17043
- Productores de Materiales de Referencia ISO 17034
- Buenas prácticas de laboratorio Real Decreto 1369/2000

En lo que se refiere a los laboratorios de calibración, la necesidad de la acreditación queda reflejada en el "Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial" (R.D. 2200/1995, de 28

de diciembre, el cual especifica que los laboratorios deberán actuar con imparcialidad y llevar a cabo sus funciones con solvencia técnica, para lo cual deberán cumplir los siguientes requisitos:

- Ser acreditados por una entidad de acreditación (ENAC queda asignada como tal en este mismo R.D.), de forma que sus actuaciones sean reconocidas a nivel comunitario e internacional.
- Para ser acreditados los laboratorios de calibración industrial deberán cumplir la norma UNE EN ISO 17025 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”.
- Para ser acreditado, deberá disponer de patrones de medida, en las áreas que se deseen acreditar, que tengan trazabilidad, directa o indirecta, a los patrones nacionales de las unidades legales de medida o a patrones internacionales con reconocimiento nacional.

Los criterios de carácter general, de acuerdo con los cuales evaluará ENAC la competencia técnica de un laboratorio de calibración, son los contemplados, entre otros, en los documentos: PAC-ENAC: “Procedimiento de Acreditación”, CGA-ENAC-LC: “Criterios Generales para la acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración” (recoge lo establecido en la norma UNE EN ISO 17025), documento EA- 4 02 M 2013: “Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones” y la Guía ISO: “Expresión de las incertidumbres en las medidas”.

Para aquellos casos que lo requieran, los criterios generales podrán ser precisados o completados por otros técnicos complementarios, específicos para determinados tipos de calibraciones, y recogidos y publicados en los programas de acreditación u otros documentos ENAC.

7. Metrología legal

Como ya ha sido definida en temas anteriores, la Metrología Legal es el campo de la metrología que contempla las actividades por las que se establecen las exigencias legales sobre las medidas, unidades de medida, instrumentos de medida y métodos de medida.

El Control Metrológico del Estado se aplica a los equipos o sistemas de medida que puedan tener influencia sobre la transparencia de transacciones comerciales, la salud o la seguridad de consumidores y usuarios, así como sobre el medio ambiente.

En el ámbito territorial de la Comunidad Autónoma de Andalucía, las funciones de Control Metrológico las tiene asignadas, por Decreto 26/1992 de 25 de febrero, la empresa pública Verificaciones Industriales de Andalucía S. A. (VEIASA), que fue creada por Decreto 177/1989, de 25 de julio.

Una gran variedad de equipos y sistemas de medida están sometidos a este control: los utilizados en el control de suministros básicos (contadores de agua, de gas y de energía eléctrica), los surtidores de hidrocarburos, los instrumentos de pesaje, los taxímetros, los contadores de máquinas recreativas, los empleados en los controles relacionados con la seguridad vial (utilizados en las inspecciones técnicas de vehículos o los cinemómetros para el control de velocidad, el popular "radar"), los registradores de temperatura y termómetros utilizados en el transporte, almacenamiento y distribución de alimentos refrigerados, etc. [Figura].



Figura 8. Control Metrológico

El control metrológico abarca dos fases diferenciadas:

Comercialización y Puesta en servicio

En esta fase, el responsable de la conformidad del producto (normalmente el fabricante) elige el/los módulo/s aplicables de evaluación de la conformidad, y encarga a un Organismo Notificado o a un Organismo de Control Metrológico que evalúe la conformidad del instrumento de medida con los requisitos esenciales, metrológicos y técnicos aplicables. Aquí se incorporan los precintos que imposibilitan el acceso a determinadas partes del instrumento de medida para impedir su manipulación.

Instrumentos en servicio

Una vez que el instrumento está funcionando, es necesario verificarlo periódicamente o después de reparaciones o modificaciones, para comprobar que sigue midiendo adecuadamente y que sus errores en las medidas son inferiores a los errores máximos permitidos. Si el instrumento supera la verificación se le coloca una etiqueta de "conforme", en caso contrario se le coloca una etiqueta roja de inhabilitación para el servicio.

Por otro lado, mediante el Registro de Control metrológico se asegura que los organismos autorizados garanticen que los aparatos sometidos al control metrológico cumplan los requisitos esenciales, metrológicos y técnicos correspondientes a las normativas europeas o nacionales que les sean de aplicación. Deben inscribirse en este registro:

- Las personas físicas o jurídicas que fabriquen, importen, comercialicen, o cedan en arrendamiento instrumentos de medida sujetos al control metrológico.
- Los reparadores de instrumentos sujetos al control metrológico.

- Los organismos de verificación metrológica

En España actúan tres tipos de organismos evaluadores de la conformidad en el campo de la metrología legal, los cuales asumen la responsabilidad en ámbitos de interés público, debiendo responder por consiguiente ante las autoridades nacionales competentes:

A) Organismos Notificados. Son designados por los Estados Miembros de la Unión Europea y actúan como tercera parte en los procedimientos de evaluación de la conformidad establecidos en regulaciones europeas.

B) Organismos de Control Metrológico. Son designados por las Administraciones públicas españolas. Actúan como tercera parte en los procedimientos de evaluación de la conformidad establecidos en regulaciones nacionales.

C) Organismos Autorizados de Verificación Metrológica. Son designados por las Administraciones públicas españolas. Actúan como tercera parte en los controles metrológicos de verificación después de reparación o modificación y de verificación periódica.

Los dos primeros participan en la fase de comercialización y puesta en servicio de los equipos mientras que los terceros lo hacen en el caso de equipos ya comercializados o instrumentos en servicio.

8. Situación en España en el ámbito metrológico

Como ya se ha comentado anteriormente, a mediados del siglo XVIII se iniciaron en Europa los movimientos para armonizar las diferentes unidades de medidas utilizadas tanto en los procesos productivos como en las transacciones comerciales. El proceso culminó en 1875 con la firma del Tratado de la Convención del Metro que fue suscrito por 20 Estados, entre los que figuraba España, representada por el General Ibáñez, que llegó a ser el primer presidente del Comité Internacional de Pesas y Medidas, constituido como consecuencia del citado Tratado. Seguidamente la metrología en España entró en una larga etapa de inactividad de la que empezó a salir a principios de la pasada década y, debido a la incorporación a las instituciones comunitarias, el Gobierno asumió el compromiso de armonizar nuestra estructura y legislación a las existentes en los países de Europa Occidental.

El primer paso dado en esta dirección fue la constitución del Sistema de Calibración Industrial, en el año 1981, por parte del Ministerio de Industria y Energía, que durante muchos años ha proporcionado, con reducidos medios, trazabilidad a los distintos laboratorios y empresas que requerían calibrar sus equipos de medida.

El segundo avance lo constituyó la promulgación de la Ley 3/1985, de 18 de Marzo, de Metrología, en la que por primera vez en nuestro país se contemplaba la metrología en su aspecto global, ya que hasta ese momento todas las leyes de Pesas y Medidas se habían referido exclusivamente a unidades de medida, con alguna mención a ciertos aspectos de la metrología legal.

A partir de la aprobación de esta ley, y de una forma ininterrumpida, se fueron sentando las bases para integrarnos en todas las organizaciones metrológicas europeas. En ese mismo año se creó el Centro

Español de Metrología, CEM, que en primeros años se dedicó a la formación de técnicos, adquisición de equipamiento, implantación de procedimientos de trabajo similares a otros institutos europeos, etc.

El Centro Español de Metrología, como Organismo Autónomo de la Administración General del Estado, es la institución responsable de la obtención, desarrollo, conservación y diseminación de los patrones nacionales de medida, tal y como se establece en la Ley 31/1990, de 27 de Diciembre. Para cumplir con ello y ante la incapacidad de poder mantener la totalidad de los patrones nacionales, se está procediendo a reconocer a un número reducido de laboratorios como Laboratorios Asociados al Centro Español de Metrología y depositarios de un patrón nacional. Tales son el Real Instituto y Observatorio de la Armada y el Instituto de Física Aplicada (IFA), como depositarios de los patrones nacionales de Tiempo e Intensidad Luminosa, respectivamente. Con ellos se tienen definidos los patrones nacionales de las siete unidades básicas del Sistema Internacional, y en tal sentido, el gobierno aprobó el pasado año el Real Decreto 684/1994, de 15 de Abril, por el que se declaran los patrones nacionales de medida de estas unidades, se definen sus características y se determina el organismo depositario. Estos laboratorios tienen la obligación de participar en todas las comparaciones internacionales organizadas por el B.I.P.M. o en el seno de EUROMET, a fin de validar permanentemente su competencia y contribuir de igual manera a las nuevas definiciones de las unidades. Al objeto de garantizar la trazabilidad de los laboratorios de calibración situados en el nivel siguiente de la cadena, el CEM ha suscrito un Convenio con la Secretaría de Estado para colaborar estrechamente con ENAC (antiguo RELE) para dar soporte metrológico a sus actuaciones. Estos laboratorios de calibración, que deben ser acreditados por ENAC, están igualmente obligados a participar en las comparaciones nacionales o internacionales que se programen al efecto. Establecidos estos dos niveles básicos, podemos decir que todos los agentes económicos solicitantes de servicios metrológicos tienen asegurada sus necesidades en este campo, y por tanto no existirán problemas metrológicos para cumplir con la normativa aplicable en la implantación o reconocimiento del sistema de calidad [Figura 9].

Esquema de trazabilidad

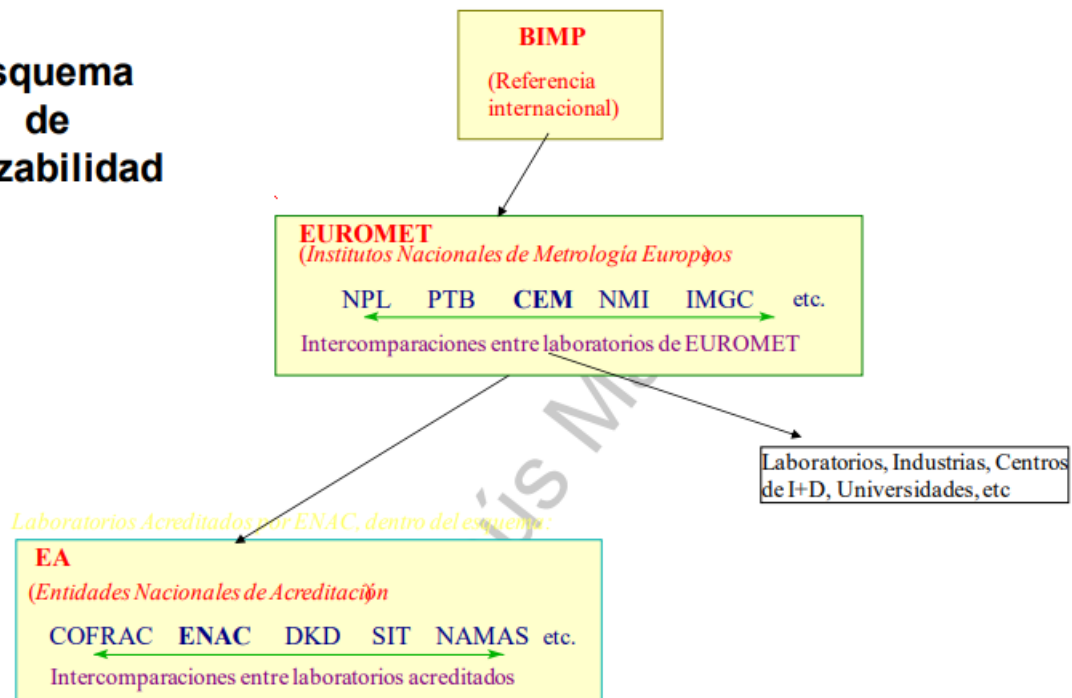


Figura 9. Esquema trazabilidad en España

5 Unit 9: VARIABILITY OF MEASUREMENTS

5.1 Uncertainty Concept

An operator who wants to determine the value of a magnitude may find it sufficient to take a measuring instrument, for example, a millesimal micrometer, and make a measurement which may give a value such as $L = 10,235$ mm, which would be valid on a certain number of occasions, although, as it can be observed, the indication of the measurand alone does not give a perfectly accurate result.

We can go a step further and think that since the scale of the device can read values with up to three decimal places, and as the last digit represents the micrometers, the value of the measurement can range from one higher number to one lower than that shown, that is, between 10,234 and 10,236. The uncertainty in the result can be represented as $L = 10,235 \pm 0,001$ mm. It is clear, however, that we are not sure that this range is sufficiently correct.

If a precision measurement is required, a term preceded by a \pm sign, known as the *uncertainty* of the measurement result, must be calculated and added to the result, which quantifies the precision, understood as a qualitative concept of the measurement.

In metrology, the result of the measurement of a magnitude M is expressed by the relation:

$$M = m \pm U$$

In which:

m is the most probable value of the magnitude M

U is the measurement uncertainty

This is intended to indicate that the true value of the measured magnitude lies inside the interval:

$$m - U < M < m + U$$

The uncertainty of a measurement can therefore be defined as:

"The parameter associated to the result of a measurement, characterising the dispersion of values that could reasonably be attributed to the measurand".

"The value of an interval, usually symmetrical, within which the true value of the measured magnitude is found with a high probability".

In the above definition it is implicit the randomness of the measurement uncertainty, suggesting that a statistical treatment of the uncertainty should be carried out to ensure that high probability to delimit the true value.

In fact, in metrology, the existence of true values is not really considered, but rather "conventionally true", or more probable values, since their exact value will never be known. The classical definition of absolute error as the difference between the measured value x_m and the true value x_R has therefore been abandoned.

$$\varepsilon = |X_m - X_R|$$

The term error has been replaced by uncertainty.

To determine the uncertainty of a measuring instrument, it is necessary to compare it with a gauge or higher precision instrument, with a known value and uncertainty, so the instrument to be calibrated works in its usual way. By making a series of measurements that provide indications of the instrument to be calibrated, in correspondence with the value(s) of the gauge, the possible discrepancy of the gauge is revealed, which allows to determine the correction to be applied to the indications of the calibrated instrument. It is also possible to assign a value to the uncertainty of the calibrated instrument, according to a well elaborated procedure, and in accordance with recommendations of international organisations.

This uncertainty, or semi-amplitude of the interval centred on the numerical value of the measurement, is calculated taking into account the international recommendations for this purpose, although subjective assessments linked to the experience and measurement conditions of a given operator and laboratory are included in this calculation. The calculation of this uncertainty involves a random part, with statistical treatment since a measurement is something that is carried out at a certain time, in some circumstances, and the value of this measurement varies from moment to moment, constituting the set of successive results thus obtained, a statistical sample from a random phenomenon, from which it is necessary to deduce population characteristics.

Likewise, it is also necessary to estimate the importance of other magnitudes and influencing factors on the measurement, and combine them in a certain way with the random influences, in order to extract a range containing the measured value, with the desired certainty.

According to the CIPM Recommendation 1, 1981, the uncertainty should be quantified and interpreted as a quantity equivalent to a standard deviation and should be allowed to be multiplied by an uncertainty factor k , normally between 1 and 3, which should be specified as part of the measurement result.

Result = Numerical value \pm uncertainty unit (uncertainty factor)

For example: 10,012 \pm 0,003 mm (k=2)

5.2 Uncertainty causes

The different nature of measurement errors is due to the fact that the causes of uncertainty differ in

nature. It is impossible to have an exact knowledge of all the causes of uncertainty, as these will depend on the particular conditions of the measurement, but it is useful to know the most important ones and to have an idea that allows the most common errors in any measurement process to be evaluated.

In the first topic, it was pointed out that there are some magnitudes that were called influence magnitudes and that were classified into four groups. Using this same classification, their study can be systematised into causes of uncertainties due to [Figure 1]:

- The operator or measurement procedure
- The measuring instrument
- The piece or magnitude to be measured
- The environmental conditions or corrections

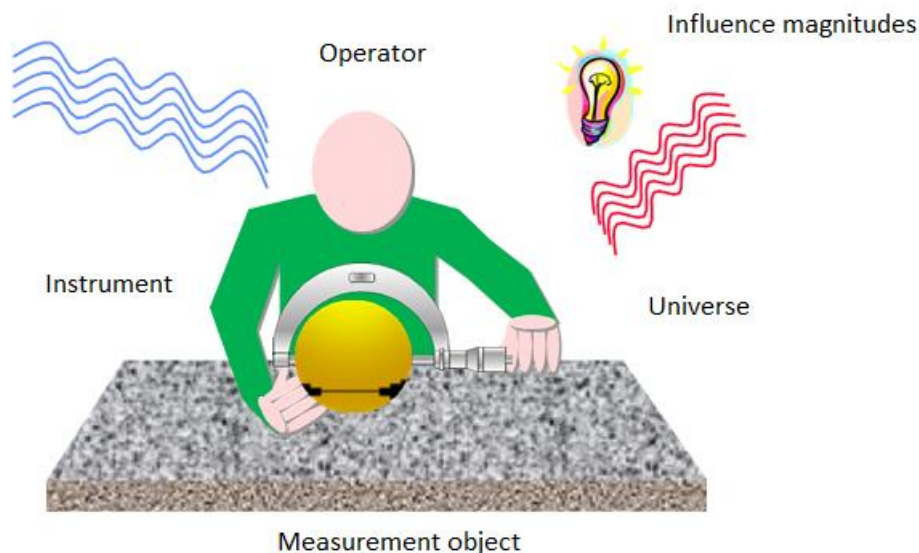


Figure 1. Uncertainty causes

5.2.1 Uncertainties due to the operator or measuring procedure

The operator influences the measurement results by the imperfection of his senses as well as by the degree of skill he/she possesses. The current trend in this technique is to eliminate the operator intervention as much as possible and to design appropriate measuring devices to avoid it.

The most common uncertainties introduced by the operator are:

5.2.1.1 *Readout and/or parallax*

In non-digital reading instruments, the data are obtained from a graduation. The readings of these scales result in appreciation errors, interpolation, coincidence, etc., which vary in a very complex way for each person [Figure 2]. If, in addition, the needle is separated from the scale, the parallax error can occur, which is carried out when the visual forms an angle with the normal. This error can be corrected by

placing the needle very close to the scale, and by placing a mirror on the scale. When the reading is done, it is enough to ensure that the moving needle coincides with its image on the mirror. This error can also be corrected by making the spaces between the strokes of the scale as large as possible.

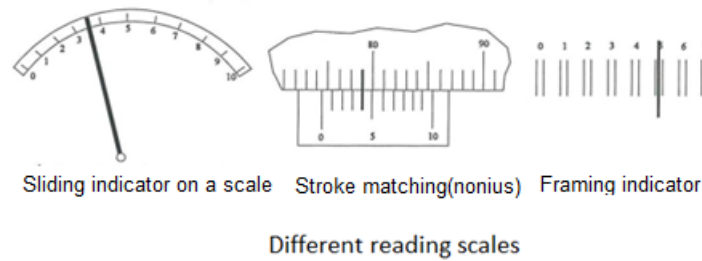


Figure 2. Reading errors

If present, the parallax error that is made when the visual forms an angle α with the normal, on a scale separated from the index by a 'd' distance, is [Figure 3]:

$$\epsilon_p = d \operatorname{tg}\alpha$$

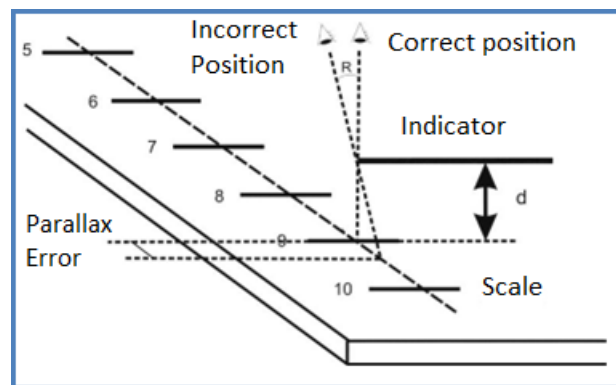


Figure 3. Parallax error

Finally, it should be noted that, as far as graduation is concerned, the smallest appreciable dimension for the normal human eye (separating power) is that within a visual angle of one minute, which for a minimum viewing distance, also in the normal eye, of 250 mm, gives an appreciable length of 0.05 mm.

In practice, in order to read properly on a scale, it is accepted 10 times more separation, that is, a minimum of 0.5 mm between every two consecutive strokes.

5.2.1.2 Bad positioning of the piece

They originate when the operator does not place the piece properly aligned with the measuring instrument, or on the contrary, in case of small hand-held devices that measure on large pieces. This is a typical error of comparators.

Another classic example of poor positioning consists of positioning the measuring scale inclined with respect to the actual direction of a piece.

In general, almost all positioning errors are reduced to this case of inclination between the scale and the direction of measurement, and are therefore a function of the cosine of the angle of inclination. These are also known as *cosine errors*.

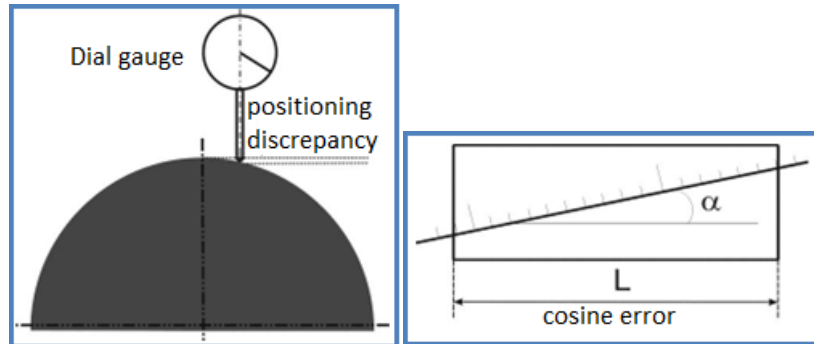


Figure 4. Positioning errors

$$\varepsilon = \frac{1}{\cos \alpha} - 1$$

In many cases, the angle is so small that the error is negligible, but it can be significant as the nominal length being measured increases and can become more complicated if the characteristics of the measuring instrument are also involved. For example, improper placement of a cylindrical instrument in an outside micrometer will result in an error of [Figure 5]:

$$\varepsilon = D - D_o = \frac{D_o}{\cos \alpha} + d \cdot \operatorname{tg} \alpha - D_o$$

$$\varepsilon = d \cdot \alpha + D_o \cdot \frac{\alpha^2}{2}$$

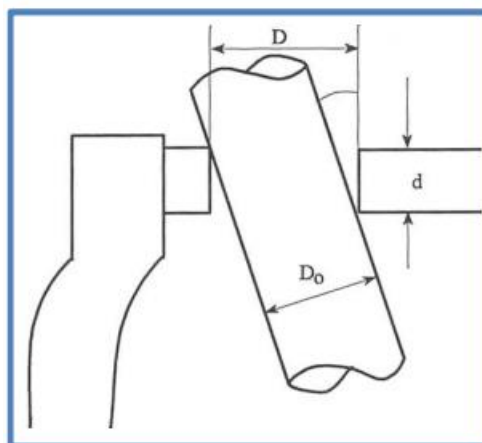


Figure 5. Cosine error

The need to avoid misalignment over long lengths led to the use of one of the most ingenious workshop gauges, the spherical end bar with a diameter equal to its nominal length. Obviously, in this element, any small misalignment does not modify the total length l. Moreover, if two of these bars are used in combination, a small difference in alignment between their axes does not produce a significant error either.

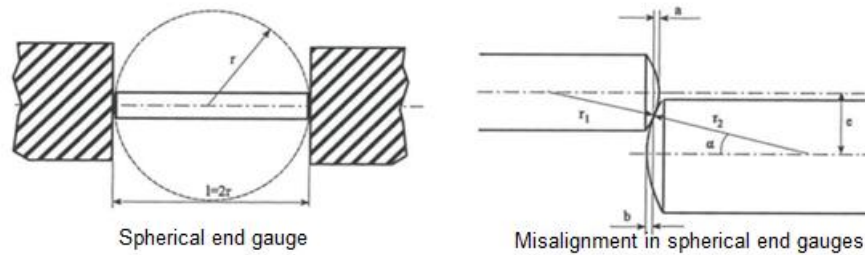


Figure 6. Spherical end patterns

5.2.1.3 Due to excessive pressure

They are caused by applying excessive pressure to the measuring device [Figure 7]. Nowadays, this source of error is corrected in almost all instruments, in which the maximum pressure to be applied is limited.

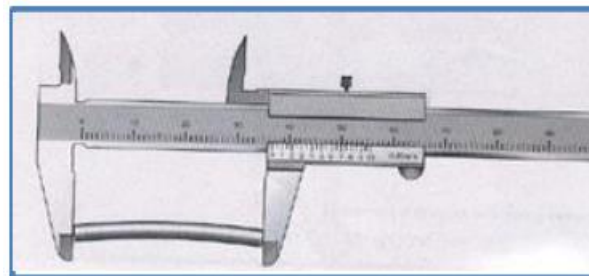


Figure 7. Excessive pressure

5.2.2 Uncertainties due to the measuring instrument

No matter how accurately an instrument is designed and manufactured, it will always have imperfections. These, and the imperfections it will acquire with use, are sources of error attributable to the instrument.

5.2.2.1 Due to design and manufacturing

These are defects of flatness, parallelism or concentricity in the probes that have to come into contact with the pieces, defects in the amplifying organs (cams, gears, shafts, etc.), defects in the engraving of the scales, and any other defects that the instrument comes with from the factory. In general, the uncertainties produced by an instrument in perfect condition must not exceed one tenth of its scale, which in the case of precision instruments such as an edge length measuring instrument, requires a position uncertainty certificate of each of its strokes on the reference gauge ruler.

5.2.2.2 Due to pressure and contact shape

They are due to the elastic deformations of the elements in contact under pressure. Generally, work is carried out at very low contact pressures (below 3 N) and with robust probes so that they are completely negligible.

When measurements are made by comparison, it is not necessary to take these crushing errors into account, provided the piece and the reference gauge are of the same material and have the same geometrical shape.

For a measurement to be properly made by contact between a probe and the surface of a certain piece, it is necessary that the shape of both surfaces is appropriate. In general, a spherical probe should be used to measure on flat surfaces, while a flat probe is suitable for measurements on cylinders and spheres [Figure 8, b].

5.2.2.3 Due to instrument wear

The use of measuring devices, as with all types of instruments, brings with it an ageing process that leads to more and more inaccuracies. Hence the need for periodical verifications to check whether it remains within its admissible specifications [Figure 8, a)].

In order to minimise these effects, the most wear-prone parts of the measuring instruments are made of high-strength materials. For example, hard chromium, chromium nickel, precious metals, tungsten carbide, etc.

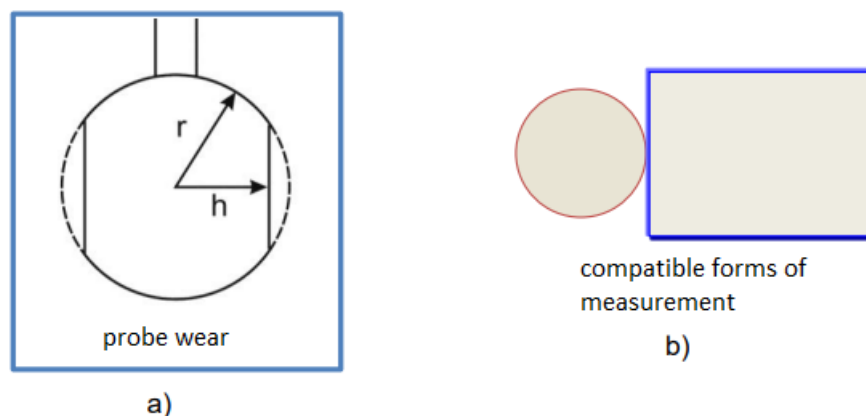


Figure 8. Instrument wear uncertainties

5.2.2.4 Due to alignment

They appear when comparing a piece with its gauge and are minimal when, for the comparative measurement, both the piece and the gauge occupy the same position. The error is due to the fact that, no matter how perfect the guides on which the reading element or sensor moves, there will always be a certain angle α of misalignment between two reading positions.

5.2.3 Uncertainties due to the piece or magnitude to be measured

When a certain dimension is measured, it is assumed that there is only one true value of that dimension, but actually this is never the case, and the dimensions are measured between imperfectly defined surfaces, which have different true values.

5.2.3.1 Due to the shape

Apart from the microgeometric condition, which must have a quality adequate to the accuracy of the dimensions, there may be macrogeometric distortions that prevent the correct measurement of the dimension [Figure 9, a)].

A typical case is the cylinder diameter measurement, where it is necessary to check its circularity. In general, it may be enough to compare the measurements according to different diameters carried out in different conditions to check if there is an out-of-roundness or other roundness defect, since different results will be obtained.

However, special cases may occur, such as the so-called "triangulation" of 3, 5, 7, or more vertex, in which the piece maintains its constant diameter in any direction despite its lack of circularity [Figure 9, b)].

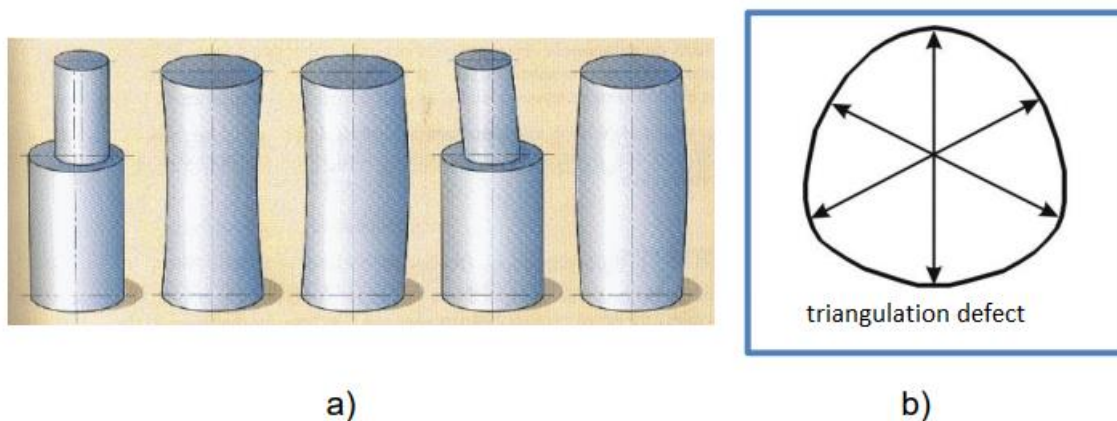


Figure 9. Shape defects of the pieces to be measured

5.2.3.2 Due to deformation

In the same way that the machine's probes are subject to elastic deformation due to contact pressure, the pieces, due to their own weight, may take inappropriate positions in the measurement. The measurement of a length on a rod or ruler supported at two points [Figure 10, table 1], and the contraction that a gauge block presents when measured in an interferometer are common examples of this phenomenon.

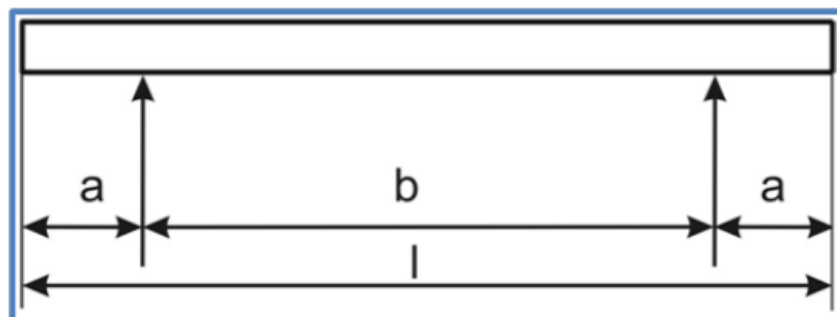


Figure 10. Measurement in horizontal position

Table 1. Support points positions

| Support points | a | b |
|---|-----------|-----------|
| Minimal variation of the neutral fibre length | 0,220 · l | 0,560 · l |
| Parallel faces (Airy points) | 0,211 · l | 0,578 · l |
| Minimum central arrow | 0,223 · l | 0,554 · l |

5.2.3.3 Due to stabilization or ageing

There is a little-known type of deformation that is due to structural modifications of the material, which can be called stabilization uncertainty. It arises from the fact that in the hardening of steels, the necessary rapid cooling does not allow the austenite phase to transform into the martensite phase which is stable at room temperature.

A certain percentage of residual austenite remains, which transforms into martensite very slowly, over the course of months or even years. As the martensitic structure is slightly larger than the austenitic structure, this transformation leads to stresses, which in turn produce a deformation that can be in the order of a few micrometres. The residual austenite can be greatly reduced by suitable heat treatment. In this sense, the steels used in the materialised measuring gauges, such as gauge blocks, calipers, etc., are subjected to ageing to ensure dimensional stability over time.

5.2.4 Uncertainties due to environmental conditions or corrections

They are those produced by external causes to the measurement process.

5.2.4.1 Due to temperature variation

The ambient temperature in which measuring instruments and pieces are located, is of essential importance in the field of dimensional metrology. This is due to the known phenomenon of the expansion of bodies because of temperature; most bodies, and especially metallic ones undergo a reversible expansion with increasing temperature. The increase in length of a body is approximately proportional to its length L and the temperature variation ΔT , through the linear expansion coefficient α :

$$L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$$

According to commonly accepted metrological rules, the dimensional numbers always refer to a 20°C (68°F) reference temperature, unless expressly stated otherwise.

This uncertainty factor is important and should be taken into account especially when measuring aluminum pieces, because of their higher expansion coefficient. It is also important not to measure a piece immediately after it comes out of the machine, as it can give a higher degree of uncertainty, due to its higher temperature, caused by the machining process.

5.2.4.2 *Due to other external actors*

They have minimal influence, although they must be controlled to prevent corrosion damage. The main ones are humidity, atmospheric pressure, dust and dirt in general. It also affects the refractive index of air, of importance in interferometry.

Vibrations can alter a measurement and are generally more dangerous if they have a higher amplitude and frequency. Lighting acts on the operator, and possible air currents cause heat transport and undesirable movements. Most of the external agents cannot be studied and are therefore reduced.

5.3 Other error causes

Since the uncertainty of measurement is of a random nature, as indicated above, the following items may not be considered as uncertainty of measurement components:

- Measuring instrument systematic deviations or drifts
- Instrument operator gross errors or faults

5.3.1 Systematic deviations from nominal or instrument drift

In many cases, when successive measurements are taken, a systematic discrepancy may be observed between the reading of the measured value on the instrument and the conventionally accepted one as valid, determined by comparison with a gauge. The cause is not due to chance but to a determined cause, known or not, which is usually originated by the instrument or even by the operator's tendency, and therefore does not allow for the proper statistical causes of uncertainty treatment.

Examples include instrument scale displacement, spindle pitch errors, setting errors, local defects in the instrument scale, etc.

Drift in the reading values of an instrument may be due to ageing of its constituent parts, metallurgical alterations, etc., and its evolution has to be taken into account over the equipment use history.

The detection and elimination as far as possible of these deviations is achieved by calibrating the instrument by measuring a gauge, that is, a piece or instrument whose value is more accurately known in advance. Thus, if when measuring a gauge of known value, the reading indicates a different value, the difference between the two will indicate the systematic deviation, which can be corrected either by an appropriate device on the instrument, for example, by varying the setting or zeroing position, or in the form of a correction to be introduced by tables or graphs.

Gauge value: $x_0 \pm U_0$

Gauge measurement value: $x_c \pm U_c$

Systematic deviation: $D_s = \Delta_{X_s} = X_0 - X_c$

However, this treatment of systematic deviations is not always practical, and it is often advisable to consider them as an additional component of uncertainty, even though conceptually they are not.

5.3.2 Gross errors or operator errors

When a measurement is repeated to increase its precision and decrease its uncertainty, gross errors or failures may be made that are not repeated. The fault or failure can be considered as a parasitic type of error, strongly subjective in origin, consisting of a major error in reading, calculation, positioning, etc. These failures, when they do occur, they are fortunately usually large in scope and are therefore immediately apparent.

In order to understand its meaning, it is worth noting the difference between uncertainty and gross error. An error is one that is made occasionally and is easily avoidable by a correct measurement performance.

Typical examples of faults are the reading of 257,426 mm instead of 251,426 mm on an optical reader, placing a probe on a surface other than the one to be measured, the calculation of the sine when the cosine was meant instead, the division in a calculation when a product was intended, confusing a diameter for a radius, making a mistake on the scale of the instrument, etc.

Sometimes it is not so obvious to distinguish between a failure and a contribution to uncertainty, for example an alignment error is, in general, a failure, but sometimes the shape or arrangement of the instrument and the piece does not ensure that the alignment error is not of a random nature due to the shape of the measurand and the instrument.

In order to be able to distinguish when a gross error has been made in a measurement and when this repeatability lack of the instrument is due to the uncertainty of measurement, rejection criteria have been developed to filter out measurements considered as failures. From the above mentioned, the Chauvenet Criterion is the best known and most widely used in metrology.

5.4 Statistical concepts

Consider that we want to determine the value of a certain magnitude, represented by X . The X value cannot be known exactly because, as seen above, there are a large number of causes of uncertainty that make it inaccessible therefore we will refer to it as the true value of the magnitude to be measured. In order to estimate it, an x value will be determined, which will be called the estimated X magnitude value and which will be the most probable value, obtained through q_k successive experimental measurements of the magnitude to be determined. These q_k are the individual values measured.

If n measurements are made, under repeatability conditions, the individual values $q_1, q_2 \dots q_k \dots q_n$ will be respectively obtained, which will be assumed to be independent.

As the \bar{x} estimated value of the X true value, the statistical estimator arithmetic mean shall be used, defined as:

$$\bar{q} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

being the limit:

$$X = \lim_{x \rightarrow \infty} \bar{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

In order to study the dispersion with which the n values of the series of measurements are presented, the experimental statistical estimator sampling variance will be used, defined as:

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

The fact that it appears in the $n-1$ denominator is due to the fact that of the n measurements, assumed independent, a relationship has already been used to determine the \bar{x} sample mean. Similarly, the non-determinable true value is the variance, defined as:

$$\sigma_x^2 = \lim_{x \rightarrow \infty} s_q^2 = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (q_k - X_i)^2$$

The sample variance square root is an estimator of the standard deviation of the q_k values ($k=1\dots n$), that is:

$$s_q(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{x}_i)^2}$$

To strengthen these concepts, the following example will be shown below. With a millesimal micrometer, a gauge block is measured, with a nominal value of 10 mm, a high number of times ($n=5000$). These measurement values vary between 10,055 and 10,065 and are distributed as indicated in the table [Table 2].

Table 2. Measurement records

| q_k (mm) | n_k | $q_k \cdot n_k$ | $(q_k - \bar{x})^2 \cdot n_k \cdot [10^{-4}]$ |
|------------|-------|-----------------|---|
| 10,055 | 1 | 10,055 | 0,249 |
| 10,056 | 17 | 170,952 | 2,710 |
| 10,057 | 135 | 1357,659 | 12,092 |
| 10,058 | 503 | 5059,174 | 19,975 |
| 10,059 | 1110 | 11165,490 | 10,941 |
| 10,060 | 1470 | 14788,200 | 0,000 |
| 10,061 | 1120 | 11268,320 | 11,362 |
| 10,062 | 490 | 4930,380 | 19,741 |
| 10,063 | 125 | 1257,875 | 11,304 |
| 10,064 | 26 | 261,664 | 4,175 |
| 10,065 | 3 | 30,195 | 0,752 |
| Σ | 5000 | 50299,964 | 93,301 |

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k = \frac{50299,964}{5000} = 10,05999 \text{ mm}$$

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{x}_i)^2 = = \frac{93,301 \cdot 10^{-4}}{4999} = 1,866 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$$

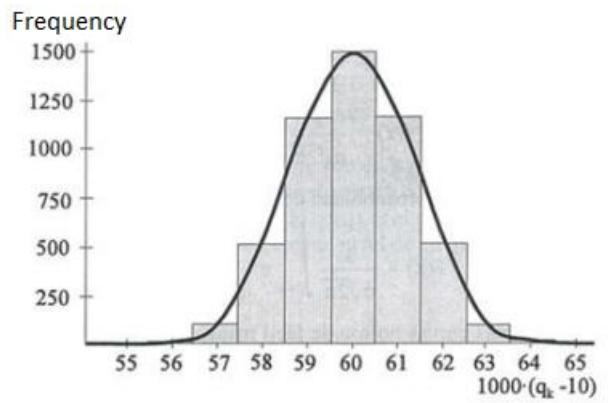
$$s_q(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{x}_i)^2} = = 1,3662 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Mean: 10,060

Standard deviation: 0,0014

In the limit, that is when the number of measurements tends to infinity, this curve tends to the Gaussian normal distribution law [Figure 11], which has the following properties:

Figure 11. Normal distribution



- It is symmetric about the μ (X) mean
- The curve is fully defined with the μ mean value and the σ standard deviation.

The probability function of the normal law is of the form (where x would be equivalent to the q measured variable):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

and the distribution function (probability of being between $-\infty$ and x):

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

Since these curves are not easy to use for calculation, tables are used in their $N(0,1)$ standardised form, by changing the variable:

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad dy = \frac{dx}{\sigma}$$

with what:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}}$$

$$F(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

The percentage of the curve area corresponding between the $(\mu-k\sigma)$ and $(\mu+k\sigma)$ abscissas, and therefore, the possibility of obtaining measurements in an interval around the mean are as follows:

| k | $\mu \pm k \sigma$ | 1 - α (%) |
|------|----------------------|------------------|
| 0,67 | $\mu \pm 0,67\sigma$ | 50,0 |
| 1,00 | $\mu \pm 1,00\sigma$ | 68,3 |
| 1,50 | $\mu \pm 1,50\sigma$ | 86,6 |
| 1,96 | $\mu \pm 1,96\sigma$ | 95,0 |
| 2,00 | $\mu \pm 2,00\sigma$ | 95,4 |
| 2,50 | $\mu \pm 2,50\sigma$ | 98,8 |
| 2,58 | $\mu \pm 2,58\sigma$ | 99,0 |
| 3,00 | $\mu \pm 3,00\sigma$ | 99,7 |

From the above, it can be agreed that the mean, or its estimator, is the most likely value of the measure; and the standard deviation, or its estimator, is related to the quality of the measurement, and therefore to its uncertainty.

When an m measurement is made with this instrument, it can be expressed as: $m \pm 2\sigma$, so that the μ mean will be in this interval with a 95.4% probability. Therefore, if it has been agreed that μ is the true value of the magnitude, 2σ is the uncertainty of the measurement with a 95.4% confidence level.

$$10,060 \pm 2 \cdot 0,0014 \text{ mm}$$

$$10,060 \pm 0,003 \text{ mm}$$

On the other hand, as indicated, the piece being measured was a gauge block with a nominal value of 10,000 mm when measuring under the same conditions and with a piece of nominal value around 10 mm, has a repeatability lack in the order of $\pm 0,003$ mm and a systematic deviation of $+0,060$ mm.

5.4.1 Central Limit Theorem

Many physical observations, and in particular measurement results, resemble the distribution of the Gaussian Normal law, however, for some cases where doubts exist, they can be reduced to this distribution by the application of the Central Limit Theorem, which states:

"If a population has a σ^2 variance and μ mean, the distribution of the sample mean of n independent measurements, tends to a normal distribution of μ mean and σ^2/n variance, as the sample size increases".

That is to say, if p series of independent measurements of the same magnitude are made, with n measurements each, and their means and variances are estimated, we obtain a new statistical population

of x_i estimated mean values [Table 3]:

Table 3. Measurement series

| | Measurements | Mean | Variance |
|--------|---------------------------------|-------|--------------|
| Series | $q_{11}, q_{21}, \dots, q_{n1}$ | x_1 | s_1^2 |
| | $q_{12}, q_{22}, \dots, q_{n2}$ | x_2 | s_2^2 |
| | | | |
| | $q_{1p}, q_{2p}, \dots, q_{np}$ | x_p | s_p^2 |
| | x_1, x_2, \dots, x_p | μ | σ^2/n |

The following consequences follow from this theorem:

- Every measurement process must have a finite mean and variance.
- If the sample mean and variance differ significantly for different samples from the same population, the measurement process is not well established.
- If a series of n measurements is taken and the mean is given as the result, the variance of the mean, and hence the square of the measurement uncertainty, is reduced by a $1/n$ factor.

The following two statistical estimators are therefore defined:

\bar{X} mean of the x_i ($i=1 \dots p$) estimated values:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^p x_i}{p} = \frac{\sum_{i=1}^p \frac{\sum_{k=1}^n q_{ki}}{n}}{p}$$

which is the means average of the individual measured values.

s_x^2 variance of the means of the estimated values

$$s_x^2 = \frac{s_q^2}{n}$$

where s_q^2 was defined as the variance of the individual measured values q_k ($k = 1 \dots n$), or sample variance. In the case where the n number of repetitions of the individual measurements is less than 10, the expression for the calculation of the s_q^2 variance gives an underestimated value of the uncertainty contribution. In this case, the value of s_q should either be estimated based on experience (for example, results of similar previous measurements) or multiplied by a higher coefficient called the Student's factor, depending on the number of measurements made, as shown in the table below [Table 4].

Table 4. Student's factor

| Measurement numbers | Multiplier factor | Measurement numbers | Multiplier factor |
|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 2 | 7,0 | 6 | 1,3 |
| 3 | 2,3 | 7 | 1,3 |
| 4 | 1,7 | 8 | 1,2 |
| 5 | 1,4 | 9 | 1,2 |

5.5 Rejection criteria

It has been mentioned above that it is desirable to use some kind of filter to be able to reject those gross errors or missing values, whose inclusion in the set of measured values would distort the calculation of the mean and variance or standard deviation. A decision shall be taken to accept or reject values that are presumed to be parasitic errors taking into account that this may influence the measurement final result, because if it is accepted that they are due to chance, and eliminated, it may erroneously improve the result, otherwise, accepting a fault will worsen the outcome.

The rejection criteria are intended to introduce a degree of objectivity into this decision to accept or reject a questionable measurement, by analysing the most outlying values in the set of repeated measurements. There are two groups of rejection criteria, depending on whether they are deterministic or probabilistic in nature.

The use of criteria from the first group is discouraged, as they have no scientific basis, although their simplicity has led to their use in certain applications. The rejection criterion of the maximum deviation value with respect to the mean, as well as the maximum deviation with respect to the median belong to this group.

The first could be stated as follows:

-If $n \leq 20$ reject one measurement $\frac{q_k}{d_k} = \max(d_i) = \max|x - q_i| \forall i=1..20$

-If $n > 20$ reject two measurements q_k, q_p such that $d_k = \max(d_i) = \max|x - q_i|$

$\forall i = 1 \dots n$ and $d_p = \max(d_i) = \max|x - q_i|$ $\forall i=1..n, i \neq k$

Whereas for the second, it would be sufficient to replace, for both cases, the x mean by the x^* median.

As for the probabilistic group, the following could be highlighted, in chronological order, the following:

- Chauvenet Criterion
- Wright and Hayford criterion

- Modified Chauvenet Criterion
- Huber criterion

The Chauvenet criterion was proposed by the American astronomer W. Chauvenet in 1863, admitting a normal distribution for the measurements. A confidence interval with a varying level of significance is established, depending on the number of measurements made, according to the law:

$$1 - \frac{1}{2n}$$

That is to say, all measurements whose probability of occurrence is less than $1/2n$, in which n is the number of measurements made, must be rejected. In practice, this means that, once the \bar{x} mean and the s standard deviation of a series of q_i ($i=1 \dots n$) measurements have been calculated, it must be rejected those whose deviation from the mean is:

$$|q_i - \bar{x}| > k(n) \cdot s_q$$

$$\{\bar{x} - k \cdot s_q ; \bar{x} + k \cdot s_q\}$$

where $k(n)$ is a coefficient that depends on the n number of measurements performed, and whose value is given in Table 5.

Table 5. Chauvenet coefficient

| n_c | $K(n)$ | n_c | $K(n)$ | n_c | $K(n)$ |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 2 | 1,15 | 11 | 2,00 | 20 | 2,24 |
| 3 | 1,38 | 12 | 2,04 | 25 | 2,33 |
| 4 | 1,54 | 13 | 2,07 | 30 | 2,40 |
| 5 | 1,65 | 14 | 2,10 | 40 | 2,48 |
| 6 | 1,73 | 15 | 2,13 | 50 | 2,57 |
| 7 | 1,80 | 16 | 2,15 | 100 | 2,81 |
| 8 | 1,86 | 17 | 2,18 | 300 | 3,14 |
| 9 | 1,92 | 18 | 2,20 | 500 | 3,29 |
| 10 | 1,96 | 19 | 2,22 | 1000 | 3,48 |

Once the measures that do not meet the Chauvenet criterion have been eliminated, with the remaining measures the mean and the standard deviation estimator are calculated and the criterion is applied again, repeating the process until all the measures meet the criterion:

$$|q_i - \bar{x}| = K(n) \cdot s_q$$

Consider the following example; 50 measurements have been made of a piece dimension, with the following result [Table 6]:

Table 6. Table of results

| q_i (mm) | n_k | $q_i \cdot n_k$ | $(q_i \cdot x)^2 \cdot n_k$ |
|------------|-------|-----------------|-----------------------------|
| 8,70 | 2 | 17,4 | 0,157 |
| 8,80 | 4 | 35,2 | 0,130 |
| 8,90 | 14 | 124,6 | 0,090 |
| 9,00 | 18 | 162,0 | 0,007 |
| 9,10 | 7 | 63,7 | 0,101 |
| 9,20 | 4 | 36,8 | 0,194 |
| 9,40 | 1 | 9,4 | 0,176 |
| Σ | 50 | 449,1 | 0,855 |

Mean: $x=8,98$ mm

Standard deviation: $sq=0,13$ mm

$K(50)=2,57$

$$|q_i - 8,982| > 2,57 \cdot 0,13 = 0,34 \text{ mm}$$

$$q_i = 8,98 \text{ mm} \pm 0,34 \text{ mm}$$

$$q_{i \text{ min}} = 9,321 = 9,30 \text{ mm}$$

$$q_{i \text{ max}} = 8,643 = 8,60 \text{ mm}$$

the second values are obtained by rounding to scale division.

According to these limit values, the value $9.40 > q_{\text{max}} = 9.30$ mm, which appeared only once, shall be rejected. No value is lower than the lower limit.

Repeating the process of calculating the mean and the standard deviation with the remaining 49 values, to apply the rejection criterion again, the following is achieved:

Mean: $x=8,97$ mm

Standard deviation: $sq=0,12$ mm

$K(49)=2,56$ (By interpolating)

$$|q_i - 8,982| > 2,57 \cdot 0,13 = 0,34 \text{ mm}$$

$$q_i = 8,98 \text{ mm} \pm 0,34 \text{ mm}$$

$$q_{i \text{ min}} = 9,321 = 9,30 \text{ mm}$$

$$q_{i \text{ max}} = 8,643 = 8,60 \text{ mm}$$

By checking that all values now lie within this interval, the calculated statistics are now acceptable

process estimators.

On the other hand, the modified Chauvenet criterion seeks to further limit the use of unrepresentative measurement sets. This modification consists of applying the following additional considerations:

1. At each stage of the Chauvenet criterion application, only a single value, the one furthest away, can be eliminated. Thus, if one considers the existence of p values, q_1, q_2, \dots, q_p which do not fulfil the criterion:

$$|q_j - x| = K(n) \cdot s_q \quad j = 1 \dots p$$

Only the checked value will be removed:

$$q_j = \max |q_j - x| \quad j = 1 \dots p$$

The rest of the values are retained for the calculation of the new statistics, with which the criterion will again be applied.

2. No more than two values can be eliminated in the overall process, which means that the maximum number of times the Chauvenet criterion can be applied is three. If in each of the first two applications two terms have been eliminated, in the third application all the values have to verify it, otherwise the whole set will be rejected, and it will be necessary to obtain a new set of measurements.
3. In order to be able to repeat the application of the criterion, the number of remaining measurements must not be less than ten which is reduced to the condition that there can be no less than ten values in the second application of the criterion, otherwise it would also be necessary to reject the entire set and re-determine a new set of measurements.

The flow chart reflects the summary of the Chauvenet criterion application, taking into account the three considerations above [Figure 12].

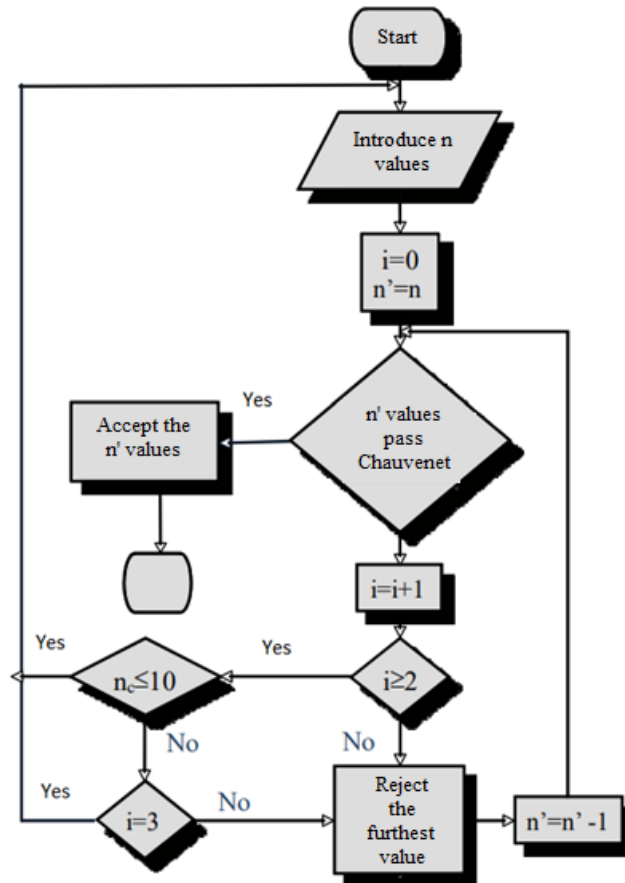


Figure 12. Chauvenet criterion application

The next criterion, also based on the normal law, was proposed by T.W. Wright in 1884, proposing an interval of predetermined amplitude, equal to the mean plus 3.37 times the sample standard deviation, thus limiting its use to large sample sizes. A modification that eliminates this requirement is the aforementioned Wright and Hayford's criterion, in which they reject values outside the following interval:

$$\{ x - k' s_q; x + k' s_q \}$$

where:

$$k' = 2,361 \text{ para } n \leq 20$$

$$k' = 2,698 \text{ para } n > 20$$

Bearing in mind that in metrology small sample sizes are frequently considered, the Chauvenet criterion previously considered can be made an additional modification, using the Student's t distribution, instead of the normal one. In this way, the modified Chauvenet criterion can be stated as one that rejects measures whose values do not fall within the interval characterized by an n-1 Student's t degrees of freedom and defined for a 1-1/2n confidence level:

$$\{ x - t s_q; x + t s_q \}$$

Finally, a brief reference to the Huber-Hogg-Barnett criterion is included, as one of those that propose the use of robust estimators, since they are less affected by parasitic errors than the sample mean and

standard deviation. In this criterion the x^* median is used as the central evolution estimator and as an estimator of the dispersion to the median corrected for deviations from the d^* median [SEBASTIÁN, M.A., 1984]:

$$d^* = \frac{\text{med } |x - x^*|}{0,6745}$$

The criterion rejects those measurements whose values do not fall within the following acceptance interval:

$$\{ x^* - k^* s_q^* ; x^* + k^* s_q^* \}$$

where:

$$k^* = 2,361 \text{ para } n \leq 20$$

$$k^* = 2,698 \text{ para } n > 20$$

5.6 Tolerance and measurement uncertainty

When designing a product that involves a certain responsibility, it is necessary to prescribe limits to the variation of its functional dimensions, appearing the concept of tolerance interval as the set of values, bounded above and below, within of which a magnitude must be found to be accepted as valid.

Since most metrological applications consist of checking whether a given value of a magnitude is inside or outside a certain confidence interval, it will be necessary to measure, and the decision taken will be wrong if the resulting measurement is not obtained with the required level of precision (uncertainty). Therefore, in order to accept that the value of the measurand is admissible, the uncertainty range must be contained within the tolerance range.

In order to avoid situations of partial overlap between these intervals, and thus doubtful situations, a safety criterion is often used, which consists of defining as a decision interval that corresponding to the effective tolerance, obtained as the difference between the tolerance and uncertainty [Figure 13]. If we call T the tolerance interval and $2u$ the uncertainty interval, in order to consider it admissible, the quotient of the two is limited to the following values:

$$3 \leq \frac{T}{2U} \leq 10$$

Rooting the choice of these values in the search for a compromise between the cost of measurement and the cost of rejection.

This poses a deterministically obtained tolerance/uncertainty relationship, so that other authors, aware that this choice must be justified statistically, have developed alternative methodologies that allow

obtaining the maximum value of the uncertainty of a measurement method, in line with maintaining the effectiveness of the Quality Control of the manufacturing process, which would allow to know the possibilities of each instrument in the Quality Control environment.

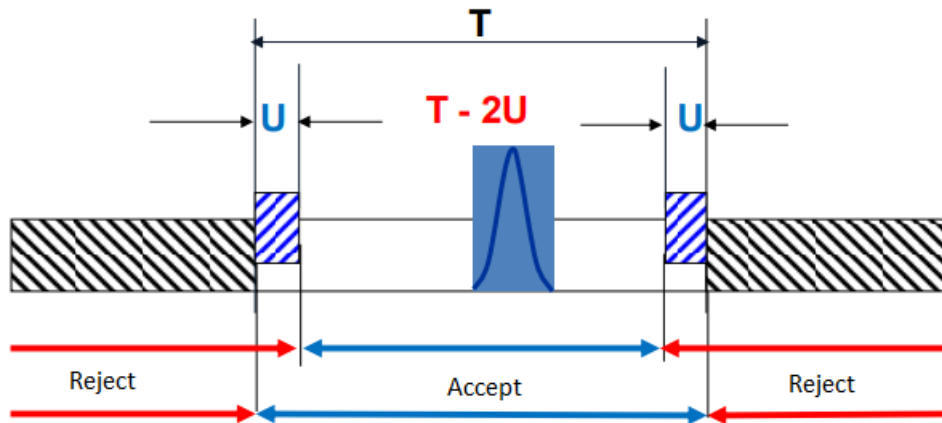


Figure 13. Effective tolerance

6 Unit 10: UNCERTAINTY CALCULATION

6.1 Introduction

As previously seen, when a measurement is made, the instrument indications obtained from successive measurand measurements are subject to unavoidable variability, due to the random nature of the measured magnitude, even when such measurements are carried out under the same reference conditions (repeatability conditions: same operator, procedure, equipment, environmental conditions, and at short time intervals).

6.1.1 Calibration correction

If the reference conditions cannot be maintained when making measurements, it will be necessary to apply corrections to the indicated values (raw values); So, the result of the measurement will correspond to that which would have been obtained with the magnitude values under such reference conditions.

However, when talking about maintaining reference conditions, the significant magnitude mean values are being identified but the variability defined by the intervals established for them are not, since this would entail the need to introduce exactly all the necessary corrections, which would not be feasible, neither technically nor economically.

For example, in the case of influence magnitudes, if the mean temperature of a measurand is 23 °C and the variability interval defined for it is 23 °C ± 2 °C even if we apply a measurement correction, due to the fact that the influence magnitude is at 23 °C when the reference value should be at 20 °C, there will still be a temperature dispersion that will determine an uncertainty. Even if the correction to be applied due to an influence magnitude were null, which normally occurs, its uncertainty is not, since there is a standard deviation associated with the variation of such influence magnitude. The latter would correspond to the case of a measurand that has been maintained in a 20 °C ± 2 °C interval; In this situation, the correction is null since the temperature average value is maintained at the reference values but there is an uncertainty due to its variation.

In addition to the corrections due to the influence magnitudes, the traceability requirement imposes the use of calibrated instruments, which determines the incorporation of the so-called calibration correction, c_c (Δx_c), which in the simplest case, is obtained from the following expression:

$$x_0 = x_c + \Delta x_c$$

In which x_0 is the estimated value of the gauge and x_c is the mean of the measuring instrument indications when the gauge is the input. The expression for the calibration correction expression results:

$$c_c(\Delta x_c) = x_0 - x_c$$

It is necessary to observe that the calibration correction has a variance associated to the imperfection of the gauge (identified through the uncertainty of the gauge in the calibration certificate), as well as the dispersion of the indications involved in the gauge measurement.

For this reason, it is not possible to obtain exact values when a measurement is carried out, since there

are residual corrections that come from the influence magnitudes instability or from the gauge inaccuracy and measurement equipment. The residual correction is unknown, but it is possible to delimit it, which leads us to define uncertainty as an upper bound of the residual correction.

Likewise, when it is decided to interrupt the successive correction application, the obtained value is usually called the conventionally true value, that is, the best value that can be obtained with the available means.

6.2 Documents on calculation of uncertainty

Initially, there was no widely applicable criterion for the calculation of uncertainty, this made it difficult to compare results obtained with similar methods and instruments when performed by different observers. For this reason, the International Committee of Weights and Measures (CIPM) set up a working group to analyse the results of a survey previously conducted by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) and in which National Laboratories and Qualified Metrology Bodies from different countries had participated. The conclusions formed the INC-1 recommendation (1980) on "*Experimental Uncertainty Expression*", which was approved by the International Committee of Weights and Measures (CIPM) in 1981 and ratified in 1986. This recommendation was the basis on which ISO (International Organization for Standardization) later developed the document that contained the necessary guidelines for the uncertainty expression, providing the basis for international comparison of measurement results. Such document is the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) [Figure 1].

The first CIPM recommendation highlighted the unique nature of any type of error, despite the fact that for a long time it was common to use two types of errors: systematic and random error. An analysis of their definitions leads us to think that this division does not make much sense. Indeed, the systematic error is usually defined as the one that remains constant when measuring a magnitude under the same conditions, and that varies when the conditions change. Regarding this definition, it must be said that it establishes an error component that can never be determined, since it is not possible to measure under the same conditions. On the other hand, it has been observed that certain errors, considered as systematic, have become random as measurement techniques have improved. In addition, measurement conditions can vary randomly, so that with enough time, all uncertainty sources could always be considered as random.

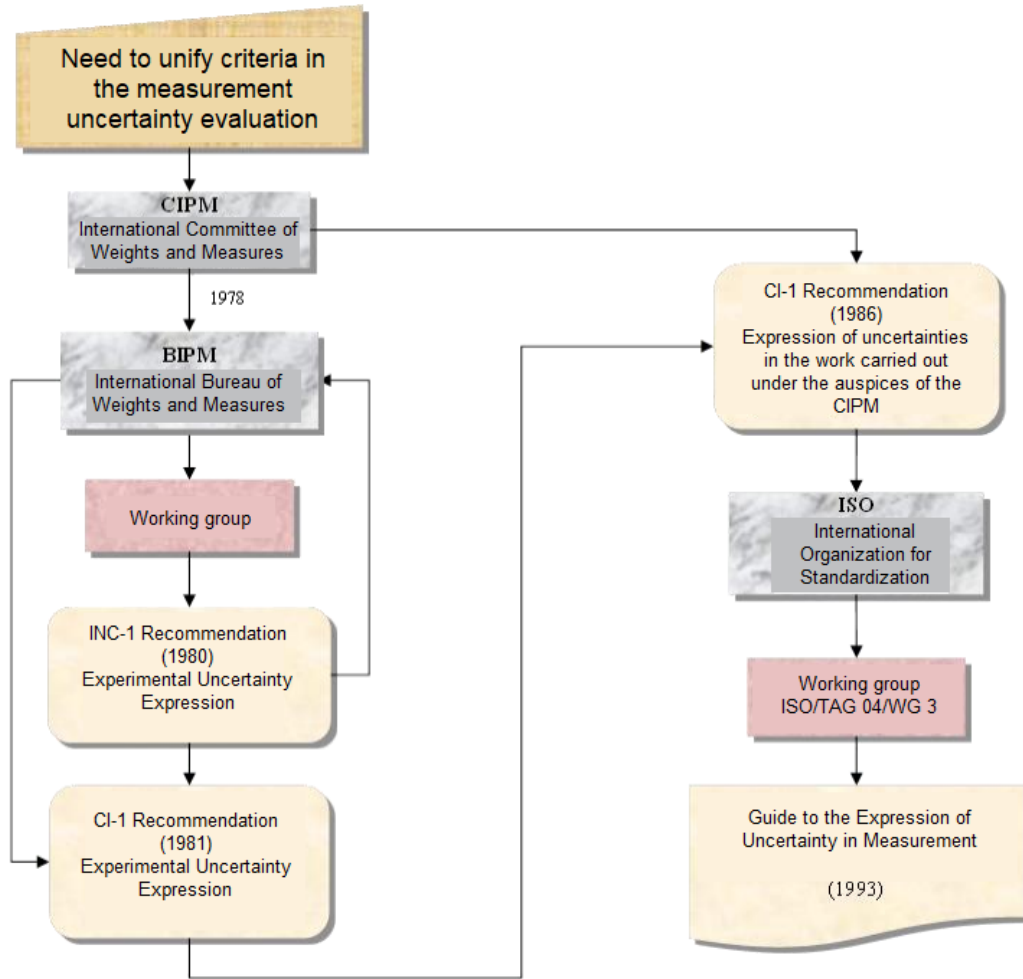


Figure 1. GUM evolution

The fundamental aspects included in the respective texts are summarized in the following principles:

- Depending on the method used for its numerical determination, the measurement uncertainty components can be grouped into two categories:

A Type: those that are evaluated through statistical analysis on observation series.

B Type: those that are evaluated by other methods.

- Both types of components must be quantified by means of variances or equivalent quantities, and dependency situations must be characterized, where appropriate, by the corresponding covariances.
- The uncertainty thus determined can be multiplied by a factor greater than the unit, in order to obtain a greater total uncertainty, but provided that the value of such factor is always indicated.

It should be noted that, according to this classification, all uncertainty components are considered to be of the same nature, even if they come from different sources (estimated, previously known, calculated by statistical procedures, etc.).

Prior to the publication of the GUM, in the European environment and for the calibration field, the Western European Calibration Cooperation (WECC), a body for collaboration and mutual recognition between calibration services in Western Europe, produced the document WECC 19-1990, "*Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*" [WECC, 1990], which already included some of the ideas that would appear in this Guide. However, while the GUM established general rules for the evaluation and measurement uncertainty expression that can be applied in most fields of physical measurements, the WECC document focused on the most appropriate method for measurements performed by calibration laboratories and for the uncertainty expression in calibration certificates. In Spain, these recommendations were collected by the Red Española de Laboratorios de Ensayo (RELE) in the document G-RELE-02 (1995) [RELE, 1995].

In 1994, the European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL) was formed through the union of WECC and WELAC (Western European Laboratory Accreditation Cooperation), bringing together 17 European national accreditation bodies. The WECC document was revised in 1997, preparing the EAL-R2 [EA, 1997], which replaced the one with the same title. The aim of this document was to harmonize the assessment of the measurement uncertainty within the EAL, providing a unified uncertainty in the calibration certificates issued by accredited laboratories, as well as helping accreditation bodies to consistently assign Calibration and Measurement Capability (CMC) of the laboratories accredited by them (then called Optimum Measurement Capacity). The content of this document respected the recommendations established in the ISO Guide, although concentrating the methodology on calibration laboratories, and including a series of comments on the CMC (minor uncertainty than a laboratory can achieve within its calibration scope).

Finally, following the merger in 1997 of the EAL and the EAC (European Accreditation of Certification), the European Cooperation for Accreditation (EA) was created, through which the so-called Multilateral Agreements (MLA) have been established, through which accreditation bodies from different countries recognize each other through cross audits (Peer Reviews) and, therefore, recognize the entities accredited by each of them in a similar structure to that of the intercomparisons of national laboratories, to allow traceability. Currently, the document EA-4/02 M: 2013 "Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration" is the one that includes the requirements for the evaluation of uncertainty of measurement in calibration within EA.

In Spain, the equivalent document, edited by ENAC, was CEA-ENAC-LC/02 [1998]: "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration" [Figure 2], but currently it is directly the EA reference.

Basically, this document summarizes the fundamental concepts of the ISO guide, introduces some simplifications and establishes that accredited bodies must issue their calibration certificates with an expanded uncertainty interval that corresponds to a 95% coverage probability or confidence level, which supposes, in most cases, a $k=2$ coverage factor, by satisfying the conditions that the central limit theorem requires to ensure that the final resulting distribution is practically normal.

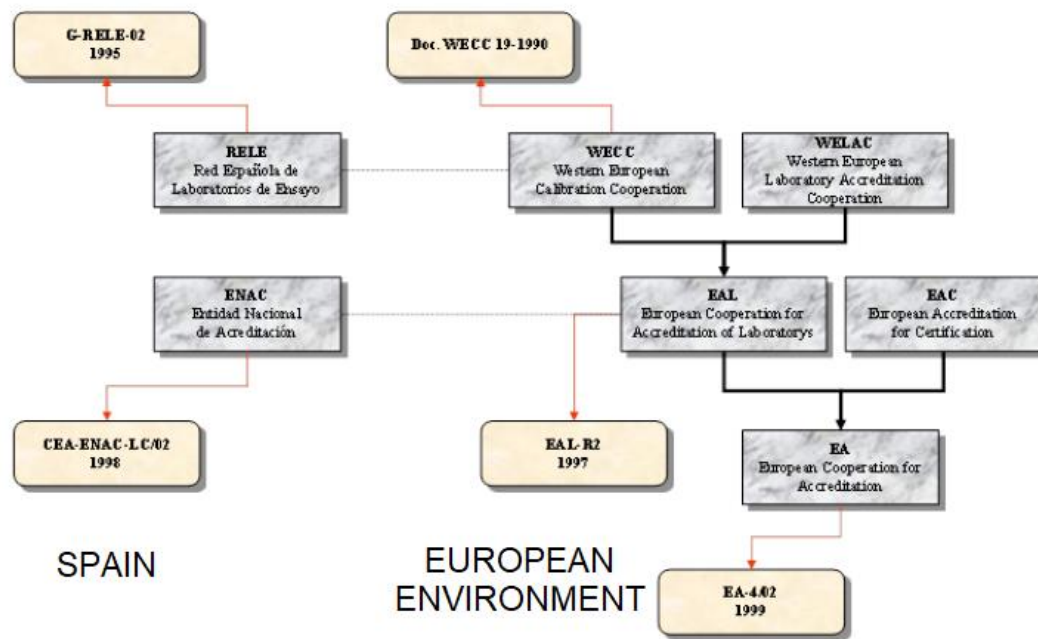


Figure 2. EA-4/02 evolution

However, the uncertainty concept application has not only been restricted within the metrological field (whether in measurement, calibration or laboratory intercomparison), but has transcended to a superior and globalizing structure, characterized by systems of quality management.

Thus, for example, the ISO 9000:2015 [UNE-EN ISO 9000:2015] standard includes a term identification related to quality assurance in measurement processes, in which the metrological confirmation concept (set of operations necessary to ensure that a measuring equipment meets the requirements established for their intended use, including calibration or verification, necessary adjustments or repairs, comparison with metrological requirements - range, resolution, maximum permissible errors - as well as sealing and labeling). This standard provides a graphic representation of the relationship between these concepts, which can be summarized in the following figure [Figure 3].

For its part, the ISO 9001:2015 [UNE-EN ISO 9001:2015] and ISO 9004:2018 [UNEEN ISO 9004:2018] standards include different references on the measuring device control that ensure product conformity with the established requirements. Finally, the ISO 10012:2003 [UNE EN-ISO 10012:2003] standard specifically contemplates measurement management systems, establishing the requirements for measurement processes and equipment.

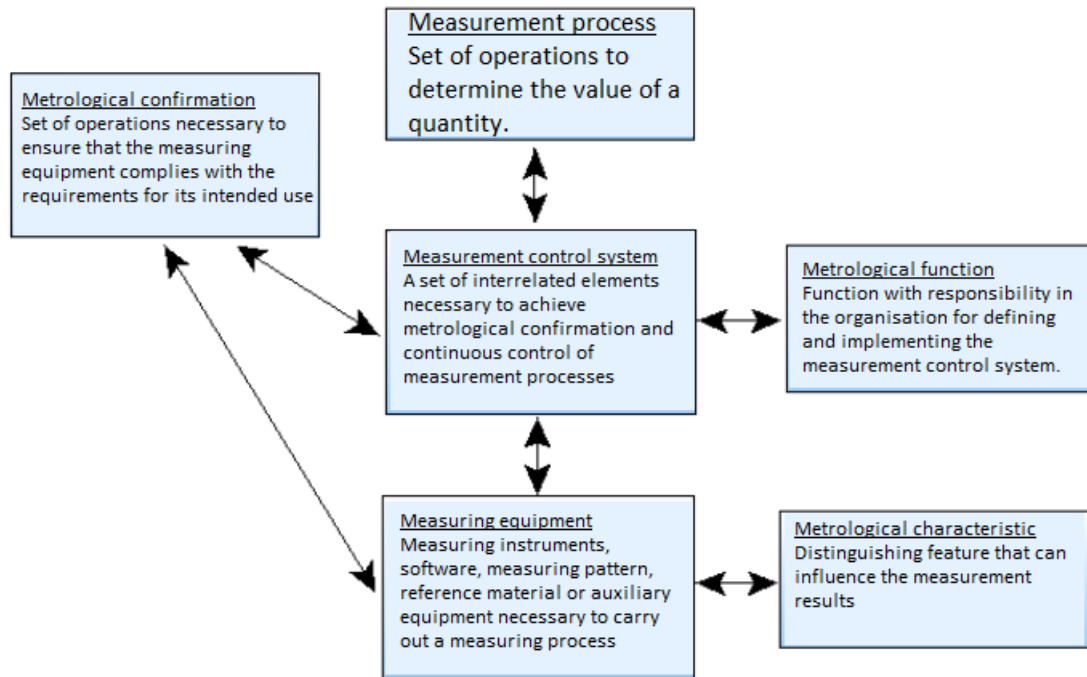


Figure 3. Concepts related to quality management in measurement processes

The current situation of uncertainty, therefore, can be summarized in the existence of a series of organizations at the national and international level, which make it possible to ensure both the measurement traceability (through the intercomparisons of the highest level laboratories), such as the laboratories accreditation and, therefore, the characterization of their calibration by carrying out cross audits. This has made it possible to generate a metrological and quality assurance structure in line with the application of international standards, through the increasing interrelation of the different bodies, as well as the elaboration of an internationally accepted Guide, which establishes the criteria and steps to determine the measurement uncertainty and the confidence level of the interval, defined through the expanded uncertainty which, in contrast to the traditional conception, is associated to the range of values within which the measurand true value is found, being centred on the measurement result and not on unknown magnitudes.

The following sections will show the process proposed by the GUM.

6.3 Variance propagation Law

In metrology, one of the classification criteria for measurement methods is that which divides them into direct or indirect measurement methods. In the first case, the instrument is applied on the measurand and the magnitude value is obtained directly in the indicating device. Such value is a measurand representative value, regardless of the need to apply corrections.

In the indirect measurement method, the magnitude to be measured (output magnitude) comes from a functional relationship between other magnitudes (input magnitudes), measured or materialized. Actually, any measurement can be considered indirect if the applied corrections are explicitly expressed, since there must always be at least the calibration correction (section 1.1).

$$x' = x + c_c$$

Consider the Y variable, defined as the output magnitude true value, which is a function of a N set of Xi input magnitudes ($i = 1 \dots N$).

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

The input magnitudes include both those from the gauge calibration certificates used, as well as those of the measurement process and the influence magnitudes.

As the Xi magnitudes true values are not known, for the calculations the xi estimated values are used as input data for the total uncertainty evaluation of the measurement result, thus appearing the measurement estimator as:

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

6.3.1.1 Independent input variables

When the x_i input variables are independent, the y result variance is estimated by the Variance Propagation Law, whose expression is:

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

The partial derivatives $\frac{\delta f}{\delta x_i}$ are called sensitivity coefficients, c_i , and they identify the degree to which the y output variable is affected as a function of changes in the x_1, x_2, \dots, x_N input estimates.

Designating the products of such coefficient by the corresponding standard deviation by:

$$u(y) = c_i \cdot u(x_i)$$

The variance propagation law is expressed according to the form used in the EA document, that is:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

6.3.1.2 Correlated input magnitudes

For the case in which it is known that the input magnitudes are correlated with each other -not independent-, the statistic covariance will have to be considered, which will be estimated from the estimators of its standard uncertainties and its correlation coefficient, r. Indeed, if it is known that two X_i, X_j input magnitudes, are correlated with each other (they depend on each other, to a certain degree), the estimated covariance is:

$$u(x_i, x_j) = u(x_i)u(x_j)r(x_i)(x_j) \quad (i \neq j)$$

The absolute value of the correlation coefficient is always less than or equal to 1, resulting in zero between independent variables; but it can be positive or negative, so the contribution of the covariance terms in the variance propagation law intervenes with a sign, adding or subtracting, unlike the variance

terms which are always positive. The correlation degree determination of the influence magnitudes is based on experience.

Therefore, once again considering the $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ function, when there is a correlation between the input variables, the output variance is estimated using the variance propagation law and covariances, being expressed by:

$$u^2 (y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right]^2 u^2 (x_i) + \sum_{i,j=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right] \left[\frac{\delta f}{\delta x_j} \right] u_{x_{ij}}$$

Or, considering the c_i sensitivity coefficients:

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

6.4 Measurement uncertainty evaluation process

The following figure identifies the diagram corresponding to the set of stages that must be completed in the development of the measurement uncertainty calculation process [Figure 4].

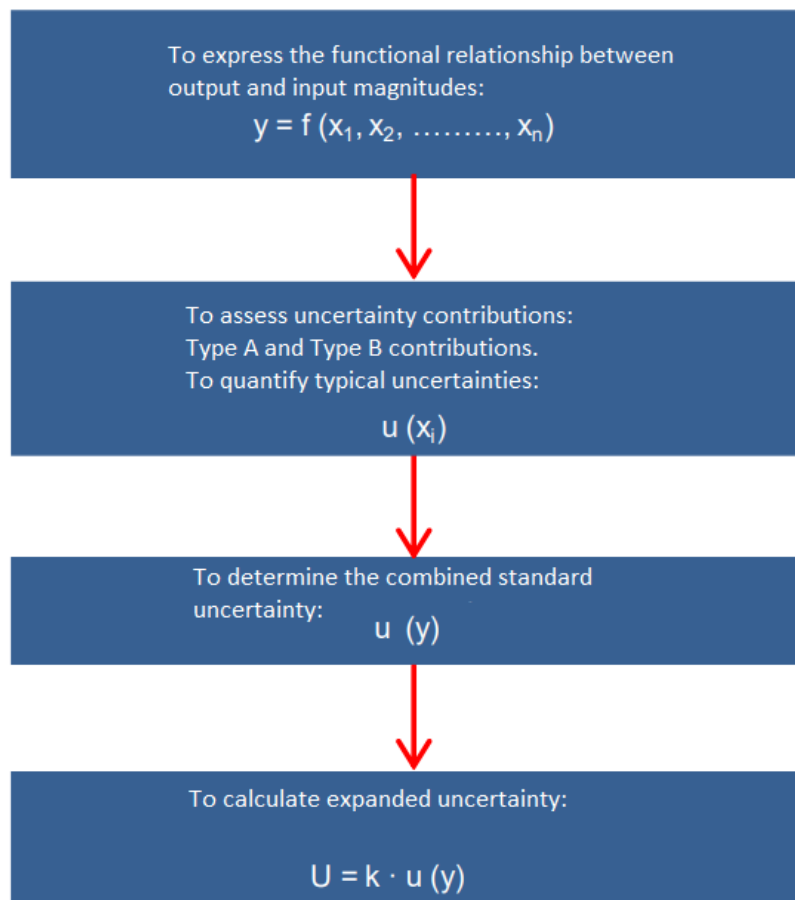


Figure 4. U Evaluation Process

6.4.1 Measurement modeling

The first stage of the uncertainty calculation process is to describe the measurement process through a mathematical model that relates the measurand to the different magnitudes which are involved in this process.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$$

This f model function represents the measurement procedure and the evaluation method, describing how the Y values are obtained from the Xi magnitude values. Such function can be a single simple analytical expression or refer to a complex function, or even be determined experimentally.

The f function must be interpreted as the one that contains all the magnitudes likely to contribute significantly to the measurement uncertainty result, including all the corrections. Therefore, this function must model the measurement in such a way that the required accuracy of the measurement result is ensured, otherwise additional input magnitudes will have to be introduced.

An estimate of the Y measurand, the output estimate expressed by y, is obtained from equation (1), using the xi input estimates:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$$

Each xi can represent measured magnitudes, systematic error corrections, etc.; in turn, each xi value is associated to a u(xi) standard uncertainty that will contribute to the U measurement uncertainty.

6.4.2 Uncertainty contribution assessment

At this stage it is necessary to quantify the standard uncertainty, that is, the uncertainty corresponding to a standard deviation (k=1) for each of the components identified in the measurement process modeling.

As previously indicated, INC-1 Recommendation, the Xi magnitudes can be classified according to how their value and uncertainty have been obtained (Type A or B, according to INC-1 Recommendation):

- Magnitudes whose value and uncertainty are obtained directly in the measurement.
- Magnitudes whose value and uncertainty come from external sources (gauges, reference data, ...)

Such classification does not imply in any case a difference in the nature of such components; both are based on probability distributions and are quantified by variances or standard deviations, regardless of the type of evaluation applied.

However, this classification of the uncertainty sources into two types is arbitrary, since the same

uncertainty component can sometimes be evaluated by statistical methods (and therefore considered as A type) and sometimes be estimated or evaluated by other methods (and therefore considered as B type), although in all cases its random origin is accepted. To demonstrate that this does not present any difficulty, the following example is given.

A certain gauge is taken for calibration to a reference laboratory, which issues a calibration certificate indicating the gauge uncertainty. This uncertainty, which has been calculated in the reference laboratory by statistical methods, is an A type. However, when this gauge is used by another laboratory to calibrate its instruments, the gauge uncertainty shall not be calculated, as it is a data extracted from the calibration certificate, and therefore it shall be considered to be a B type.

6.4.2.1 A Type evaluation

The A type evaluation of the standard uncertainty (uncertainty associated to the magnitude under consideration, is used when an independent observation series of the input magnitude have been made under repeatability conditions, that is, under the same measurement conditions, and, if made with sufficient resolution, a dispersion of the values obtained can be observed. If X_i is the input variable, measured repeatedly, the x_i estimated value can be determined as the arithmetic mean of all observed values q_k ($k=1\dots n$):

$$\bar{q} = x_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

The q_k individual observation values differ due to random variables of influence magnitudes or other random effects. The experimental variance of the observations, which estimates the σ^2 probability distribution variance of q , is given by:

$$S^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - x_i)^2$$

Being $S^2(q_k)$ known as statistically estimated variance.

This variance estimate and its square root, $S(q_k)$, called the experimental standard deviation, characterize the variability of the q_k observed values, or more specifically, their spread around their \bar{q} mean.

Being the experimental standard deviation:

$$S_q(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - x_i)^2}$$

Likewise, applying the Central Limit Theorem, the best variance estimate of the arithmetic mean is the experimental one, which is given by:

$$S^2(x_i) = \frac{S^2(q_k)}{n}$$

$$s(x_i) = \frac{S(q_k)}{\sqrt{n}}$$

Therefore, the standard uncertainty associated to the input variable is the experimental standard deviation:

$$u(x_i) = S(x_i)$$

6.4.2.2 B Type evaluation

The B Type evaluation of the $u(x_i)$ standard uncertainty, or the $u^2(x_i)$ estimated variance, associated to the x estimate of the X_i input magnitude, is made from the previous information related to its variability, which may include:

- Results of previous measures
- Experience or general knowledge of the material behaviour and properties and instruments used.
- Manufacturer's specifications
- Data supplied by calibration certificates or other certificates
- Uncertainty assigned to reference values from books or manuals
- Known variations of influence magnitudes

The B Type assessment is based on experience and general knowledge and can be as reliable as an A Type assessment, especially when it comes from a small number of observations.

Uncertainties arising from the following are usually considered as B type:

- The gauge
- Influence magnitudes
- Y Measurement procedures known in advance
- The use of empirical relationships with known uncertainty

The most commonly used B type uncertainty is the gauge uncertainty. Metrology laboratories are normally designed so that the influence magnitudes do not interfere significantly with the usual measurements made. For this reason, the B type uncertainties, difficult to calculate, it is only necessary to consider them in measurements with a precision close to or greater than the design limits of the laboratory.

According to the GUM, the following cases can be distinguished in the evaluation:

- A. When only a single value is known for an input quantity (e.g. a single measurement, the result

of a previous measurement, a value from the literature, or a correction value), this value shall be taken as the x_i estimate, whereas for typical uncertainties, $u(x_i)$, values that are provided or calculated from reliable data, $u(x_i)$, shall be accepted, otherwise it shall be estimated from experience.

Calibrated gauge

The calibration uncertainty shall be stated on your calibration certificate. It indicates the expanded uncertainties, so it will be necessary to divide such value by the associated k certificate coverage factor. Thus:

$$u(x_i) = \frac{U_0}{k}$$

- B. When a certain statistical distribution can be accepted for the input magnitude, the expected value shall be taken as the x_i estimator and the variance square root of its distribution as its associated $u(x_i)$ standard uncertainty.

Known effect of an influence magnitude on equipment indications

When the distribution function of the indication variation with respect to some magnitude is known from the manufacturer's instructions or from experience, the same distribution standard deviation is used as a contribution to the uncertainty.

$$u(x_i) = \sigma(x_i)$$

Measurement repeatability lack during the measuring process

If it is considered that the measurement method requires m measurand measurements to be made, the standard uncertainty contribution to the uncertainty, analogous to that already observed for repeatability in calibration, is expressed as:

$$u(x_i) = \frac{S(q_k)_{med}}{\sqrt{m}}$$

However, when a measurement is being carried out, the measurand measurement repetitions are scarce (usually it is measured only once but sometimes three readings are taken). Therefore, in order to avoid having to calculate for each measurement process the value of this component, and since the calibration sample is sufficiently significant, it is assumed that the standard deviation of the measurement process readings is equal to that of the calibration:

$$S^2(q_k)_{med} = S^2(q_k)_{cal}$$

Finally, the standard uncertainty associated to this component would be defined by:

$$u(x_i) = \frac{S(q_k)_{cal}}{\sqrt{m}}$$

- C. When only the a_i^+ upper and a_i^- lower limits of the input magnitude can be estimated (measuring instrument error limits, temperature variation range, etc.), a rectangular distribution is accepted for the possible variability of the input magnitude.

In this case, frequent in metrological practice, the input magnitude presents a variability within a delimited values range for which no more probable situation is assumed within such range, that is, all values are equiprobable, which corresponds to the aforementioned rectangular distribution [Figure 5].

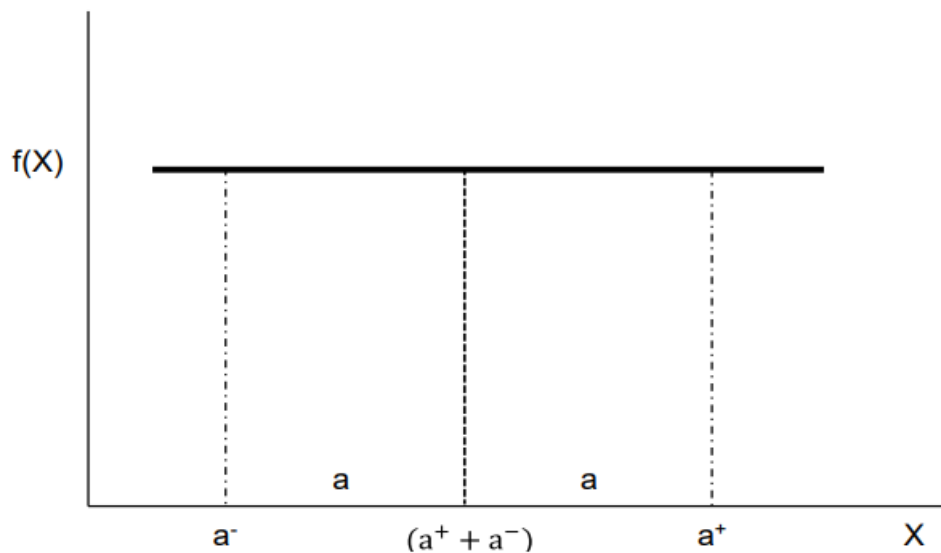


Figure 5. Rectangular or uniform distribution

In this case, the midpoint can be taken as the most probable value of x_i :

$$x_i = \frac{a^+ + a^-}{2}$$

and as an estimator of the variance:

$$u^2 = \frac{(a^+ + a^-)^2}{2}$$

or, when the difference between the two limits is called:



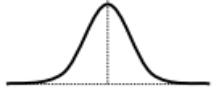
$$a = \frac{(a^+ + a^-)}{2}$$

It results:

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

In case other distributions are assumed, the values given in Table 1 shall be used respectively.

Table 1. Variances according to distribution

| Distribution | Denominator | $u^2(x_i)$ | Graph |
|--------------|-------------|----------------------------|---|
| Rectangular | 3 | $u^2(x_i) = \frac{a^2}{3}$ |  |
| Triangular | 6 | $u^2(x_i) = \frac{a^2}{6}$ |  |
| Normal | 9 | $u^2(x_i) = \frac{a^2}{9}$ |  |

Measuring equipment resolution or scale division

The equipment resolution or scale division, whether analogue or digital, is always an uncertainty source. If E is the equipment scale division, the magnitude value will be in the $[-E/2, +E/2]$ range, with a constant probability over the entire range. Therefore:

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

Temperature effect

The device indications may fluctuate due to temperature variations during measurement. These variations are usually specified by the manufacturer or known from experience. Thus, if ΔT is the temperature difference during the measurement process, the contribution of this uncertainty component is given by the expression:

$$u(x_i) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha \cdot L \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$$

In which:

α = Thermal expansion coefficient

L= Reference length

ΔT =Temperature variation

Gauge derivation

It is common to consider the gauge derivation when the calibration history is known or there are

documents that specify the way to quantify such derivation. The standard deviation of this contribution is expressed by:

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

Other contributions

The contributions outlined above are those most commonly found in measurement uncertainty estimation procedures and metrological practice.

However, in certain cases, some of them may not be sufficiently significant and can therefore be disregarded. Therefore, it is the metrological function that must establish in its measurement process which contributions are significant, incorporating them into the uncertainty based on its experience.

Calibration procedures, mainly those coming from metrological reference bodies, based on GUM and the EA-04/2 document, develop the uncertainty estimation specifically for each equipment, therefore, they constitute a good starting point to establish the contributions.

6.4.2.3 *Uncertainty balance presentation*

The uncertainty analysis for a measurement should include a list of all uncertainty sources, together with the associated standard measurement uncertainties and the methods to evaluate them. In order to facilitate the data management from such an analysis they can be presented in tabular form according to the following model [Table 2]:

Table 2. Uncertainty balance

| Magnitude X_i | Estimation x_i | Standard uncertainty $u(x_i)$ | Probability distribution | Sensitivity coefficient C_i | Contribution to the standard uncertainty $u_i(y)$ |
|--------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--|
| X_1 | x_1 | $u(x_1)$ | $f(X_1)$ | C_1 | $u_1(y)$ |
| X_2 | x_2 | $u(x_2)$ | $f(X_2)$ | C_2 | $u_2(y)$ |
| : | : | : | : | : | : |
| X_N | x_n | $u(x_N)$ | $f(X_N)$ | C_N | $u_N(y)$ |
| | | | | | |
| Y | y | | | | $U(y)$ |

6.4.3 Combined standard uncertainty determination

6.4.3.1 Independent input magnitudes

The standard uncertainty of the y measurement result (Y measurand estimator) is obtained from the standard uncertainties of the n estimated x_1, x_2, \dots, x_N input variables, using the variance propagation law. It is called the combined standard uncertainty, $u_c(y)$, and it is the $u_c^2(y)$ combined variance square root.

Combined variance:

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

Combined standard uncertainty:

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

In which, f is the model function and each $u(x_i)$ is a standard uncertainty evaluated as being either A type or B type.

6.4.3.2 Correlated input magnitudes

When there is correlation between the input variables, the expression for the combined variance would be generalised to:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right]^2 u^2(x_i) + \sum_{i,j=1}^N \left[\frac{\delta f}{\delta x_i} \right] \left[\frac{\delta f}{\delta x_j} \right] u_{x_{ij}}$$

In relation to the covariance terms, EA-4/02 indicates that the covariance corresponding to the X_i and X_j measurands can be considered null or negligible if:

- The measurements of both are independent, as they are derived from repeated observations in independent, different and non-simultaneous measurements.
- Some of the pair's magnitudes can be considered constant
- The analysis of both magnitudes does not show the existence of a correlation between them.

6.4.4 Expanded uncertainty determination

The expanded uncertainty is represented by U and is obtained by multiplying the $u(y)$ combined standard uncertainty by a k coverage factor:

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

Therefore, the measurement result can be expressed in the form:

$$Y = y \pm U$$

Identifying y as the best estimator of the Y measurand, and the $[y - U, y + U]$ interval as the one that contains a significant fraction of the value distribution that could reasonably be attributed to Y .

The expanded uncertainty determination needs to obtain the k coverage factor, for which the EA-4/02 document recommends a value of 2, provided that a normal distribution can be attributed to the measurand (normality criterion) and that the evaluated standard uncertainty is reliable enough (reliability criterion). In this case, the uncertainty interval confidence level is about 95% [Table 3].

Table 3. Normal distribution K values

| Confidence level (p) Percentage | Coverage factor (kp) |
|------------------------------------|----------------------|
| 68,27 | 1 |
| 90 | 1,645 |
| 95 | 1,960 |
| 95,45 | 2 |
| 99 | 2,576 |
| 99,73 | 3 |

However, the normal distribution hypothesis is not always easy to confirm experimentally, therefore, the EA document distinguishes the cases in which the distribution function of the Y output variable can be assimilated to a normal one from those in which such an assumption is not admissible. Likewise, in the first case, it differentiates the situation in which the standard uncertainty estimate is reliable enough from that in which it is not:

1. Normality criterion

The resulting distribution is accepted to be normal when three or more uncertainty components contribute values of the same order of magnitude and are derived from independent variables with normal, triangular, uniform or similar-looking distributions (Central Limit Theorem).

2. Reliability criterion

Provided that the A type contributions considered in the determination of $u_c(y)$ are based on at least 10 observations, the reliability is considered sufficient.

In most metrological applications, these conditions are satisfied, but in the case in which the

requirements for assuming a normal distribution are met, but not having a reliable enough standard uncertainty (at least 10 measurements on A type contributions or to be able to use a B type instead), it is necessary to increase the uncertainty factor appropriately in order to achieve a coverage probability of around 95%. Therefore, the number of effective freedom degrees, v_{ef} , of the standard uncertainty, obtained from the v_i freedom degrees of each of its contributions, must be estimated. For this purpose, the ISO guide and the EA document recommend the Welch-Satterthwaite formula:

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

In this formula, the A type estimates of n measurements are incorporated with $v = n - 1$ freedom degrees. The freedom degrees number determination of the B type estimates is made assuming that these estimates are very reliable. For example, in the case of a uniform distribution, its width is chosen so that the probability of finding values outside the interval is practically negligible. In these conditions, the number of freedom degrees is very high and, in practice, it is assumed that $v_i \rightarrow \infty$, that is, for practical purposes the B type contributions do not play a role in the v_{ef} calculation.

The following table [Table 4] shows the value of the k coverage factor as a function of the calculated effective number of freedom degrees. The table is based on a Student's distribution evaluated for a 95% approximate coverage probability, by rounding the v_{ef} value to the nearest integer by default.

Table 4. Coverage factor according to the V_{ef} factor

| 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 |

Finally, when the normality hypothesis is not justifiable, it is necessary to identify a density function that reasonably adapts to the output variable, and with it the k value should be obtained for 95% approximate confidence interval. In this situation, if one contribution dominates over all the others, the k value must be calculated from that distribution. If there are two predominant contributions, the distribution resulting from both should be previously obtained by means of the corresponding convolution, determining k on such distribution.

6.4.4.1 Uncertainty expression

According to GUM recommendations, the measurement uncertainty numerical value must be expressed with a maximum of two significant digits. However, in some cases, this may mean expressing it below the equipment's own scale division, which is not justified from a practical point of view; therefore, it is usual for the result to be expressed as a multiple of the scale division, even though the resulting uncertainty may be lower.

The measurement result should also be rounded in its final expression to the lowest significant number

of the expanded uncertainty value assigned to the measurement result.

When the uncertainty is expressed, it is advisable to take into account the recommendation that EA-4/02 specifies on the rounding rule to be used:

If the rounding reduces the numerical value of the measurement uncertainty by more than 5%, the rounded up value should be used.

Example: A $U=0,0215686$ mm measurement uncertainty is obtained, in which the equipment scale division is $E=0,01$ mm.

Is it possible to express this uncertainty as 0.02 or does it need to be expressed as 0.03?

$$\frac{0,0215686 - 0,02}{0,0115686} \times 100 = 7,27\% \geq 5\% \rightarrow U = 0,03 \text{ mm}$$

That is, the EA document only allows rounding by default when the result is very close to the previous scale value.

Finally, in the final result, the measurement correction and measurand value must be expressed with the same significant figures as the uncertainty assigned to it.

6.5 Equipment calibration

As has been described extensively, the best way to ensure the traceability of a measurement system is by calibration, defined as the operation to determine the calibration correction that needs to be applied to the measuring equipment when working under conditions analogous to those of calibration and its uncertainty component. However, if the operating conditions differ, it is also necessary to incorporate the necessary additional corrections and their corresponding uncertainties.

The calibration purpose is to reveal the discrepancies between the instrument or gauge being calibrated and the reference element, with sufficiently stable and known metrological characteristics. It is agreed to adopt as the calibration result of a measuring instrument the corrections obtained by measuring known gauges at different points in its measuring range, therefore, the first object of such calibration is the calibration correction measurement, estimating their resultant value and the uncertainty associated to that correction.

The instrument correct assessment implies the recognition that its indications (gross indications) may not correspond to the true value of the measured magnitude (measurand). Therefore, it is necessary to make corrections to the raw indications to obtain the corrected values, which always leads to the occurrence of the corresponding uncertainties, since it is not possible to know the exact values of these corrections. In other words, any correction, even if it is null, introduces an uncertainty component.

Also, considering that the calibrations supporting the traceability chains do not allow to capture the innumerable situations that arise after calibration for a measuring system or equipment, and taking into account that the primary gauges dissemination may present differences depending on the countries and calibration services, in the uncertainty assignment a certain degree of subjectivity is introduced and, therefore, it becomes necessary to guarantee that the measurements of certain user groups are equivalent and of the pre-established quality. These reasons justify the intercomparison implementation, which aim to reinforce "horizontally" the "vertically" disseminated traceability. Such comparisons are mandatory in the case of accredited laboratories and, increasingly, they are carried out between industrial measurement and testing centres.

Regarding the calibration process, it is necessary that it is carried out according to the guidelines established in the Calibration Plan document: "Calibration Procedure", thus guaranteeing homogeneity and unification in its execution.

It is possible to distinguish between different calibration models:

- A. Local calibration at one point
- B. Local calibration at several points
- C. Global scale calibration
 - a. Null correction and constant uncertainty for the entire range.
 - b. Correction and uncertainty constant for the entire range
 - c. Correction and uncertainty for every point in the range

6.5.1 Local or partial calibration at one point

This model only applies to the case in which an instrument is to be used in the surroundings of the specific scale point at which it is to be calibrated. This situation is rare in practice. It is usual to calibrate the instrument measurement range, in which case, local calibration at a single point would be a poor uncertainty estimator associated to the whole instrument. However, the development of this calibration model provides the methodology for subsequent models.

6.5.1.1 *Uncertainty balance*

The first step in the device evaluation is to identify, according to its metrological characteristics, which are going to be the uncertainty components to be taken into account, that is, which contributions are considered the most significant to quantify the device inaccuracy. These components may be due to calibration conditions as well as to use conditions or equipment measurement.

Once these contributions have been identified, the corresponding Uncertainty Balance is developed (table 2, section 4.2.3), in which each uncertainty component is identified by its estimator, standard uncertainty, distribution function, sensitivity coefficient and, finally, its contribution variance.

6.5.1.2 *Calibration uncertainty*

Obtaining the calibration uncertainty implies extracting from the uncertainty balance only those contributions that come from the calibration conditions. The process to be followed is:

- Measure n_c times the known value and uncertainty gauge
- Calculate the x_c and $S_{q_c}^2$ statistical estimators
- Determine the $c_c(\Delta x_c)$ calibration correction

The model function, considering only the gauge and the equipment components, would be given by the corrections to be applied in each one of them:

$$c = c_c(\Delta x_c) + c_E = (x_0 - x_c) + c_E$$

In which, x_0 =gauge estimated value

x_c =result estimated value provided by the equipment

c_E =correction to be applied due to scale deviation from reference

But, as has already been explained in previous sections, if reference conditions are used, which is common in metrological practice, the additional corrections to that of calibration, have a null value (not their associated uncertainties), therefore:

$$c = c_c(\Delta x_c) + c_E = (x_0 - x_c)$$

Thus, for the local calibration of an instrument, it is necessary to have a certified gauge in the surroundings of the desired point, with x_0 mean and U_0 expanded uncertainty (assumed to be 3 to 10 times lower than expected for the instrument). This uncertainty corresponds to a k coverage factor, so that:

$$u_0 = \frac{U_0}{k}$$

Being u_0 the standard uncertainty associated to that gauge.

On the gauge, n_c measurements shall be repeated with the instrument to be calibrated ($n > 10$ so that the sample is significant enough), obtaining:

$$q_{c1}, q_{c2}, \dots, q_{cn}$$

-Calibration mean estimator:

$$\bar{q} = x_c = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} q_{ck}$$

Regarding the measurement variability:

-Calibration variance estimator:

$$S^2(q_{ck}) = \frac{1}{n_c - 1} \sum_{k=1}^{n_c} (q_{ck} - x_c)^2$$

Applying the Central Limit Theorem, having adopted the mean estimator as the most probable value, the variance of the mean calibration value will be n_c times lower than that of the individual calibration measurements:

$$S^2(x_c) = \frac{S^2(q_{ck})}{n_c}$$

As for the contribution variance of the c_E component:

$$u_E^2 = \frac{\left(\frac{E}{2}\right)^2}{3}$$

Finally, the combined variance corresponding to the contributions set considered (with input variables assumed to be independent) is obtained through the Variance Propagation Law application, according to the expression:

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

expressing the equation in terms of the sensitivity coefficients:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2$$

Accordingly:

$$u_c^2 = u_0^2 + u_E^2$$

$$u_c = \sqrt{u_0^2 + S^2(x_c) + u_E^2}$$

$$U_c = k \cdot u_c$$

The strict calibration ends at this point, offering as a result the following parameters:

$$c = c_c(\Delta x_c) \text{ and } U_c(k =)$$

In this simplest case, the contributions are only that of the gauge and that of the equipment to be calibrated (calibration repeatability and resolution components).

But in addition, it may be necessary to incorporate further contributions (with their standard uncertainties).

Thus, for instance, the environmental conditions during the $c_{\Delta L}$ calibration process, c_{δ} some instrument and gauge time drift, etc., can also be considered, resulting in the new model function:

$$c = c_c + c_E + c_{\Delta L} + c_{\delta} + \dots$$

And as observed before, these additional corrections are of zero value. Therefore, it is only necessary to express their standard uncertainties and to determine their contribution variances (according to section 4.2.2.):

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

$$u(c_{c.a.c.}) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha \cdot L \cdot \Delta T_c}{\sqrt{3}}$$

$$u(c_{der}) = \frac{der}{\sqrt{3}}$$

Thus, the model function is again defined by the expression:

$$c = c_c = \Delta x_c = x_0 - x_c$$

and the combined standard uncertainty, applying the law of variance propagation:

$$u_c = \sqrt{u_0^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{(\alpha \cdot L \cdot \Delta T_c)^2}{3} + \frac{der^2}{3} + \dots}$$

Finally, the expanded uncertainty would be:

$$U_c = k \cdot u_c$$

And as in the previous case, the $c = c_c(\Delta x_c)$ and U_c ($k =$) values are presented as a result.

6.5.1.3 Measurement uncertainty

The obtained uncertainty in the previous section is not an adequate estimator of the equipment inaccuracy when in use, that is, when the equipment is performing a measurement. The main reason is that U_c only takes into account the calibration conditions and does not take into account the influences acting on the measurement process. Therefore, in order to be able to assign an uncertainty to the measurement result, it is necessary that the uncertainty has been determined from the combined variance, which is the sum of all the components contributing variances affecting both the calibration and the measurement process, that is, the sum of all influences.

Subsequently, when the calibrated instrument measures an unknown measurand, in the calibrated point surroundings, with similar references to the calibration ones, it shall provide m raw measurements, q'_k .

$$q'_1, q'_2, q'_3, \dots, q'_m$$

-Measurement mean estimator:

$$\bar{q}' = x' = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m q'_k$$

The measurement result shall be expressed:

$$R = x' + c (c_c + c_e) = x' + x_0 - x_c \quad (c_e = 0)$$

The indication dispersion obtained by repeated measurements, under repeatability conditions, on the measurand.

-Measurement variance estimator:

$$s^2 (q'_k) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (q'_k - x')^2$$

The combined uncertainty is again obtained by the variance propagation law, resulting in:

$$u = \sqrt{u_0^2 + S^2(x_c) + S^2(x') + u_E^2}$$

Given that, normally, the gauge used in calibration has a very good definition level, higher than the instrument resolution itself, S_c practically coincides with the instrument variability. However, S_m takes into account the instrument variability plus that of the own measurand indefiniteness, therefore:

$$S_m \geq S_c$$

Equality corresponding to a measurand with a definition level similar to that of the calibration gauge. The latter circumstance can be identified as the optimum and determines the standard uncertainty.

Also, the measurand reiterations are rare; sometimes $m=3$, and most of the time, $m=1$. Therefore, the variability S_m is not sufficiently significant.

Therefore, according to section 4.1.2, case B:

$$S^2 (q'_k) = S^2 (q_{ck})_1$$

The combined uncertainty remains:

$$u = \sqrt{u_0^2 + \frac{S^2 (q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2 (q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3}}$$

As can be observed, as in the previous case, the measurement uncertainty with a calibrated instrument working under similar conditions to the calibration, is at least expressed as a function of the gauge and instrument contribution (repeatability when it is being calibrated, repeatability when measuring an unknown measurand and resolution).

In addition, as many uncertainty components can be added as necessary to complete the final uncertainty balance.

Therefore, considering the set of additional contributions:

$$u = \sqrt{u_0^2 + \frac{S^2 (q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2 (q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{(\alpha \cdot L \cdot \Delta T_c)^2}{3} + \frac{(\alpha \cdot L \cdot \Delta T_m)^2}{3} + \frac{\delta^2}{3} + \dots}$$

The final result is as follows:

$$U = k \cdot u$$

This uncertainty is the one to be assigned to the result of a measurement made with the considered instrument, so that the expression of that result shall be:

$$R = (x' + \Delta x_c) \pm U \quad (k =)$$

Expressing a result according to the above expression involves correcting the value given by the instrument (or the mean if $m=3$) with the deviation value obtained in the (Δx_c) calibration each time a measurement is made.

However, it is possible to consider the calibration correction as an additional uncertainty component, in which case, its contribution variance shall be determined by considering that the uncertainty component is distributed according to a rectangular function:

$$u_{\Delta x_c}^2 = \frac{(\Delta X_c)^2}{3}$$

If it is decided to consider this condition, the criterion is called a null-correction criterion, leaving the expression of a result offered by the instrument in the form:

$$R = x' \pm U \quad (k =)$$

This situation is more convenient for the user, since the calibration correction is already included in the uncertainty. However, if the correction is significant, the uncertainty will be unnecessarily increased.

Ultimately, whether to consider the null correction criterion or the correction criterion to the result will depend on the requirements of the metrological process being carried out.

6.5.2 Calibration at various scale points

In standard metrological practice, an equipment is usually used over its entire measuring range, not over a particular scale part. Therefore, calibration at a single point would not guarantee the equipment reliability for full use nor would it be feasible to calibrate at all points of its range.

Therefore, in order to reach a compromise situation between cost and goodness required in the process, the calibration shall be carried out by choosing several equipment points, approximately equidistant from each other, and applying the local calibration model to each of them. As already known, it will be necessary to have certified gauges for each calibration point, so that traceability is guaranteed. All these requirements must be duly included in the corresponding calibration procedure.

The obtained results of this process can be presented in tabular form, according to the following model [Table 5]:

Table 5. Partial calibration results

| Calibration Point | Gauge value | Local calibration results | | |
|-------------------|-----------------|---------------------------|----------------|------------------------|
| | | Uncertainty | | Calibration correction |
| | | Calibration | Measurement | |
| P1 | x ₀₁ | U _{c1} | U ₁ | Δx _{c1} |
| P2 | x ₀₂ | U _{c2} | U ₂ | Δx _{c2} |
| P3 | x ₀₃ | U _{c3} | U ₃ | Δx _{c3} |
| --- | --- | --- | --- | --- |

6.5.3 Measurement range global calibration

Once the equipment has been evaluated at the selected scale points, according to the calibration procedure that applies to it, it is necessary to establish some globalising criterion for expressing the uncertainty that accompanies any measurement result provided by the equipment.

In many cases, in the case of simple equipment, in order to facilitate its use in the metrological process, the criterion of assigning a single uncertainty for the entire measurement range is adopted. For the correction, either null correction or constant correction may be considered for the entire measuring range.

However, there are other situations in which the above option is often not used, especially in complex equipment. In such cases, the approach is to assign a specific uncertainty to each scale point.

Finally, although the above criteria can be considered, both in the calibration uncertainty assessment and in the equipment use, it will be the latter situation that will be the one to be considered in the following sections.

6.5.3.1 Use uncertainty determination according to the constant uncertainty criterion and null correction for the entire measurement range

$$R = x' \pm U \quad (k =)$$

6.5.3.1.1 Null correction and constant uncertainty for the entire measurement range

This case, one of the most frequent and widespread, implies that only the calibration uncertainties and the calibration corrections of the scale points are available. This is the typical situation in which the equipment user is not the equipment calibrator and therefore has only the calibration certificate at his disposal, from which it has to be determined the use uncertainty (local or global). This uncertainty will be given by the so-called corrected uncertainty.

Local use uncertainty at each calibrated point [Table 6]:

$$U_i = (U_i)_{corrected} = U_{ci} + |\Delta x_{ci}|$$

Table 6. Corrected uncertainty

| Calibration Point | Gauge Value | Local calibration results | | Corrected uncertainty |
|-------------------|-------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | | Uncertainty | Calibration Correction | |
| P1 | x_{01} | U_{c1} | $c_{c1} (\Delta x_{c1})$ | $U_{c1} + \Delta x_{c1} $ |
| P2 | x_{02} | U_{c2} | $c_{c2} (\Delta x_{c2})$ | $U_{c2} + \Delta x_{c2} $ |
| P3 | x_{03} | U_{c3} | $c_{c3} (\Delta x_{c3})$ | $U_{c3} + \Delta x_{c3} $ |
| | | | | |

Global use uncertainty for the entire measurement range:

$$U = \max (U_i)_{corrected} = \max (U_{ci} + |\Delta x_{ci}|)$$

Thus, the measurement result, for any point in the measurement range, would have a constant uncertainty, equal to U, and null correction. This solution is justified when the correction value is small, for example, when it is less than the associated uncertainty.

6.5.3.1.2 Null correction and constant uncertainty for the entire II measurement range

When all the calibration process data are available, which is usual when the equipment user is also the one who performs the calibration, it is possible to determine the combined uncertainty from the contribution variances of the uncertainty components that have been established in the uncertainty balance, including the calibration correction contribution.

Local use uncertainty at each calibrated point:

$$u_i = \sqrt{u_{0i}^2 + \frac{S^2 (q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2 (q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{\Delta x_{ci}^2}{3} + \dots}$$

Global use uncertainty for the entire measurement range:

$$U = k \cdot \max (u_i)$$

6.5.3.2 Use uncertainty determination according to the uncertainty criterion and constant correction for the entire measurement range

$$R = (x' + \overline{\Delta X_c}) \pm U \quad (k =)$$

As in the previous case, user and calibrator are the same agent, so the starting point is again the uncertainty balance.

According to the GUM, it is possible to estimate a single average correction $\overline{\Delta X_c}$, referred to as the global correction [Figure 6]:

$$\Delta\bar{x}_c = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta x_{cj}$$

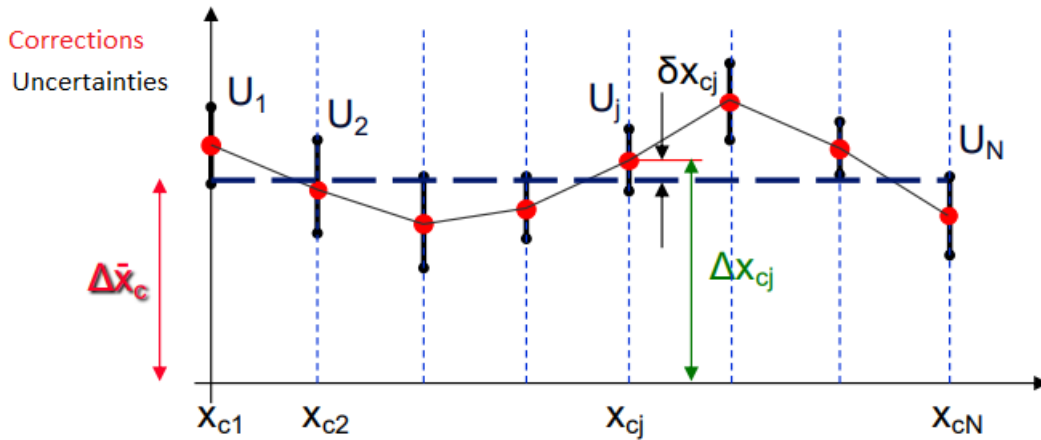


Figure 6. Global correction

Defining the residual correction as:

$$\delta_{ci} = \Delta x_{ci} - \Delta\bar{x}_c$$

of zero mean and variance:

$$u^2(\delta_{ci}) = \frac{\delta x_{ci}^2}{3}$$

Therefore: - Local use uncertainty at each calibrated point:

$$u_i = \sqrt{u_{0i}^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{\delta_{ci}}{3} + \dots}$$

-Global use uncertainty for the entire measurement range:

$$U = k \cdot \text{máx}(u_i)$$

6.5.3.3 Correction and uncertainty for each point in the range

When the customer's metrological requirements(tolerances) demand to work under very tight conditions and, therefore, it is not possible to assign a single constant uncertainty with null or constant correction, it is necessary to use other models, such as regression techniques.

Thus, for each point in the measurement range, a specific correction and uncertainty is identified [Table 7]:

Table 7. Uncertainty and local correction table

| Calibration point | Gauge value | Local calibration results | |
|-------------------|-------------|---------------------------|------------------------|
| | | Uncertainty | Calibration correction |
| P1 | X_{01} | U_1 | ΔX_{C1} |
| P2 | X_{02} | U_2 | ΔX_{C2} |
| P3 | X_{03} | U_3 | ΔX_{C3} |
| | | | |

From the local calibration results, a regression curve shall be calculated for the corrections and others for the uncertainties (usually straight lines):

$$U(x) = ax + b; \quad \Delta X_{C1} = a'x + b'$$

In case the linear model is not reliable enough to represent the values, it may be necessary to resort to other models of higher order.

6.6 Measurement and calibration capability

According to EA, the measurement and calibration capability (CMC) is defined as:

"The smallest measurement uncertainty that a laboratory can achieve, within the scope of its accreditation, when performing more or less routine calibrations of near-ideal measurement gauges used to define, make, retain or reproduce a unit of that magnitude or one or more of its values, or when performing more or less routine calibrations of near-ideal measuring instruments used to measure a magnitude".

'More or less routine calibrations' means that the laboratory must be able to achieve the optimum measurement capability indicated in the usual work for which it has been accredited. There are, of course, cases in which the laboratory could improve this capability as a result of research and additional precautions, but these cases are not covered by the CMC definition, unless the explicit laboratory policy provides it.

The qualifier inclusion "almost ideal" in the definition means that the CMC should not be dependent on the calibrated instrument characteristics. The "almost ideal" concept therefore indicates that there is no significant contribution to the measurement uncertainty attributable to physical effects that may be due to the calibrated instrument imperfections. However, it is understood that such an almost ideal instrument must exist. If it is established that, in a given case, even the closest "ideal" instrument that exists contributes to the measurement uncertainty, this contribution should be included in the determination of the optimal measurement capability, indicating that this capability refers to the calibration of that type of instrument.

To assess the optimal measurement capability, all components that make a significant contribution to the measurement uncertainty must be taken into account.

The measurement and calibration capability is one of the parameters used to define the accreditation scope of a calibration laboratory. The others are: physical magnitude, measurement range and calibration method or type of calibrated instrument. This CMC is indicated in the Technical Annex to the accreditation certificate. It is one of the fundamental data that can be found in the accredited laboratory directories that accreditation bodies periodically publish. It is a piece of information that allows accredited laboratory potential clients to judge the ability of a laboratory to perform a particular calibration work in the laboratory or "in situ".

The following table [Table 8] shows an example of the uncertainty calculation summary table performed on an instrument:

Table 8. Calibration uncertainty summary table

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------------------------|------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Nominal value (mm) | 0 | 2,4 | 4,9 | 7,5 | 9,9 | 12,5 | 15 | 17,6 | 20,1 | 22,5 | 25 |
| Gauge value (µm) | 0,00 | 2400,13 | 4900,15 | 7499,94 | 9900,03 | 12500,10 | 15000,24 | 17600,19 | 20100,13 | 22500,07 | 25000,07 |
| Equipment reading(mm) | 0 | 2,4026 | 4,9024 | 7,5013 | 9,9016 | 12,5016 | 15,001 | 17,6006 | 20,1008 | 22,5009 | 25,0006 |
| Local correction, (µm) | 0 | -2,47 | -2,25 | -1,36 | -1,57 | -1,5 | -0,76 | -0,41 | -0,67 | -0,83 | -0,53 |
| Combined u (µm) | 0,44 | 0,44 | 0,38 | 0,41 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,50 | 0,39 | 0,44 | 0,40 |
| k | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| U (µm) | 0,88 | 0,87 | 0,76 | 0,82 | 0,77 | 0,78 | 0,79 | 1,00 | 0,79 | 0,89 | 0,79 |
| U (µm) (GMC) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

7 Unit 11: THE METROLOGY LABORATORY

7.1 Introduction

The measurement field ranges from the National Laboratories, with the specific mission of preserving, reproducing and disseminating measurement units, to the manufacturing workshop, in which a number of instruments help to achieve the pieces desired shape marked on the drawings.

Between the two extremes there are different types of measurement centres, with different missions and characteristics; for the purposes of this study, and as the most representative, the Metrology Laboratory has been chosen as a reference, which is capable of providing accurate measurements and calibration to the equipments of the quality control departments of the different manufacturing workshops [Figure 1].

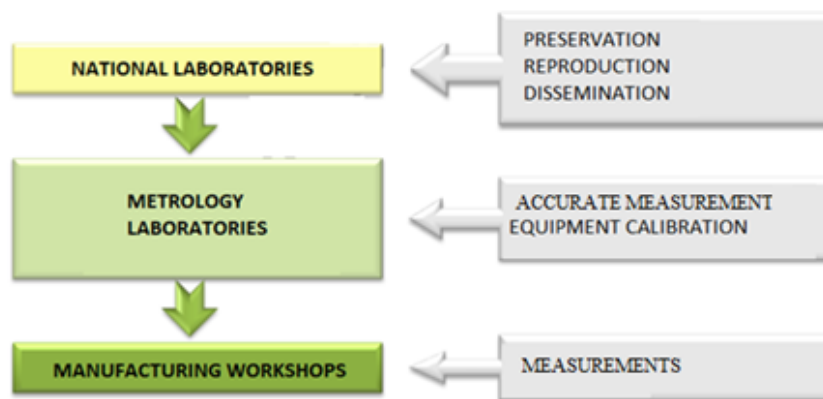


Figure 1. Metrology laboratory structure

7.2 Constructive and environmental conditions

As already stated, every magnitude measurement is affected by an uncertainty due among other causes to:

- The lack of measuring instrument
- The influence on the magnitude to be measured and on the measurement means of a certain magnitude number or influence causes, such as environmental conditions and the operators.

To minimise this problem, metrology laboratories need a controlled environment, at least for the main parameters that may influence the measured magnitudes or the instruments used to measure them. It is difficult to isolate these parameters and make them independent of external, and sometimes internal, laboratory conditions. It is usually possible to keep them within certain limits, by making the influence magnitude values variation compatible with the desired measurement accuracy.

The metrology laboratory construction involves a high initial expense, which has to be carefully considered for proper operation with minimum maintenance costs. The constructive conditions required for the laboratory operation shall be defined when the accuracy to be achieved is known, the machines and equipment to be installed, and the environmental conditions to be maintained [Table 1].

Laboratory location

In order to ensure that its environmental conditions are little influenced by outside conditions, the laboratory should be as isolated as possible. The ideal location is in a basement, fully or partially integrated into other buildings, to avoid heat loss as much as possible, with only one access door for daily work and a second access door for the machinery entry and for security purposes, located at the opposite end of the laboratory, and which, under normal conditions, is hermetically sealed.

Windows, if provided, should face north, avoiding direct sunlight, and should be double-glazed to ensure airtightness. Wall insulation can be reinforced by the use of building materials for thermal, acoustic and humidity insulation; this is best achieved by surrounding the laboratory with a visitable gallery to form an air chamber.

The floor must be protected primarily against vibrations by means of a specifically anti-vibration box construction with about 50 cm total thickness. In the interior of the room, a wooden or thick rubber floor should be laid in order to prevent instruments or pieces being measured from falling off. The ceiling needs a waterproof protection against rain and an air chamber, which is provided by a false ceiling. Plaster should be avoided because of the constant fine dust production.

Table 1. Environmental conditions recommendations

| Conditions | Dimensional Metrology |
|---------------------|---|
| Temperature | Interferometry zone: 20 °C ± 0,2 °C Calibration zone: 20 °C ± 1 °C Measurement zone: 20 °C ± 2 °C |
| | Temperature fluctuations= 2 °C/h In standard laboratories= 2°C/4 horas |
| Relative humidity | 50% maximum 40% minimum due to physiological reasons |
| Dust | Retain particles larger than 1 micrometre 200 particles maximum per cm^3 |
| Air flow rate | Carry out from 10 to 20 changes per hour 10 to 20 % clear air injection Maximum speed at the workplace: 0,15 m/s |
| Static overpressure | From 12,5 to 25 Pa |
| Vibrations | At a frequency of 200 Hz the maximum acceleration is 0,003 g |
| Noise | 60 dB maximum |
| Lighting | In general from 800 to 1000 lux at the workplace 550 lux minimum at any point in the laboratory Fluorescent lamps with diffuser |
| Earthing | Restricted for the laboratory |

Temperature

It is possibly the most important one of the influence magnitudes, since its variation is capable of dilating bodies, changing the electronic component characteristics, modifying the liquid viscosity, etc. The air-conditioning system installation is necessary to keep this magnitude within the required limits.

A 10 to 20 changes per hour air renovation shall be maintained, with a 10 to 20% clean (filtered and dry) air intake, distributed as evenly as possible and with a 0,15 m/s or less air velocity at the workplace. The design shall take into account:

- The number of people usually staying in the laboratory, who are a heat source (equivalent to a 100 watt heater).
- Heat dissipated by the equipments.
- Air flow distribution shape.
 - Non-laminar flow, with air outlets in the ceiling at regularly spaced intervals and air collection in the wall lower part or in the ceiling itself. It is the most widespread and economical.

- Laminar flow, can be horizontal, between two opposite walls, or vertical from floor to ceiling. A system of this type has been tested in Germany, but with collection in lateral orifices located at the bottom, rather than on the floor.

Humidity

The instrument purposes, gauges and pieces metal parts to be measured are very sensitive to oxidation, which is why work is carried out in relatively dry environments, to avoid the water vapour condensation on the piece or equipment, when the air-water vapour mixture reaches saturation temperature at room temperature. The lower limit can be set at 40% for physiological reasons and for the people's well-being who work there.

Pressure

Variations in atmospheric pressure change the air refractive index, altering the optical measurements, in which case a corresponding vacuum correction is introduced. In the rest of the measurements it does not have a noticeable effect.

It is advisable to maintain a slight static overpressure with respect to the outside, so that, when the doors are opened, the dust particles always tend to be blown outwards.

Air cleaning

A metrology laboratory should be as clean an area as possible. It can be said that a metrology room is considered clean when the suspended particles in the air are less than 1 μm . A possible solution for air cleanliness is the filter installation in the air intake and recirculation room ducts, double door installation, air curtains at inlets, as well as the use of special clothing and footwear. Smoke produced by smoking is a dirt source that must be prohibited in all calibration and interferometry rooms.

Vibrations

The metrology laboratory shall be located away from areas and places where vibrations are generated, such as press sections, compressors, rotating machines, etc. A first measure for their attenuation and elimination to levels that are not harmful to metrology work would be to have anti-vibration mounts and dampers on which metrology equipment and measuring instruments rest.

Noises

The noise level should be kept as low as possible, so that it does not disturb the people normal work. It is advisable not to exceed 60 dB.

Lighting

It should be uniform, without glare, distracting reflections or dark areas. A 800 to 1000 lux average level is considered sufficient. The contrast ratio should not exceed 3 to 1 between the working area and the nearest one and 10 to 1 between the working area and dark areas. It is advisable to use fluorescent "cold light" in the ceiling. If further illumination is required, localised auxiliary lighting, also fluorescent, shall be used.

Power supply

Many of the equipments in use must be connected to the power supply network and their characteristics are therefore affected by the parameters variation that characterise this network such as frequency,

waveform and amplitude. The C.E.I. recommends for the power supply of electrical measuring instruments:

Rated voltage $220 \pm 1\% \text{ V}$

Harmonic distortion $> 5\%$

It is therefore highly desirable to provide the network with general stabilisation or individual equipments to supply one or more measuring instruments.

Earthing

A system shall be provided to ensure that potentials to earth are equal throughout the laboratory, or at least in a specific measurement area. It is advisable to have an earth independent of the general one, which is called "undisturbed" and to which the measuring apparatus are connected.

Furniture

The laboratory shall be equipped with strong, sturdy, plastic-covered tables to provide a good support surface for measuring devices and pieces being measured. Mobile trolleys, tables, equipment racks, portable fire extinguishers, etc., shall also be provided.

7.3 Laboratory organization

7.3.1 Staff organization

Just as in most technology fields, systems for the production process automation have arisen, which relegate the human part to the role of a simple witness or process control, in the case of metrological technology, a man's participation is irreplaceable. It is not possible to carry out true metrology without metrologists. The machines provide readings, but the technician's aptitude (training, technical knowledge, experience) who carries out the measurement will ensure that the measurement result acquires metrological validity.

In general terms, the laboratory staff is distributed among the different departments that make up the laboratory, such as:

- Management
- Technical
 - Qualified
 - Training
- Operational
 - Equipment maintenance
 - Maintenance environmental conditions
- Management, archives, quality
 - Document control and record keeping
 - Preparation, review and certificate approval, etc.
- The technical staff can be organised broadly according to the following organisation chart.

Measuring group

Their task is to carry out specific measures, according to established methods. A specialization by magnitudes that have sufficient entity is desirable, and thus within the dimensional or geometric metrology field, the following work points can be distinguished:

- Gauge blocks (interferometry and comparison)
- Lengths and linear dimensions on pieces (universal gauges and various tools)
- Angles (sine tables and rulers, turntables, optical instruments)
- Shapes (specific comparators and shape measuring machines)
- Surface condition (roughness meter)
- Flatness and alignments (tables and optical instruments)

Calibration group

Its mission is to execute the laboratory's Calibration Plan, within the specifications and deadlines foreseen for it.

Study group

They exist in higher category laboratories, with the specific fundamental mission to develop the measurement methods to be used by the measurement and calibration groups.


In addition to these groups, which carry out the technical operations, the laboratory has at its disposal personnel who carry out the work of:

- Equipment maintenance
- Premises environmental conditions maintenance
- Document control and record keeping
- Preparation, review and certificate approval, etc.

7.3.2 Equipment organization

The laboratory shall be provided with all the necessary equipment for the proper calibration and measurement execution. It must have an up-to-date inventory of all its equipment, including auxiliary equipment used in the laboratory.

The equipment which is used directly or indirectly in carrying out the measurements and which may affect the measurement results must have the corresponding equipment record or record card [Figure 2].

| | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|---|
| Description | Outside micrometer |  |
| Measuring range/scale division | 0-25 mm / 0,001 mm | |
| Manufacturer/template | Mitutoyo / 293 - 305 | |
| Serial number/internal coding | 6196916 / D.02.10-01 | |
| Location | A - D2 | |
| Use scope | Measurement and calibration support | |
| Commissioning date | 18/02/08 | |
| Manufacturer's instructions | Yes | |
| Calibration procedure | PT06 | |
| Maintenance method | PG05 | |
| Verification method | PG05 | |
| Observations | | |

| Traceability | | | | Maintenance/intermediate verification | | |
|--------------|--------|----------------|-------------------|---------------------------------------|-----------|--------|
| Date | Centre | Certificate nº | Uncertainty | Date | Operation | Result |
| 18/02/08 | CENUM | 2008/001 | Segun tabla en CC | | | |
| 26/02/09 | CENUM | 2009/001 | Segun tabla en CC | | | |
| 20/02/10 | CENUM | 2010/003 | Segun tabla en CC | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Figure 2. Equipment file

The UNE-EN ISO/IEC 17025 standard indicates the register content and, among others, it includes:

- Equipment name
- Manufacturer's name, serial number
- Internal identification within the laboratory
- Reception date
- Commissioning date. Beforehand, if necessary, calibration must be carried out.
- Any damage history, malfunction, modification or repair
- Maintenance performance details

As for the third point, it is free for each laboratory and must be made on the equipment clearly and permanently, either with a label or engraved on it. This avoids the risk of confusion between several instruments of the same type and allows for the instrument personalised tracking. An internal identification example could be the following [Figure 3]:

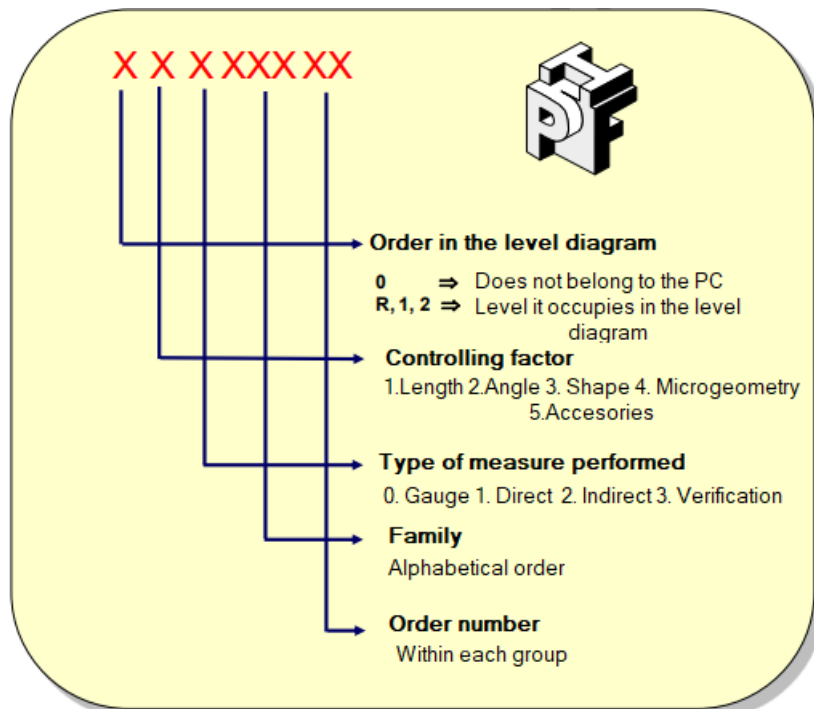


Figure 3. Internal coding example

One of the many studies that can be carried out, with the existing data in each record or instrument register, is the measurement work completion knowledge, with the following information:

- Equipment within its period (%)
- Equipment that is not (%)
- Incorrect equipment, if any, being used

7.4 Calibration Plan

In a laboratory, the measuring instrument correct choice is not enough, it is necessary to ensure that, throughout the instrument life, its reliability and accuracy are always within the initial specifications required for its use.

Therefore, measuring instruments must be calibrated periodically with calibration uncertainties that are compatible with the product specifications and requirements being manufactured and ensure that the calibration means are traceable through a calibration chain to national gauges.

The international metrology terms vocabulary defines Calibration as: “an operations set that establishes, under specified conditions, the relationship between the magnitude values indicated by a measuring instrument or a measuring system, or the values represented by a materialised measure or a reference material, and the corresponding magnitude values realised by gauges”. In other words, an operations set intended to determine the gauge uncertainty value, instrument or measuring equipment by adjusting or expressing it in tables or correction curves.

Calibration often leads to the issuing of a Calibration Certificate, as it is nowadays a quality system requirement.

For two measurement results, taken at distant points, to be compatible, it would be necessary for both to be referenced to a common gauge. This double comparison is often impossible, even for different plants of the same company. In addition, when measuring, we only intend to know the magnitude value with an approximation degree, or uncertainty. In order to be able to achieve this, it is necessary to know the measuring instrument state or measuring system used, that is, how much the instrument indications differ from the true value (which is always unknown). As approximations to the true values are the physical magnitude values materialised by the gauges or, where appropriate, reference materials.

Therefore, in order to calibrate an instrument, a more accurate one is needed, which is understood as the instrument ability to give indications close to the true value, which provides us with the conventionally true value necessary to check the instrument indication in question. By systematically applying this principle we come to establish, in an ascending direction, a comparison uninterrupted chain, which relates the measurements made by a given instrument with the highest level gauges.

Traceability is a measurement property whereby the measurement can be related or referred to appropriate national or international gauges by means of a comparison unbroken chain.

All international standards and recommendations for testing and quality control require that measurements made in the practice of both activities are traceable to the appropriate gauges, generally national or international ones and through these to the basic SI units. The satisfaction of this requirement implies, obviously, that the measuring instruments are calibrated and thus guarantee the goodness and measurement result traceability.

A calibration plan is the systematic and organised calibration of all the measuring centre instruments and accessories and involves the ordering of all instruments from highest to lowest accuracy.

The necessary documentation to support the metrology laboratory calibration plan consists of the following information:

- Traceability chart
- Level diagram
- Calibration label
- Calibration procedures
- Result file

7.4.1 Traceability Chart

It graphically reflects the laboratory chain or higher metrological level centres that link the work centre gauges to those of the national laboratory in such a way that the final link to the basic units is sufficiently assured [Figure 4].

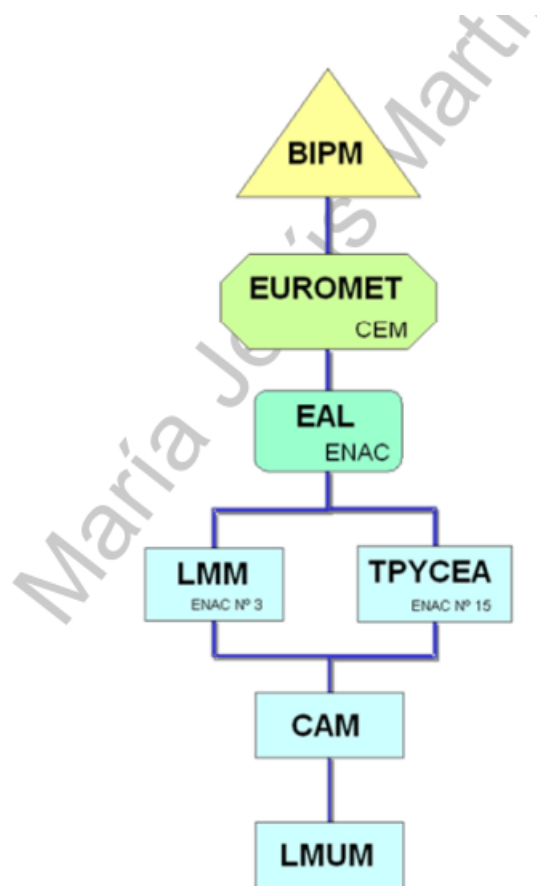


Figure 4. Traceability chart

7.4.2 Level diagram

It is a graph showing, grouped and ordered by accuracy level, all the gauges, instruments and measuring equipment in a laboratory [Figure 5].

The criteria for the group formation are:

- That all of the instruments it comprises are calibrated to the same gauges
- That they use the same procedures
- That their uncertainties are estimated with the same calculation equations.

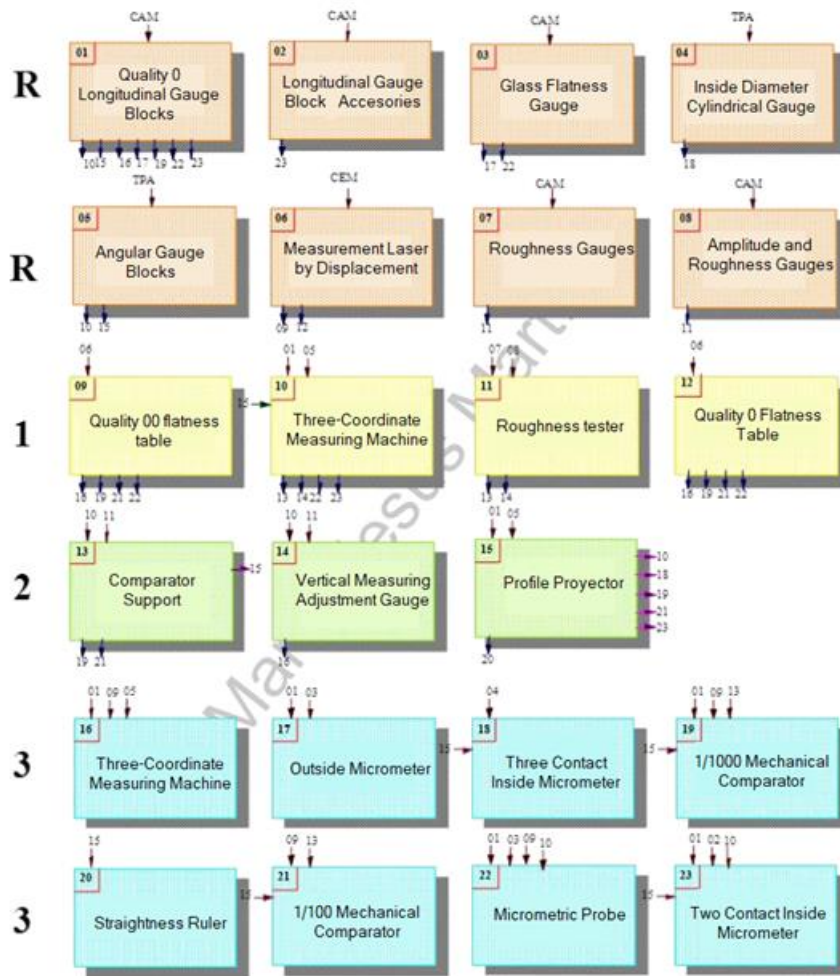


Figure 5. Level diagram

A group may include a single item, several similar items, or similar accessories or components of different equipment.

In terms of levels, the first level is formed by the centre primary gauges, that is, those maximum precision elements or instruments whose values are considered to be true, without any calibration by the centre itself. These primary gauges have to be periodically calibrated at another higher level facility and their values and uncertainties must be certified for a certain validity period. This level is referred to as the Reference level (level R or 0). The next levels, except for the last one, are formed by the element groups that are calibrated by the higher levels and calibrate those of lower levels. The last level is formed by the groups which, once calibrated, are not used in any other internal laboratory calibration. This level is generally the most numerous.

In each group and by means of arrows going in and out of it, it is indicated from which other groups it receives calibration and to whom it gives it. The level diagram shows the laboratory instrumentation relative arrangement within a hierarchical structure. It is necessary to observe a fundamental principle: any instrument calibration chain has to be downward through the levels, without backward jumps and without closing in on itself. This ensures any instrument calibration by a more accurate one.

In addition to vertical arrows, horizontal ones may also appear in a level diagram. These arrows indicate instruments which, while not being used as gauges for the instrument under calibration, act as auxiliary calibration instruments (pre-checks, zeroing, etc.) [Figure 6].

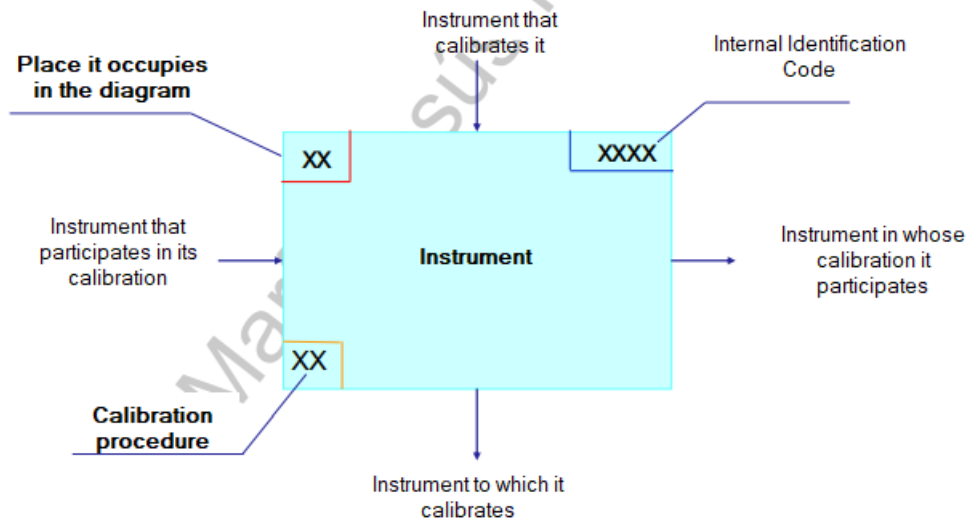


Figure 6. Calibration group

In the calibration plan, one of the most important points is the time interval determination at which a given gauge or measuring instrument calibration is considered valid, in order to prevent any quality measurement degradation to be made and to ensure its reliability over time. There is no single criterion for setting the time, as it shall be taken into account for each calibration or control element:

- Instrument accuracy degree (quality)
- Use frequency
- Stability and drift
- Economic profitability

These time intervals, initially established for a given instrument, are not constant and differ from one equipment to another, and should be reviewed and, if necessary, readapted according to experience. In addition, any intervention on a measuring instrument that may modify its metrological characteristics, requires the previously established periodicity modification.

When the instruments under the same number have been calibrated, the box that identifies them is crossed out or coloured, so that the calibration level performed is known at all times. At the end of the time fixed for the complete laboratory calibration (one or two years), the chart will have been completely crossed out and replaced by a new one, with the modifications corresponding to the registered and discharged instruments, to restart the calibration plan, whose execution is a laboratory permanent task.

7.4.3 Calibration procedure

This document, easily recognizable with the level diagram group by the same numbering, should contain all the necessary information and define, as specifically as possible, the operations to be carried out by the metrologist in order to perform the calibration. The procedures may relate to:

I. External calibration requirements, for reference level instruments, as well as their preparation details for leaving the laboratory and their reception after calibration. The fundamental aspects that must be included in this type of document are:

- a. Calibration Protocol
- b. Acceptance criteria
- c. Global use uncertainty
- d. Calibration gauge data updating
- e. Maintenance and Intermediate Checks

II. Internal calibrations, with the detailed calibration process and uncertainty calculation and all the details for their correct development of them, with each calibration group details.

The calibration procedure is generally created for one type of instrumentation; if it is necessary to create one for a specific instrument, it is based on the general procedure, making specific references according to the needs of the specific case under study.

To ensure that the calibration process is carried out rigorously, thoroughly and systematically, the calibration procedures must include the following contents:

1. Purpose and scope

- Equipment identification (general and specific)
- Internal coding
- Reference procedure

2. Definitions

- Equipment configuration (schematic)
- Metrological general ones
- Metrological specific ones

3. Abbreviations and symbols

- Parameters and equipment identification in the document

4. Reference documents

- Application documents identification
 - General ones



▪ GUM, EA 4/02, ...

- Specific ones
 - Equipment standards, calibration procedures

5. Development

- Basic concepts
- Equipment and materials
- Initial operations
- Calibration process
- Pre-checks
- Calibration
- Data gathering and processing



6. Results

- Uncertainty calculation
- Result interpretation

7. Associated documentation

- Documents generated in the procedure development

Annex: Numerical example

- Application to a practical case

7.4.4 Result file

Any system for storing and making readily available all information provided by the calibration operation performance. When including in a file the information about the last calibration carried out, the previous one must be removed and send it to another file.

An equipment or instrument result study allows the following information to be obtained:

- To be able to modify calibration periods.
- To evaluate errors and know the equipment drift, or wear.

The following table shows a result file extract showing the calibration records for each calibration point and the corresponding gauges values and the determined calibration variables [Figure 7].

| Brand | | | | | | | | | | | | Version | |
|--|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|
| Model | | | | | | | | | | | | Technician | |
| Serial N° (Internal codification) | | | | | | | | | | | | | |
| Total Calibration Points I = | 11 | | | | | | | | | | | | |
| Measurement N° at each point J = | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Measuring Range C = | Scale div. E (µm) 1 | | | | | | | | | | | | |
| Calibration Points | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
| Nominal Value (mm) | 0 | 2.4 | 4.9 | 7.5 | 9.9 | 12.5 | 15 | 17.6 | 20.1 | 22.5 | 25 | | |
| Deviation Gauge-Nominal d_{ij} (µm) | 0.00 | 0.13 | 0.15 | -0.06 | 0.03 | 0.10 | 0.24 | 0.19 | 0.13 | 0.07 | 0.07 | | |
| Gauge Standard Unc. u_{ij} (µm) | 0.00 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | | |
| Deviation to the nominal of the ME indications when measuring the gauges d_{ij} (µm) | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| | 1 | 4 | 3 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | | |
| | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | | |
| | 0 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | | |
| | -2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | | |
| | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | | |
| | -1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | | |
| | -1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | | |
| Mean value \bar{d} (µm) | 0 | 2.6 | 2.4 | 1.3 | 1.6 | 1.6 | 1 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 0.6 | | |
| Standard Deviation s (µm) | 1.05406255 | 0.84327404 | 0.51653772 | 0.67494856 | 0.51639776 | 0.51639776 | 0.66666667 | 1.0749677 | 0.42163702 | 0.73786475 | 0.51639776 | | |
| Local Correction c_i (µm) | | -2.47 | -2.25 | -1.36 | -1.67 | -1.6 | -0.76 | -0.41 | -0.67 | -0.83 | -0.53 | | |
| Local Corr. Standard Unc. $u(c_i)$ (µm) | 0.440998655 | 0.43952358 | 0.38220043 | 0.4079846 | 0.38663486 | 0.39008947 | 0.30449914 | 0.49612777 | 0.39331361 | 0.44280125 | 0.38632366 | | |
| Local Corr Expanded Unc. U_i (µm) | 0.8819171 | 0.87104716 | 0.76440086 | 0.8159692 | 0.77326977 | 0.78017864 | 0.78899629 | 0.99625554 | 0.78662782 | 0.88566205 | 0.78064732 | | |

Figure 7. Result file extract

7.4.5 Calibration labels

It is a sticker to be placed on each element, once calibrated [Figure 8]. The minimum information it must contain is as follows:

- The laboratory identification that performed the calibration
- Item identification
- Measurement report number
- Next calibration date

The label should be able to indicate that the equipment has use limitation, because it does not comply with the specifications, but can be used with some kind of restriction, for example, some measuring ranges have not been calibrated and therefore it must not be used for measurements in those ranges. In order to inform the user that the equipment has some limitation, the label shall be crossed by a red stripe, and the full information shall be found on the calibration certificate. If the equipment is out of use, it can be labelled indicating this, or on the normal label, it is crossed by two dashes, which follow the diagonals.



|   | |
|--|-------------------|
| CENTRO DE METROLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA N° 186/LC501 | |
| Instrument: | Internal Code: |
| Serial Number: | Calibration Date: |
| Report Number: | Next Calibration: |

Figure 8. Calibration label

7.5 Intercomparison

Confidence in the measurements made by a laboratory is based on:

1. Reference gauges certificate by a higher level laboratory.
2. Calibration Plan that determines the:
 - Corrections
 - Uncertainties

Both conditions necessary to ensure the measure traceability are not enough to guarantee their compatibility when carried out by different laboratories.

In addition to the equipment, which may have been calibrated by the same higher level laboratory and therefore have the same traceability, there are other components such as the measurand, the measurement procedure, the operators, and the environmental conditions, which are specific to each facility or laboratory and possibly different from each other. For this reason, in order to ensure result traceability and compatibility obtained, it is necessary to participate in so-called Intercomparison Exercises.

The UNE EN ISO 17025 standard states: "The laboratory must have quality control procedures in place to monitor the test and calibration validity carried out". This includes, as a prerequisite, participation in intercomparison programmes.

Participation in intercomparison exercises is an essential tool for demonstrating the technical competence of the tests performed in the laboratory and allows:

- To compare their own results with those obtained by other laboratories.
- To confirm the correct initial method validation
- To use the data obtained from the participation in intercomparisons for the measurement methods validation
- To determine systematic errors
- To improve the test method used
- To obtain information from methods used by other laboratories
- To monitor the method accuracy and precision
- To encourage inter-laboratory collaboration
- To demonstrate technical competence against third parties

In an intercomparison, in addition to the participants, a higher metrological level laboratory, a Pilot Laboratory, is required. The uncertainty ratio of which is given by the following:

$$\frac{U_j}{U_p} \geq 1$$

In which:

U_j = participating laboratory uncertainty

U_p = pilot laboratory uncertainty

The pilot laboratory shall establish procedure rules for the proper conduct of the intercomparison. It shall detail, among other things: measurand, Travelling Gauge, methods that can be used, measurement number, participants' uncertainty, environmental conditions, acceptance criteria, timetable, rules for transport and measurand handling measurands, participant responsibilities, etc.

The pilot laboratory normally measures at the beginning and at the end of the intercomparison, to confirm that the gauge is within its specifications.

Each participating laboratory evaluation is carried out by means of the so called Compatibility Coefficient (C_j), whose expression is:

$$C_j = \frac{|x_j - x_p|}{\sqrt{U_j^2 + U_p^2}}$$

It is accepted that the participating laboratory measurement results are compatible when the difference in absolute value between the result value given by the participating laboratory and the corresponding value defined by the pilot laboratory, is less than or equal to the value resulting from the combined uncertainty of both laboratories. Therefore:

$$C_j \leq 1 \text{ Compatible laboratory}$$

$$C_j > 1 \text{ Incompatible laboratory}$$

In case the laboratory participates with several measurands, it is possible to determine a total coefficient for that laboratory (arithmetic mean of the coefficients obtained individually for each measurand). Similarly, it is possible to express a global coefficient for the whole intercomparison.

7.6 Laboratory accreditation

The Industry Law 21/1992 defines Accreditation as the technical competence formal recognition of a conformity assessment body for the requested activity development. Conformity assessment bodies act so that products and services made available to society conform to certain requirements generally related to their quality and safety. These requirements may be established by law and therefore be of a regulatory nature or be specified in standards, or other voluntary documents. Such assessment activities value depends to a large extent on the bodies' credibility carrying out them and the confidence that the market and society at large have in them. Such credibility is ensured through accreditation, which guarantees technical competence and their subordination to international standards.

The current industrial quality and safety infrastructure in our country means that the accredited agents actions are valid through ENAC (Entidad Nacional de Acreditacion), which in turn is internationally recognised, establishing what could be called "Action traceability".

ENAC assesses compliance with the requirements set out in the following International Standards or regulatory documents for the different conformity assessors operation:

- Testing Laboratories UNE-EN ISO/IEC 17025

- Calibration Laboratories UNE-EN ISO/IEC 17025
- Clinical Laboratories UNE-EN ISO 15189
- Biobanks ISO 20387
- Inspection Entities UNE-EN ISO/IEC 17020
- Product Certification Bodies UNE-EN ISO/IEC 17065
- Management Systems Certification Bodies UNE-EN ISO/IEC 17021-1
- Certification Bodies for People Certification UNE-EN ISO/IEC 17024
- Environmental Verifiers EC Regulation 1221/2009
- Greenhouse Gas Emission Verifiers UNE-EN ISO 14065
- Intercomparison Programme Providers UNE-EN ISO/IEC 17043
- Producers of Reference Materials ISO 17034
- Good laboratory practices Royal Decree 1369/2000

As far as calibration laboratories are concerned, the need for accreditation is reflected in the "Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial" (R.D. 2200/1995, of 28 December 1995), which specifies that laboratories must act with impartiality and carry out their functions with solvency, for this purpose they must comply with the following requirements:

- To be accredited by an accreditation body (ENAC is assigned as such in this R.D.), so that their actions are recognised at community and international level.
- In order to be accredited, industrial calibration laboratories must comply with the UNE EN ISO 17025 Standard "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories".
- To be accredited, it shall have measurement gauges, in the areas to be accredited, that are directly or indirectly traceable to the national gauges of the measurement legal units or to international gauges with national recognition.

The general criteria, according to which ENAC will assess the technical competence of a calibration laboratory, are those contemplated, among others, in the following documents: PAC-ENAC: "Procedimiento de Acreditación", CGA-ENAC-LC: "Criterios Generales para la acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración"(includes the provisions of the established in the UNE EN ISO 17025 standard), document EA- 4 02 M 2013: "Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration" and the ISO Guide: "Expression of measurement uncertainties".

Where necessary, the general criteria may be clarified or supplemented by additional technical criteria, specific for certain types of calibrations, and published in the accreditation programmes or other ENAC documents.

7.7 Legal metrology

As already defined in previous topics, Legal Metrology is the metrology field that covers the activities by which the legal requirements on measurements, measurement units, measuring instruments and measurement methods are established.

State Metrological Control applies to measuring equipment or systems which may have an influence on the commercial transactions transparency, the consumer's and user's health or safety, as well as the environment.

In the Autonomous Andalusia Community territorial scope, the Metrological Control functions are assigned by Decree 26/1992 of 25 February 1992, "la empresa pública Verificaciones Industriales de Andalucía S.A (VEIASA)" which was created by Decree 177/1989, of 25 July 1989.

A measuring equipment and system wide variety are subject to this control: those used in the basic supplies control (water, gas and electricity meters), hydrocarbon dispensers, weighing instruments, taximeters, gaming machine counters, counters used in road safety checks (used in vehicles roadworthiness testing or cinemometers for the speed control, the popular "radar"), temperature recorders and thermometers used in the transport, storage and refrigerated food distribution, etc. [Figure 9].



Figure 9. Metrological control

Metrological control comprises two distinct phases:

Marketing and Commissioning

At this stage, the person responsible for the product conformity (normally the manufacturer) chooses the applicable conformity assessment module(s), and commissions a Notified Body or a Metrological Control Body to evaluate the measuring instrument conformity with the applicable essential, metrological and technical requirements. This incorporates seals that prevent access to certain measuring instrument parts to prevent tampering.

Instruments in service

Once the instrument is operational, it is necessary to check it periodically or after repairs or modifications to verify that it continues to measure adequately and that its measurement errors are below the maximum

permissible errors. If the instrument passes the verification, a "compliant" label is affixed, otherwise a red "inoperative" label is applied.

On the other hand, the Register of Metrological Control ensures that the authorised bodies guarantee that the apparatus subjected to metrological control complies with the essential, metrological and technical requirements corresponding to the applicable European or national regulations. They must be entered in this register:

- Natural or legal people manufacturing, importing, placing on the market, or leasing measuring instruments subject to metrological control.
- Instrument repairers subject to metrological control.
- Metrological verification bodies

There are three types of conformity assessment bodies operating in Spain in the legal metrology field, which assume responsibility in public interest areas. They are therefore accountable to the competent national authorities:

- A) Notified Bodies. They are designated by the Member States of the European Union and act as a third party in the conformity assessment procedures established in European regulations.
- B) Metrological Control Bodies. They are designated by the Spanish Administrations. They act as a third party in conformity assessment procedures established in national regulations.
- C) Authorised Metrological Verification Bodies. They are designated by the Spanish public administrations. They act as a third party in the metrological verification after repair or modification and periodical verification.

The first two are involved in the equipment marketing and commissioning phase, while the third ones are involved in the case of equipments already on the market or instruments in service.

7.8 Situation in Spain in the metrological field

As mentioned above, in the middle of the 18th century, movements began in Europe to harmonise the different measurement units used both in the production processes and commercial transactions. The process culminated in 1875 with the signing of the Treaty of the Metre Convention, which was signed by 20 States, including Spain, represented by General Ibáñez, who became the first president of the International Committee of Weights and Measures, set up as a result of the aforementioned Treaty. Subsequently, metrology in Spain entered an inactivity long period from which it began to emerge at the beginning of the last decade and, due to its incorporation into the Community institutions, the Government undertook the commitment to harmonise our structure and legislation with those existing in the Western Europe countries.

The first step in this direction was the Industrial Calibration System establishment in 1981 by the Ministry of Industry and Energy, which for many years has provided, with limited resources, traceability to the different laboratories and companies that needed to calibrate their measuring equipment.

The second step forward was the enactment of Law 3/1985, of 18 March 1985, on Metrology, in which for the first time in our country metrology was contemplated in its global aspect, since up to that time all the Weights and Measures laws had referred exclusively to measurement units, with some mention of certain legal metrology aspects.

Since this law approval, and in an uninterrupted manner, the foundations have been laid for our integration in all European metrological organisations. In the same year, the Spanish Metrology Centre, CEM, was created, which in its first years was dedicated to the technicians' training, equipment acquisition, working procedures implementation similar to those of other European institutes, etc.

The Spanish Metrology Centre, as an Autonomous Body of the General State Administration, is the institution responsible for obtaining, developing, preserving and disseminating the national measurement gauges, as established in Law 31/1990, of 27 December 1990. In order to comply with this and in view of the inability to be able to maintain all the national gauges, a small laboratories number are being recognised as Associated Laboratories of the Spanish Metrology Centre and the national gauge depositories. These are the Real Instituto y Observatorio de la Armada and the Instituto de Física Aplicada (IFA), as the national gauges depositories of Time and Luminous Intensity, respectively. They define the national gauges of the International System seven basic units, and in this respect, the government approved last year the Royal Decree 684/1994, of 15 April, declaring the measurement national gauges for these units, defining their characteristics and determining the depository body. These laboratories are required to participate in all international comparisons organised by the B.I.P.M. or within EUROMET, in order to continuously validate their competence and to contribute in the same way to the new units definitions. In order to guarantee the calibration laboratories traceability located at the next chain level, the CEM has signed an Agreement with the Secretary of State to collaborate closely with ENAC (former RELE) to give metrological support to their actions. These calibration laboratories, which must be accredited by ENAC, are also required to participate in national or international comparisons scheduled for this purpose. Having established these two basic levels, we can say that all the economic agents requesting metrological services are assured of their needs in this field, and therefore there will be no metrological problems in complying with the applicable regulations in the quality system implementation or recognition[Figure 10].

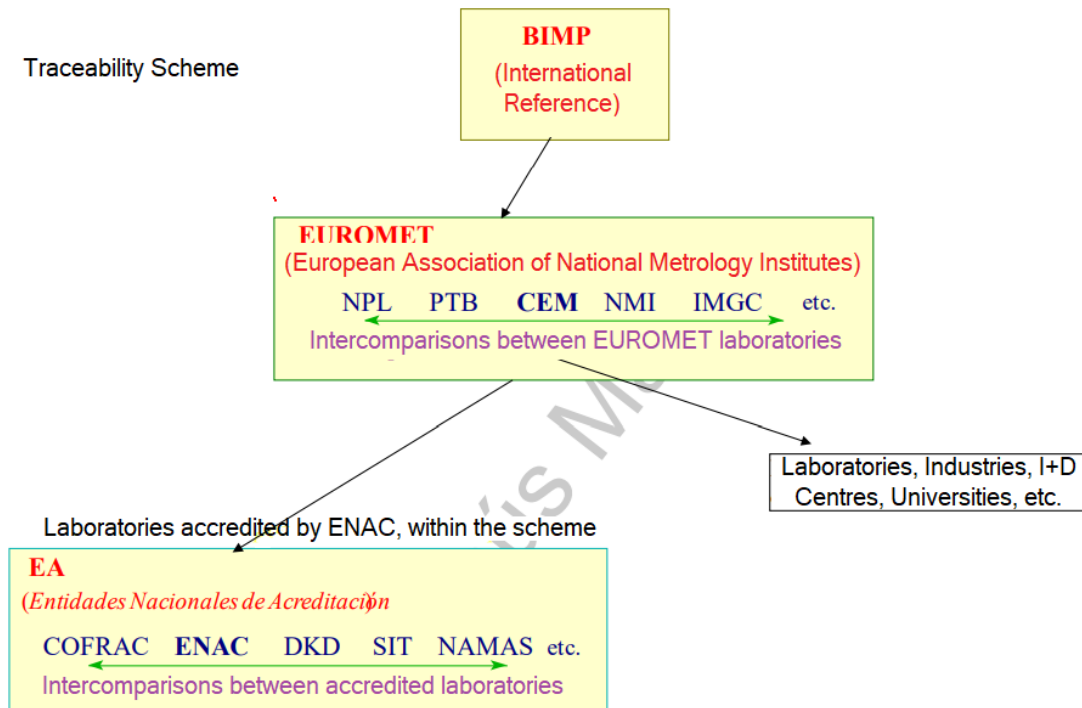


Figure 10. Traceability scheme in Spain

2 ANEXO II

| Español | English | Phonetics |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Medida | Measurement | / 'mez.ə.mənt/ |
| Variabilidad | Variability | / ,vɛəriə' bɪləti/ |
| Incertidumbre | Uncertainty | / ʌn' sɜ: .tən.ti/ |
| Operador | Operator | / 'ɒp.ər.eɪ.tər/ |
| Valor | Value | / 'væl.ju:/ |
| Magnitud | Magnitude | / 'mæg.nɪ.tʃu:d/ |
| Instrumento de medida | Measuring instrument | / 'mezərɪŋ ɪn.strə.mənt/ |
| Micrómetro milesimal | Millesimal Micrometer | / mɪ' lɛsɪməl mə' krɒmɪtər/ |
| Resultado | Result | / rɪ' zʌlt/ |
| Preciso | Accurate | / 'ækjʊrət/ |
| Escala | Scale | / 'skeɪl/ |
| Dígito | Digit | / 'dɪdʒɪt/ |
| Intervalo | Range | / 'reɪndʒ/ |
| Concepto | Concept | / 'kɒnsɛpt/ |
| Metrología | Metrology | / mɪ' trɒl.ə.dʒi/ |
| Intervalo | Interval | / 'ɪntə'vʌl/ |
| Parámetro | Parameter | / pə' ræmɪtər/ |
| Dispersión | Dispersion | / dɪ' spɜ:ʃən/ |
| Probabilidad | Probability | / ,prɒbə' bɪləti/ |
| Aleatoriedad | Randomness | / 'rændəmnis/ |
| Tratamiento estadístico | Statistical treatment | / stə' tɪstɪkəl 'tri:tmənt/ |
| Delimitar | Delimit | / dɪ' lɪmɪt/ |
| Error absoluto | Absolute error | / 'æbsəlu:t 'erər/ |
| Patrón | Gauge | / 'geɪdʒ/ |
| Indicación | Indication | / ,ɪndɪ' keɪʃən/ |
| Discrepancia | Discrepancy | / dɪ' skrɛpənsɪ/ |
| Corrección | Correction | / kə' rɛkʃən/ |
| Procedimiento | Procedure | / prəʊ' si:dʒər/ |
| Evaluación | Assessment | / ə' sɛsmənt/ |
| Laboratorio | Laboratory | / lə' bɒrətəri/ |
| Cálculo | Calculation | / ,kælkjʊ' leɪʃən/ |
| Muestra | Sample | / 'sɑ:mpəl/ |
| Factor | Factor | / 'fæktər/ |
| Cantidad | Quantity | / 'kwɒntəti/ |
| Desviación | Deviation | / ,di:vi' eɪʃən/ |
| Conocimiento | Knowledge | / 'nɒlɪdʒ/ |
| Pieza | Piece | / 'pi:s/ |
| Condiciones medioambientales | Environmental conditions | / ɪn ,vaɪərən' məntəl kən' dɪʃən/ |
| Imperfección | Imperfection | / ,ɪmpə' fɛkʃən/ |
| Sentidos | Senses | / 'sens/ |
| Grado | Degree | / dɪ' gri:/ |
| Habilidad | Skill | / 'skɪl/ |
| Tendencia | Trend | / 'trɛnd/ |
| Lectura de salida | Readout | / 'ri:daʊt/ |
| Paralelaje | Parallax | / 'pærələks/ |
| Datos | Data | / 'dɑ:tə/ |

| | | |
|-----------------------|------------------|---------------------|
| Aguja | Needle | /ˈni:dəl/ |
| Ángulo | Angle | /ˈæŋɡəl/ |
| Dispositivo de medida | Measuring device | /ˈmeɪzərɪŋ dɪˈvaɪs/ |
| Trazo | Stroke | /ˈstrəʊk/ |
| Distancia | Distance | /ˈdɪstəns/ |
| Mal posicionamiento | Bad positioning | /ˈbæd pəˈzɪʃən/ |
| Inclinación | Inclination | /ˌɪnklɪˈneɪʃən/ |
| Despreciable | Negligible | /ˈneglɪdʒəbəl/ |
| Desalineación | Misalignment | /ˌmɪs.əˈlaɪn.mənt/ |
| Eje | Axis | /ˈæksɪs/ |
| Presión | Pressure | /ˈpreʃə/ |
| Fabricación | Manufacturing | /ˌmænʃʊˈfæktʃərɪŋ/ |
| Diseño | Design | /dɪˈzain/ |
| Planitud | Flatness | /ˈflætnɪs/ |
| Paralelismo | Parallelism | /ˈpærələˌlɪzəm/ |
| Concentricidad | Concentricity | /kənθentriˈθɪti/ |
| Probetas | Probes | /ˈprəʊb/ |
| Leva | Cam | /ˈkæm/ |
| Engranaje | Gear | /ˈɡɪə/ |
| Grabado | Engraving | /ɪnˈɡreɪvɪŋ/ |
| Longitud | Length | /ˈleŋθ/ |
| Forma | Shape | /ˈʃeɪp/ |
| Deformación | Deformation | /ˌdiːfɔːˈmeɪʃən/ |
| Robusto | Robust | /ˈrəʊbʌst/ |
| Superficie | Surface | /ˈsɜːfɪs/ |
| Cilindro | Cylinder | /ˈsɪlɪndə/ |
| Esfera | Sphere | /ˈsfɪə/ |
| Desgaste | Wear | /ˈweə/ |
| Verificar | Check | /ˈtʃek/ |
| Alineación | Alignment | /əˈlaɪnmənt/ |
| Guía | Guide | /ˈɡaɪd/ |
| Distorsión | Distortion | /dɪˈstɔːʃən/ |
| Circularidad | Circularity | /ˌsɜːkjʊˈlærɪti/ |
| Redondez | Roundness | /ˈraʊndnɪs/ |
| Peso | Weight | /ˈweɪt/ |
| Bloque patrón | Gauge block | /ˈɡeɪdʒ ˈblɒk/ |
| Interferómetro | Interferometer | /ˌɪntəfəˈrɒmɪtə/ |
| Estabilización | Stabilization | /ˌsteɪbɪlaɪˈzeɪʃən/ |
| Acero | Steel | /ˈstiːl/ |
| Enfriamiento | Cooling | /ˈkuːlɪŋ/ |
| Porcentaje | Percentage | /pəˈsentɪdʒ/ |
| Tratamiento térmico | Heat treatment | /ˈhiːt ˈtriːtmənt/ |
| Causas externas | External causes | /ɪkˈstɜːnəl ˈkɔːz/ |
| Variación | Variation | /ˌveəriˈeɪʃən/ |
| Expansión | Expansion | /ɪkˈspæɪʃən/ |
| Regla | Rule | /ˈruːl/ |
| Influencia | Influence | /ˈɪnfluəns/ |
| Corrosión | Corrosion | /kəˈrəʊʒən/ |

| | | |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Daño | Damage | /ˈdæmɪdʒ/ |
| Humedad | Humidity | /ˈhjuːˈmɪdɪti/ |
| Polvo | Dust | /ˈdʌst/ |
| Aire | Air | /ˈeə/ |
| Amplitud | Amplitude | /ˈæmplɪtjuːd/ |
| Frecuencia | Frequency | /ˈfriːkwənsi/ |
| Deriva/Desvío del instrumento | Instrument drift | /ˈɪnstɹəmənt ˈdrɪft/ |
| Paso del husillo | Spindle pitch | /ˈspɪndl ˈpɪtʃ/ |
| Alteración | Alteration | /ˌɔːltəˈreɪʃən/ |
| Equipo | Equipment | /ɪˈkwɪpmənt/ |
| Calibrar | Calibrate | /ˈkælɪbreɪt/ |
| Error grosero | Gross error | /ˈgrəʊs ˈerə/ |
| Fallo | Failure | /ˈfeɪljə/ |
| Evitable | Avoidable | /əˈvɔɪdəbəl/ |
| Seno | Sine | /ˈsaɪn/ |
| Coseno | Cosine | /ˈkəʊˌsaɪn/ |
| Diámetro | Diameter | /ˈdaɪˌæmɪtə/ |
| Distinguir | Distinguish | /dɪˈstɪŋɡwɪʃ/ |
| Naturaleza | Nature | /ˈneɪtʃə/ |
| Falta de | Lack of | /ˈlæk ˈɒv/ |
| Criterio de rechazo | Rejection criterion | /rɪˈdʒekʃən kraɪˈtɪərɪən/ |
| Condiciones de repetibilidad | Repeatability conditions | /rɪˈpiːtəbɪlɪti kənˈdɪʃən/ |
| Estimador | Estimator | /ˈestɪˌmeɪtə/ |
| Distribución | Distribution | /ˌdɪstrɪˈbjʊːʃən/ |
| Varianza | Variance | /ˈveəriəns/ |
| Tamaño | Size | /ˈsaɪz/ |
| Población | Population | /ˌpɒpjʊˈleɪʃən/ |
| Media | Mean | /ˈmiːn/ |
| Base científica | Scientific basis | /ˌsaɪənˈtɪfɪk ˈbeɪsɪs/ |
| Simplicidad | Simplicity | /sɪmˈplɪsəti/ |
| Ley | Law | /ˈləʊ/ |
| Ocurrencia | Occurrence | /əˈkʌrəns/ |
| Coficiente | Coefficient | /ˌkəʊɪˈfɪʃənt/ |
| Diagrama de flujo | Flow chart | /ˈfləʊ ˈtʃɑːt/ |
| Breve | Brief | /ˈbriːf/ |
| Mediana | Median | /ˈmiːdiən/ |
| Tolerancia | Tolerance | /ˈtɒlərəns/ |
| Admisible | Admissible | /ədˈmɪsɪbəl/ |
| Efectivo | Effective | /ɪˈfektɪv/ |
| Metodología | Methodology | /ˌmeθəˈdɒlədʒi/ |
| Control de calidad | Quality control | /ˈkwɒləti/ |
| Referencia | Reference | /ˈrefrəns/ |
| Valor bruto | Raw value | /ˈrəʊˈvæljuː/ |
| Implicar | Entail | /ɪnˈteɪl/ |
| Factible | Feasible | /ˈfiːzəbəl/ |

| | | |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Nulo | Null | /ˈnʌl/ |
| Cero | Zero | /ˈzɪərəʊ/ |
| Certificado | Certificate | /səˈtɪfɪkət/ |
| Residual | Residual | /rɪˈzɪdʒʊəl/ |
| Inestabilidad | Instability | /ˌɪnstəˈbɪləti/ |
| Límite superior | Upper bound | /ˈʌpəˈbaʊnd/ |
| Documento | Document | /ˈdɒkjumənt/ |
| Analizar | Analyse | /ˈænləɪz/ |
| Comparación | Comparison | /kəmˈpærɪsən/ |
| Destacar | Highlight | /ˈhaɪlaɪt/ |
| Aspecto | Aspect | /ˈæspekt/ |
| Determinación | Determination | /dɪˈtɜːmɪˈneɪʃən/ |
| Dependencia | Dependency | /dɪˈpendənsi/ |
| Clasificación | Classification | /ˌklæsəfɪˈkeɪʃən/ |
| Armonizar | Harmonize | /ˈhɑːmənaɪz/ |
| Contenido | Content | /kənˈtent/ |
| Acreditación | Accreditation | /əˈkredɪˈteɪʃən/ |
| Requerimiento | Requirement | /rɪˈkwaɪəmənt/ |
| Función | Function | /ˈfʌŋkʃən/ |
| Organización | Organization | /ˌɔːɡənaɪˈzeɪʃən/ |
| Trazabilidad | Traceability | /ˈtreɪsəbɪləti/ |
| Auditoría | Audit | /ˈɔːdɪt/ |
| Paso | Step | /ˈsteɪp/ |
| Ley de propagación de la varianza | Variance propagation law | /ˌveəriˈeɪʃən ˌprɒpəˈgeɪʃən ˈlɔː/ |
| Dividir | Divide | /dɪˈvaɪd/ |
| Magnitud de salida | Output magnitude | /ˈaʊtpʊt ˈmæɡnɪtjuːd/ |
| Magnitud de entrada | Input magnitude | /ˈɪnpʊt ˈmæɡnɪtjuːd/ |
| Covarianza | Covariance | /kəʊvəˈrɪjənθə/ |
| Contribución | Contribution | /ˌkɒntrɪˈbjʊːʃən/ |
| Modelar | Model | /ˈmɒdəl/ |
| Estándar | Standard | /ˈstændəd/ |
| Arbitrario | Arbitrary | /ˈɑːbɪtri/ |
| Componente | Component | /kəmˈpɒnənt/ |
| Fuente | Source | /ˈsɔːs/ |
| Origen | Origin | /ˈɒrɪdʒɪn/ |
| Resolución | Resolution | /ˌrezəˈluːʃən/ |
| Raíz cuadrada | Square root | /ˈskweər ˈruːt/ |
| Comportamiento | Behaviour | /bɪˈheɪvjə/ |
| Propiedad | Property | /ˈprɒpəˈti/ |
| Fiable | Reliable | /rɪˈlaɪəbəl/ |
| Relaciones empíricas | Empirical relationships | /ɪmˈpɪrɪkəl rɪˈleɪʃənʃɪp/ |
| Escaso | Scarce | /ˈskeəʃs/ |
| División de escala | Scale division | /ˈskeɪl dɪˈvɪʒən/ |
| Efecto | Effect | /ɪˈfekt/ |
| Fluctuar | Fluctuate | /ˈflʌktʃueɪt/ |
| Fracción | Fraction | /ˈfrækʃən/ |

| | | |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Hipótesis | Hypothesis | /haɪ'pəθɪsɪs/ |
| Grados de libertad | Freedom degrees | /'fri:dəm dɪ'grɪ:/ |
| Expresión | Expression | /ɪk'spreʃən/ |
| Máximo | Maximum | /'mæksɪmə/ |
| Aconsejable | Advisable | /əd'vaɪzəbəl/ |
| Sistema | System | /'sɪstəm/ |
| Discrepancia | Discrepancy | /dɪ'skrepənsɪ/ |
| Cadena de trazabilidad | Traceability chain | /'treɪsəbɪlɪtɪ 'tʃeɪn/ |
| Surgir | Arise | /ə'reɪz/ |
| Calibración local | Local calibration | /'ləʊkəl ,kæɪlɪ'breɪʃən/ |
| Calibración parcial | Partial calibration | /'pɑ:ʃəl ,kæɪlɪ'breɪʃən/ |
| Equilibrio | Balance | /'bæləns/ |
| Nivel de definición | Definition level | /,defɪ'nɪʃən 'levəl/ |
| Conveniente | Convenient | /kən'vi:niənt/ |
| Realizar | Carry out | /'kæəri 'aʊt/ |
| Coste | Cost | /'kɒst/ |
| Arriba | Above | /ə'bʌv/ |
| Secciones siguientes | Following sections | /'fɒləʊɪŋ 'sekʃənz/ |
| Corrección nula | Null correction | /'nʌl kə'rekʃən/ |
| Incertidumbre típica/estándar | Standard uncertainty | /'stændəd ən'sɜ:ʔəntɪ/ |
| Exigir | Demand | /dɪ'mɑ:nd/ |
| Capacidad | Capability | /'keɪpə'bɪlɪtɪ/ |
| Conseguir | Achieve | /ə'tʃi:v/ |
| Alcance | Scope | /'skəʊp/ |
| Precaución | Precaution | /'pri:kə:ʃən/ |
| Atribuible | Attributable | /ə'trɪbjʊtəbl/ |
| Información | Information | /'ɪnfə'meɪʃən/ |
| Juzgar | Judge | /'dʒʌdʒ/ |
| Campo de medida | Measurement field | /'meʒə'mənt 'fi:ld/ |
| Laboratorios nacionales | National laboratories | /'næʃənəl lə'bɒrətəri/ |
| Preservar | Preserve | /'pri:zə:v/ |
| Reproducir | Reproduce | /'ri:prə'dju:s/ |
| Taller | Workshop | /'wɜ:kʃɒp/ |
| Laboratorio de metrología | Metrology laboratory | /'mɪ'trɒl.ə.dʒɪ lə'bɒrətəri/ |
| Minimizar | Minimise | /'mɪn.ɪ.maɪz/ |
| Conservar | Keep | /'ki:p/ |
| Desembolso | Outlay | /'aʊtleɪ/ |
| Mantenimiento | Maintenance | /'meɪntə'nəns/ |
| Máquina | Machine | /'mæʃɪ:n/ |
| Edificio | Building | /'bɪldɪŋ/ |
| Puerta | Door | /'dɔ:ʔ/ |
| Sellado/a | Sealed | /'si:ld/ |
| Luz del sol | Sunlight | /'sʌnlaɪt/ |
| Doble acristalamiento | Double glazed | /'dʌbəl 'gleɪzd/ |
| Hermeticidad | Airtightness | /'eə.taɪtnəs/ |
| Aislamiento | Insulation | /'ɪnsjʊ'leɪʃən/ |
| Cámara de aire | Air chamber | /'eə' tʃeɪmbəʔ/ |

| | | |
|------------------------|--------------------|-------------------------|
| Ventana | Window | /'wɪndəʊ/ |
| Grosor | Thickness | /'θɪkniːs/ |
| Suelo de goma | Rubber floor | /'rʌbəʳ 'flɔːr/ |
| Techo | Ceiling | /'siːlɪŋ/ |
| Ruido | Noise | /'nɔɪz/ |
| Iluminación | Lighting | /'laɪtɪŋ/ |
| Viscosidad | Viscosity | /vɪs'kɒsəti/ |
| Toma de aire | Air intake | /'eəʳ 'ɪnteɪk/ |
| Flujo de aire | Air flow | /'eəʳ 'fləʊ/ |
| Salidas de aire | Air outlets | /'eəʳ 'aʊtlɪt/ |
| Oxidación | Oxidation | /, ɒksɪ'deɪʃən/ |
| Vapor | Vapour | /'veɪpəʳ/ |
| Limpieza de aire | Air cleaning | /'eəʳ 'kliːnɪŋ/ |
| Conductos | Ducts | /'dʌkt/ |
| Cortina de aire | Air curtain | /'eəʳ 'kɜːtɪn/ |
| Humo | Smoke | /'sməʊk/ |
| Atenuación | Attenuation | /ə'tenʃʊ'eɪʃən/ |
| Destello | Glare | /'glɛəʳ/ |
| Fuente de alimentación | Power supply | /'paʊəʳ sə'plai/ |
| Estabilización | Stabilisation | /, steɪbɪlaɪ'zeɪʃən/ |
| Mueble | Furniture | /'fɜːnɪtʃəʳ/ |
| Carros móviles | Mobile trolleys | /'məʊbaɪl /'trɒli/ |
| Extintores de fuego | Fire extinguishers | /'faɪəʳ ɪk'stɪŋgwɪʃəʳ/ |
| Bastidores de equipo | Equipment racks | /'kwɪpmənt 'ræk/ |
| Irreemplazable | Irreplaceable | /, ɪr'pleɪsəbəl/ |
| Gestión | Management | /'mænɪdʒmənt/ |
| Archivo | Archive | /'ɑːkaɪv/ |
| Entidad | Entity | /'entɪti/ |
| Local | Premise | /'premɪs/ |
| Etiqueta | Label | /'leɪbəl/ |
| Principio | Principle | /'prɪnsɪpəl/ |
| Establecer | Establish | /'ɪstæblɪʃ/ |
| Dirección | Direction | /daɪ'rekʃən/ |
| Centro | Centre | /'sentəʳ/ |
| Accesorio | Accessory | /æk'sesəri/ |
| Flecha | Arrow | /'ærəʊ/ |
| Revisar | Review | /'riːvjuː/ |
| Readaptar | Readapt | /'riːə'dæpt/ |
| Identificable | Identifiable | /aɪ'dentɪ'faɪəbəl/ |
| Protocolo | Protocol | /'prəʊtəʊkəl/ |
| Propósito | Purpose | /'pɜːpəs/ |
| Configuración | Configuration | /kən'fɪgʊ'reɪʃən/ |
| Laboratorio piloto | Pilot laboratory | /'paɪlət lə'bɒrətəri/ |
| Compatible | Compatible | /kəm'pætɪbəl/ |
| Conformidad | Conformity | /kən'fɔːmɪti/ |
| Imparcialidad | Impartiality | /, ɪmpɑː'ʃi'ælɪti/ |
| Metrología legal | Legal metrology | /'liːgəl mɪ'trɒl.ə.dʒi/ |
| Transacción | Transactions | /træn'zækʃən/ |

| | | |
|------------------|---------------|-----------------|
| Transparencia | Transparency | /træns'pærænsi/ |
| Consumidor | Consumer | /kən'sju:məʔ/ |
| Salud | Health | /'helθ/ |
| Puesta en marcha | Commissioning | /kə'mɪʃ.ənɪŋ/ |
| Organismo | Body | /'bɒdi/ |
| Mercado | Market | /'mɑ:kɪt/ |
| Servicio | Service | /'sɜ:vɪs/ |
| Regulación | Regulation | /,rɛgju'leɪʃn/ |

| English | Español | Fonética |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Measurement | Medida | /me'ðiða/ |
| Variability | Variabilidad | /barjaβili'ðað/ |
| Uncertainty | Incertidumbre | /inθerti'ðumbre/ |
| Operator | Operador | /opera'ðor/ |
| Value | Valor | /ba'lor/ |
| Magnitude | Magnitud | /mayni'tuð/ |
| Measuring instrument | Instrumento de medida | /instru'mento ðe me'ðiða/ |
| Millesimal Micrometer | Micrómetro milesimal | /mi'krometro milesi'mal/ |
| Result | Resultado | /resul'taðo/ |
| Accurate | Preciso | /pre'θiso/ |
| Scale | Escala | /es'kala/ |
| Digit | Dígito | /'dixito/ |
| Range | Intervalo | /inter'βalo/ |
| Concept | Concepto | /kon'θepto/ |
| Metrology | Metrología | /metrolo'xia/ |
| Interval | Intervalo | /inter'βalo/ |
| Parameter | Parámetro | /pa'rametro/ |
| Dispersion | Dispersión | /disper'sjon/ |
| Probability | Probabilidad | /proβaβili'ðað/ |
| Randomness | Aleatoriedad | /aleatorje'ðað/ |
| Statistical treatment | Tratamiento estadístico | /trata'mjento esta'ðistiko/ |
| Delimit | Delimitar | /delimi'tar/ |
| Absolute error | Error absoluto | /e'ror aβso'luto/ |
| Gauge | Patrón | /pa'tron/ |
| Indication | Indicación | /indika'θjon/ |
| Discrepancy | Discrepancia | /diskre'panθja/ |
| Correction | Corrección | /korek'θjon/ |
| Procedure | Procedimiento | /proθeði'mjento/ |
| Assessment | Evaluación | /eβalwa'θjon/ |
| Laboratory | Laboratorio | /laβora'torjo/ |
| Calculation | Cálculo | /'kalkulo/ |
| Sample | Muestra | /'mwestra/ |
| Factor | Factor | /'fak'tor/ |
| Quantity | Cantidad | /kanti'ðað/ |
| Deviation | Desviación | /dezβja'θjon/ |
| Knowledge | Conocimiento | /konoθi'mjento/ |
| Piece | Pieza | /'pjeθa/ |

| | | |
|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Environmental conditions | Condiciones medioambientales | /kondi'θjonez meðjoambjen'tales/ |
| Imperfection | Imperfección | /imperfek'θjon/ |
| Senses | Sentidos | /sen'tiðos/ |
| Degree | Grado | /'graðo/ |
| Skill | Habilidad | /aβili'ðað/ |
| Trend | Tendencia | /ten'denθja/ |
| Readout | Lectura de salida | /lek'tura ðe sa'liða/ |
| Parallax | Paralelaje | /parale'laxe/ |
| Data | Datos | /'datos/ |
| Needle | Aguja | /a'yuxa/ |
| Angle | Ángulo | /'anɣulo/ |
| Measuring device | Dispositivo de medida | /disposi'tiβo ðe me'ðiða/ |
| Stroke | Trazo | /'traθo/ |
| Distance | Distancia | /dis'tanθja/ |
| Bad positioning | Mal posicionamiento | /'mal posiθjona'mjento/ |
| Inclination | Inclinación | /inklina'θjon/ |
| Negligible | Despreciable | /despre'θjaβle/ |
| Misalignment | Desalineación | /desaline'a'θjon/ |
| Axis | Eje | /'exe/ |
| Pressure | Presión | /pre'sjon/ |
| Manufacturing | Fabricación | /fabrika'θjon/ |
| Design | Diseño | /di'sepo/ |
| Flatness | Planitud | /plani'tuð/ |
| Parallelism | Paralelismo | /parale'lizmo/ |
| Probes | Probetas | /pro'βetas/ |
| Cam | Leva | /'leβa/ |
| Gear | Engranaje | /engra'naxe/ |
| Engraving | Grabado | /gra'βaðo/ |
| Length | Longitud | /lonxi'tuð/ |
| Shape | Forma | /'forma/ |
| Deformation | Deformación | /deforma'θjon/ |
| Robust | Robusto | /ro'βusto/ |
| Surface | Superficie | /super'fiθje/ |
| Cylinder | Cilindro | /θi'lindro/ |
| Sphere | Esfera | /es'fera/ |
| Wear | Desgaste | /dez'yaste/ |
| Check | Verificar | /berifi'kar/ |
| Alignment | Alineación | /aline'a'θjon/ |
| Guide | Guía | /'gia/ |
| Distortion | Distorsión | /distor'sjon/ |
| Circularity | Circularidad | /θirkulari'ðað/ |
| Roundness | Redondez | /reðon'deθ/ |
| Weight | Peso | /'peso/ |
| Gauge block | Bloque patrón | /'bloke pa'tron/ |
| Interferometer | Interferómetro | /interfe'rometro/ |
| Stabilization | Estabilización | /estaβiliθa'θjon/ |
| Steel | Acero | /a'θero/ |

| | | |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Cooling | Enfriamiento | /emfrja' mjento/ |
| Percentage | Porcentaje | /porθen' taxe/ |
| Heat treatment | Tratamiento térmico | /trata' mjento 'termiko/ |
| External causes | Causas externas | /'kawsas eks' ternas/ |
| Variation | Variación | /barja' θjon/ |
| Expansion | Expansión | /ekspan' sjon/ |
| Rule | Regla | /'reyla/ |
| Influence | Influencia | /im' flwenθja/ |
| Corrosion | Corrosión | /koro' sjon/ |
| Damage | Daño | /'dapo/ |
| Humidity | Humedad | /ume' ðað/ |
| Dust | Polvo | /'polβo/ |
| Air | Aire | /'ajre/ |
| Amplitude | Amplitud | /ampli' tuð/ |
| Frequency | Frecuencia | /fre' kwenθja/ |
| Instrument drift | Deriva/Desvío del instrumento | /deriβa ðel instru' mento/ |
| Spindle pitch | Paso del husillo | /'paso ðel u' siλo/ |
| Alteration | Alteración | /altera' θjon/ |
| Equipment | Equipo | /e' kipo/ |
| Calibrate | Calibrar | /kali' βrar/ |
| Gross error | Error grosero | /e' ro' r γro' sero/ |
| Failure | Fallo | /'faλo/ |
| Avoidable | Evitable | /eβi' taβle/ |
| Sine | Seno | /'seno/ |
| Cosine | Coseno | /ko' seno/ |
| Diameter | Diámetro | /'djametro/ |
| Distinguish | Distinguir | /distin' gir/ |
| Nature | Naturaleza | /natura' leθa/ |
| Lack of | Falta de | /'falta ðe/ |
| Rejection criterion | Criterio de rechazo | /kri' terjo ðe re' fθaθo/ |
| Repeatability conditions | Condiciones de repetibilidad | /kondi' θjonez ðe repetiβili' ðað/ |
| Estimator | Estimador | /estima' ðor/ |
| Distribution | Distribución | /distriβu' θjon/ |
| Variance | Varianza | /bari' θanθa/ |
| Size | Tamaño | /ta' maño/ |
| Population | Población | /poβla' θjon/ |
| Mean | Media | /'meðja/ |
| Scientific basis | Base científica | /'base θjen' tifika/ |
| Simplicity | Simplicidad | /simpliθi' ðað/ |
| Law | Ley | /'lej/ |
| Occurrence | Ocurrencia | /oku' renθja/ |
| Coefficient | Coeficiente | /koefi' θjente/ |
| Flow chart | Diagrama de flujo | /dja' γrama ðe 'fluxo/ |
| Brief | Breve | /'breβe/ |
| Median | Mediana | /me' ðjana/ |
| Tolerance | Tolerancia | /tole' ranθja/ |

| | | |
|--------------------------|-----------------------------------|---|
| Admissible | Admisible | /aðmi' siβle/ |
| Effective | Efectivo | /efek' tiβo/ |
| Methodology | Metodología | /metoðolo' xia/ |
| Quality control | Control de calidad | /kon' trol de kali' ðað/ |
| Reference | Referencia | /refe' renθja/ |
| Raw value | Valor bruto | /ba' lor' βrut/ |
| Entail | Implicar | /impli' kar/ |
| Feasible | Factible | /fak' tiβle/ |
| Null | Nulo | /' nulo/ |
| Zero | Cero | /' θero/ |
| Certificate | Certificado | /θertifi' kaðo/ |
| Residual | Residual | /resi' ðwal/ |
| Instability | Inestabilidad | /inestaβili' ðað/ |
| Upper bound | Límite superior | /' limite supe' rjor/ |
| Document | Documento | /doku' mento/ |
| Analyse | Analizar | /anali' θar/ |
| Comparison | Comparación | /kompara' θjon/ |
| Highlight | Destacar | /desta' kar/ |
| Aspect | Aspecto | /as' pekto/ |
| Determination | Determinación | /determina' θjon/ |
| Dependency | Dependencia | /depen' denθja/ |
| Classification | Clasificación | /klasifika' θjon/ |
| Harmonize | Armonizar | /armoni' θar/ |
| Content | Contenido | /konte' niðo/ |
| Accreditation | Acreditación | /akredita' θjon/ |
| Requirement | Requerimiento | /rekeri' mjento/ |
| Function | Función | /fun' θjon/ |
| Organization | Organización | /orjaniθa' θjon/ |
| Traceability | Trazabilidad | /traθaβili' ðað/ |
| Audit | Auditoría | /awðito' ria/ |
| Step | Paso | /' paso/ |
| Variance propagation law | Ley de propagación de la varianza | /' lej ðe propaja' θjon de la βa' rjanθa/ |
| Divide | Dividir | /ðiβi' ðir/ |
| Output magnitude | Magnitud de salida | /mayni' tuð ðe sa' liða/ |
| Input magnitude | Magnitud de entrada | /mayni' tuð ðe en' traða/ |
| Contribution | Contribución | /kontriβu' θjon/ |
| Model | Modelar | /moðe' lar/ |
| Standard | Estándar | /es' tandar/ |
| Arbitrary | Arbitrario | /arβi' traɾjo/ |
| Component | Componente | /kompo' nente/ |
| Source | Fuente | /' fwente/ |
| Origin | Origen | /o' rixen/ |
| Resolution | Resolución | /resolu' θjon/ |
| Square root | Raíz cuadrada | /ra' iθ kwa' ðraða/ |
| Behaviour | Comportamiento | /komporta' mjento/ |
| Property | Propiedad | /propje' ðað/ |

| | | |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Reliable | Fiable | /ˈfjaβle/ |
| Empirical relationships | Relaciones empíricas | /relaˈθjones emˈpirikas/ |
| Scarce | Escaso | /esˈkaso/ |
| Scale division | División de escala | /diβiˈsjon de esˈkala/ |
| Effect | Efecto | /eˈfek to/ |
| Fluctuate | Fluctuar | /flukˈtwar/ |
| Fraction | Fracción | /fraˈkθjon/ |
| Hypothesis | Hipótesis | /iˈpotesis/ |
| Freedom degrees | Grados de libertad | /graðo de liβertað/ |
| Expression | Expresión | /ekspreˈsjon/ |
| Maximum | Máximo | /makˈsimo/ |
| Advisable | Aconsejable | /akonseˈxaβle/ |
| System | Sistema | /sisˈtem/ |
| Discrepancy | Discrepancia | /diskrepanθja/ |
| Traceability chain | Cadena de trazabilidad | /kaðena de/ |
| Arise | Surgir | /surxir/ |
| Local calibration | Calibración local | /kaliβraˈθjon lokal/ |
| Partial calibration | Calibración parcial | /kaliβraˈθjon parθjal/ |
| Balance | Equilibrio | /ekiliβrjo/ |
| Definition level | Nivel de definición | /niβel/ |
| Convenient | Conveniente | /kombenjente/ |
| Carry out | Realizar | /realiθar/ |
| Cost | Coste | /koste/ |
| Above | Arriba | /ariβa/ |
| Following sections | Secciones siguientes | /seˈkθjon sijjente/ |
| Null correction | Corrección nula | |
| Standard uncertainty | Incertidumbre típica/estándar | /inθertiðumbre ˈtipiko/ |
| Demand | Exigir | /eksiˈxir/ |
| Capability | Capacidad | /kapaθiˈðað/ |
| Achieve | Conseguir | /konseyir/ |
| Scope | Alcance | /alkanθe/ |
| Precaution | Precaución | /prekauˈθjon/ |
| Information | Información | /imformaˈθjon/ |
| Judge | Juzgar | /xuθyar/ |
| Measurement field | Campo de medida | /kampo de meðiða/ |
| Preserve | Preservar | /preserβar/ |
| Reproduce | Reproducir | /reproðuθir/ |
| Workshop | Taller | /taʎer/ |
| Metrology laboratory | Laboratorio de metrología | /laβoratorjo/ |
| Minimise | Minimizar | /minimiθar/ |
| Keep | Conservar | /konserβar/ |
| Outlay | Desembolso | /desembolso/ |
| Machine | Máquina | /məˈʃi:n/ |
| Building | Edificio | /ˈbiʎiθjo/ |
| Door | Puerta | /ˈdo:r/ |
| Sealed | Sellado/a | /si:ld/ |
| Sunlight | Luz del sol | /ˈsʌnlait/ |

| | | |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| Double glazed | Doble acristalamiento | /ˈdʌbəl ˈgleɪzd/ |
| Airtightness | Hermeticidad | /ˈeə.taɪtnəs/ |
| Insulation | Aislamiento | /ˌɪnsjʊˈleɪʃən/ |
| Air chamber | Cámara de aire | /ˈeəˈtʃeɪmbər/ |
| Window | Ventana | /ˈwɪndəʊ/ |
| Thickness | Grosor | /ˈθɪkniːs/ |
| Rubber floor | Suelo de goma | /ˈrʌbər ˈfloːr/ |
| Ceiling | Techo | /ˈsiːlɪŋ/ |
| Noise | Ruido | /ˈnɔɪz/ |
| Lighting | Iluminación | /ˈlaɪtɪŋ/ |
| Viscosity | Viscosidad | /vɪsˈkɒsəti/ |
| Air intake | Toma de aire | /ˈeəˈɪnteɪk/ |
| Air flow | Flujo de aire | /ˈeəˈfləʊ/ |
| Air outlets | Salidas de aire | /ˈeəˈaʊtlɪt/ |
| Oxidation | Oxidación | /ˌɒksɪˈdeɪʃən/ |
| Vapour | Vapor | /ˈveɪpər/ |
| Air cleaning | Limpieza de aire | /ˈeəˈkliːnɪŋ/ |
| Ducts | Conductos | /ˈdʌkt/ |
| Air curtain | Cortina de aire | /ˈeəˈkɜːtɪn/ |
| Smoke | Humo | /ˈsməʊk/ |
| Attenuation | Atenuación | /əˈtenjʊˈeɪʃən/ |
| Glare | Destello | /ˈgleə/ |
| Power supply | Fuente de alimentación | /ˈpaʊər səˈplaɪ/ |
| Stabilisation | Estabilización | /ˌsteɪbɪləɪˈzeɪʃən/ |
| Furniture | Mueble | /ˈfɜːnɪtʃər/ |
| Mobile trolleys | Carros móviles | /ˈməʊbaɪl ˈtrɒli/ |
| Fire extinguishers | Extintores de fuego | /ˈfaɪər ɪkˈstɪŋgwɪʃər/ |
| Equipment racks | Bastidores de equipo | /ɪˈkwɪpmənt ˈræk/ |
| Irreplaceable | Irreemplazable | /ˌɪrɪˈpleɪsəbəl/ |
| Management | Gestión | /ˈmænɪdʒmənt/ |
| Archive | Archivo | /ˈɑːrkaɪv/ |
| Entity | Entidad | /ˈentɪti/ |
| Premise | Local | /ˈpremɪs/ |
| Label | Etiqueta | /ˈleɪbəl/ |
| Principle | Principio | /ˈprɪnsɪpəl/ |
| Establish | Establecer | /ɪˈstæblɪʃ/ |
| Direction | Dirección | /daɪˈrekʃən/ |
| Centre | Centro | /ˈsentər/ |
| Accessory | Accesorio | /ækˈsesəri/ |
| Arrow | Flecha | /ˈærəʊ/ |
| Review | Revisar | /rɪˈvjuː/ |
| Readapt | Readaptar | /ˈriːəˈdæpt/ |
| Identifiable | Identificable | /aɪˈdentɪˈfaɪəbəl/ |
| Protocol | Protocolo | /ˈprəʊtəʊkəl/ |
| Purpose | Propósito | /ˈpɜːps/ |
| Configuration | Configuración | /kənˈfɪɡʊˈreɪʃən/ |
| Pilot laboratory | Laboratorio piloto | /ˈpaɪlət ləˈbɒrətəri/ |
| Compatible | Compatible | /kəmˈpæɪtəbəl/ |

| | | |
|-----------------|------------------|-------------------------|
| Conformity | Conformidad | /kən'fɔ:'mɪti/ |
| Impartiality | Imparcialidad | /,ɪmpɑ:'ʃi'ælti/ |
| Legal metrology | Metrología legal | /'li:gəl mɪ'trɒl.ə.dʒi/ |
| Transactions | Transacción | /træn'zækʃn/ |
| Transparency | Transparencia | /træns'pærənsi/ |
| Consumer | Consumidor | /kən'sju:məʔ/ |
| Health | Salud | /'helθ/ |
| Commissioning | Puesta en marcha | /kə'mɪʃ.ənɪŋ/ |
| Body | Organismo | /'bɒdi/ |
| Market | Mercado | /'mɑ:'kɪt/ |
| Service | Servicio | /'sɜ:vɪs/ |
| Regulation | Regulación | /,rɛgju'leɪʃn/ |

3 ANEXO III

INDEX

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ANEXO III | 0 |
| 2 | Figure index | 2 |
| 3 | Table index | 2 |
| 4 | Objective | 3 |
| 5 | Scope..... | 4 |
| 6 | Definitions | 4 |
| 6.1 | Terminology | 5 |
| 6.1.1 | Ratchet: | 5 |
| 6.1.2 | Thimble:..... | 5 |
| 6.1.3 | Sleeve: | 5 |
| 6.1.4 | Spindle: | 5 |
| 6.1.5 | Anvil:..... | 6 |
| 6.1.6 | Thermal insulator: | 6 |
| 6.1.7 | Lock:..... | 6 |
| 6.1.8 | Measurement range:..... | 6 |
| 6.1.9 | Division scale:..... | 6 |
| 7 | Process description..... | 7 |
| 7.1 | Materials and equipment | 7 |
| 7.2 | Calibration conditions | 8 |
| 7.2.1 | Longitudinal gauge blocks preparation..... | 8 |
| 7.3 | Calibration procedure | 9 |
| 7.4 | Data processing | 11 |
| 8 | Results..... | 0 |

2 Figure index

| | |
|--|----|
| Figure 1. Outside micrometer (1)..... | 4 |
| Figure 2. Outside micrometer (2)..... | 5 |
| Figure 3. Measuring equipment and supporting instrument..... | 7 |
| Figure 4. Preparatory materials | 7 |
| Figure 5. Calibration situation..... | 9 |
| Figure 6. Measuring reading | 9 |
| Figure 7. One of the gauge blocks used..... | 10 |

3 Table index

| | |
|--|---|
| Table 1. Environmental conditions..... | 8 |
|--|---|

| | |
|--|----|
| Table 2. Calibration points | 10 |
| Table 3. Chauvenet criterion application (First iteration)..... | 11 |
| Table 4. Data obtained from the first iteration..... | 11 |
| Table 5. Valid and invalid values (First iteration)..... | 11 |
| Table 6. Chauvenet criterion application (Second iteration)..... | 12 |
| Table 7. Data obtained from the second iteration | 12 |
| Table 8. Valid and invalid values (Second iteration)..... | 12 |
| Table 9. Chauvenet criterion application (Third iteration) | 13 |
| Table 10. Data obtained from the third iteration | 13 |
| Table 11. Valid and invalid values (Third iteration)..... | 13 |
| Table 12. Results template | 14 |
| Table 13. Gauge block uncertainty and variance | 15 |
| Table 14. Influence magnitudes..... | 15 |
| Table 15. Nº 1 Calibration point uncertainties and variances | 16 |
| Table 16. Nº 2 Calibration point uncertainties and variances | 16 |
| Table 17. Nº 3 Calibration point uncertainties and variances | 16 |
| Table 18. Nº 4 Calibration point uncertainties and variances | 17 |
| Table 19. Nº 5 Calibration point uncertainties and variances | 17 |
| Table 20. Nº 6 Calibration point uncertainties and variances..... | 17 |
| Table 21. Nº 7 Calibration point uncertainties and variances | 17 |
| Table 22. Nº 8 Calibration point uncertainties and variances | 18 |
| Table 23. Nº 9 Calibration point uncertainties and variances | 18 |
| Table 24. Nº 10 Calibration point uncertainties and variances | 18 |
| Table 25. Nº 11 Calibration point uncertainties and variances | 18 |
| Table 26. Null correction and constant uncertainty for the entire I measurement range..... | 19 |
| Table 27. Constant correction and uncertainty | 20 |
| Table 28. Null correction and constant uncertainty for the entire II measurement range | 21 |

4 Objective

The purpose of the following Calibration Report is to determine the global measurement uncertainty of some of the equipment available in the Metrology and Quality laboratory, located in the building next to the School of Industrial Engineering. The equipment chosen for the study is a two-contact outside micrometer, coded as group D.02.10 according to the Dimensional Metrology Instruments Classification provided by the (CEM) Spanish Metrology Center. In addition, this report is written in English to emphasize the importance of this language, since working in any international company requires a good knowledge of it and, therefore, an understanding of the work jargon being performed. In addition, this report will help international students to have a better understanding of the Metrology and Quality course by having a practical example available in the common language. It will also increase the interest of national students to study engineering in English and increase the university excellence.

5 Scope

This report provides a detailed and accurate evaluation of the precision and accuracy of a two-contact outside micrometer. In addition, it demonstrates that the micrometer is functioning properly and can provide reliable and accurate measurements. The calibration process used in this report can be extrapolated to the calculation of uncertainties of any other model of two-contact outside micrometer, for example, with different measuring range or division scale. Thus, inside micrometers and depth micrometers are excluded from the procedures in this document. Furthermore, this report demonstrates the understanding and application of calibration concepts, providing an objective evaluation of the micrometer and ensuring that it meets the accuracy standards required for its proper use.

6 Definitions

To have an overview of the parts that make up the two-contact outside micrometer that we are going to work with, the following images are shown:

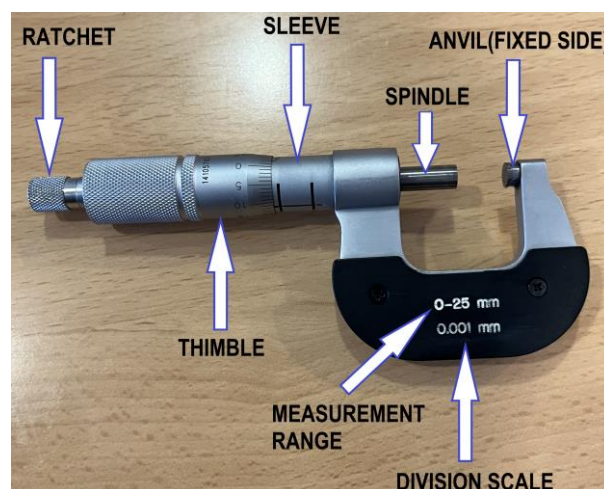


Figure 1. Outside micrometer(1)

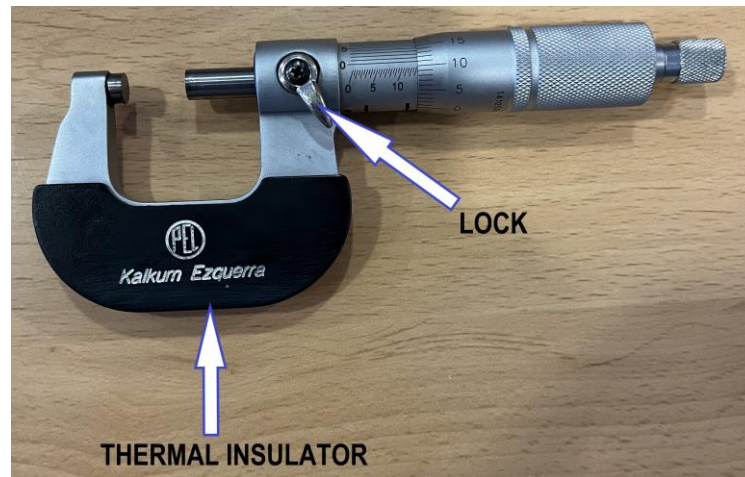


Figure 2. Outside micrometer(2)

6.1 Terminology

6.1.1 Ratchet:

It is designed to ensure consistent and accurate measurements by preventing over-tightening or excessive force application. The ratchet mechanism typically consists of a toothed wheel or gear connected to the rotating part of the measuring instrument, such as the thimble in a micrometer. When using a micrometer, the ratchet mechanism engages to allow smooth rotation in the tightening direction, ensuring proper contact and measurement. However, when attempting to rotate the thimble in the opposite direction, the ratchet prevents movement to maintain the measurement without accidental adjustments.

6.1.2 Thimble:

It is a rotating sleeve or barrel that contains markings or a scale used for precise measurement. The thimble is typically located at the end of the spindle and can be rotated to adjust the position of the measuring anvils or jaws. When taking a measurement, the object being measured is placed between the measuring jaws or anvils, and the thimble is rotated to bring the jaws into contact with the object. As the thimble is turned, the scale or markings on the thimble align with a fixed reference scale, providing an accurate measurement.

6.1.3 Sleeve:

The sleeve refers to the cylindrical outer part of the micrometer's frame that houses the thimble and provides support for its rotation. The sleeve is typically stationary and acts as a guide for the movement of the thimble.

6.1.4 Spindle:

The spindle is the movable part that is connected to the anvil or measuring jaws. By rotating the spindle using the thimble or sleeve, the anvil moves towards or away from the object being measured, allowing for precise dimensional measurements.

6.1.5 Anvil:

In a micrometer, the anvil is a flat or rounded surface located opposite the spindle. The object being measured is positioned between the anvil and the spindle, and as the spindle moves towards the anvil when the thimble is rotated, it applies pressure to measure the dimensions of the object.

6.1.6 Thermal insulator:

It is a material or device that minimizes the transfer of heat. It is typically used to protect sensitive instruments or measurement setups from external temperature fluctuations that could affect their accuracy.

6.1.7 Lock:

It refers to the process of fixing or securing a measurement system or instrument in a specific state or configuration. The purpose of locking is to ensure the stability and reproducibility of measurements by preventing unwanted changes or variations.

6.1.8 Measurement range:

It refers to the span of values within which a measuring instrument or system can accurately and reliably measure a physical quantity. It defines the minimum and maximum values that can be measured with acceptable accuracy and precision.

6.1.9 Division scale:

It refers to the markings or graduations on a measuring instrument or scale that are used to interpret or read measurements. These divisions are typically evenly spaced and represent specific units of measurement. It is crucial for obtaining accurate measurements by aligning the object being measured with the appropriate division and reading the corresponding value. The readability or resolution of the division scale determines the smallest increment that can be accurately measured or read on the instrument.

7 Process description

7.1 Materials and equipment

To perform the calibration of the two-contact outside micrometer, longitudinal gauge blocks, alcohol, vaselin, a cloth and a holder will be used. Images of the above are shown below:

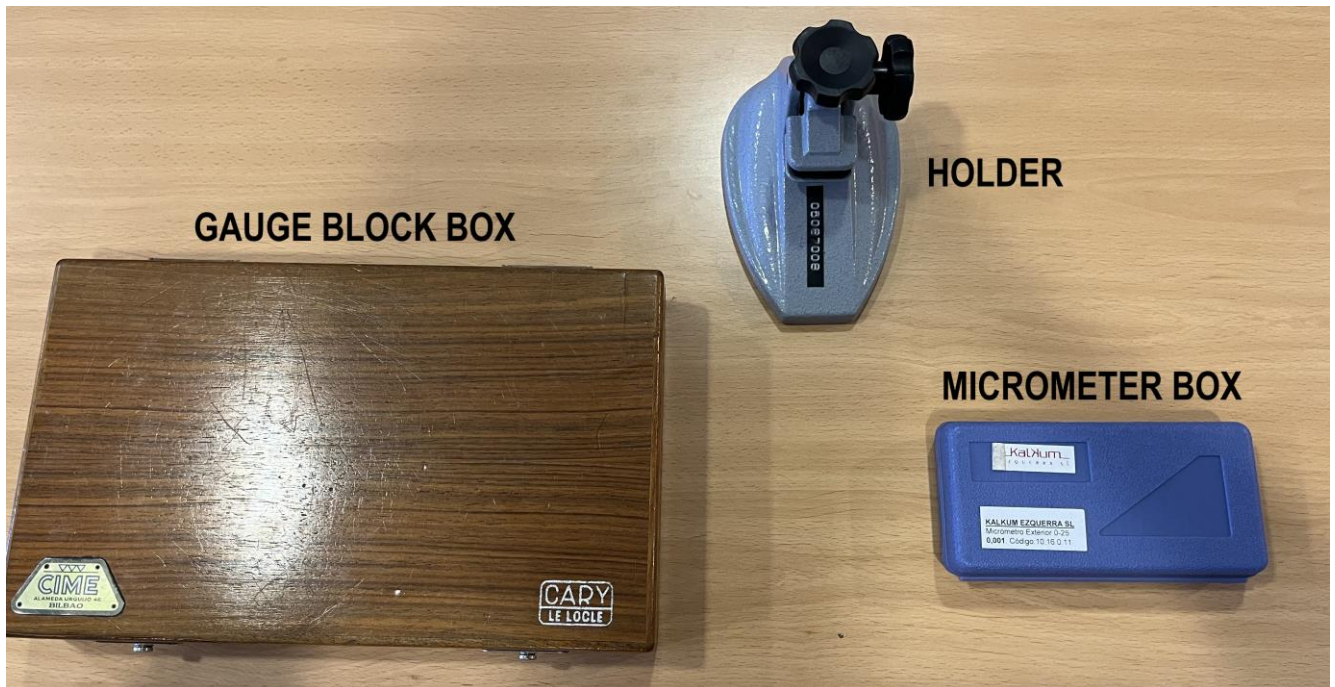


Figure 3. Measuring equipment and supporting instrument

The image above shows the main instruments for the calibration report.



Figure 4. Preparatory materials

The image above shows equipment needed for calibration preparation.

7.2 Calibration conditions

Taking into account the following premises, the calibration has been carried out:

Table 1. Environmental conditions

| Conditions | Dimensional Metrology |
|---------------------|---|
| Temperature | Interferometry zone: $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ Calibration zone: $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ Measurement zone: $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| | Temperature fluctuations= $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ In standard laboratories= $2^{\circ}\text{C}/4\text{ horas}$ |
| Relative humidity | 50% maximum 40% minimum due to physiological reasons |
| Dust | Retain particles larger than 1 micrometre 200 particles maximum per cm^3 |
| Air flow rate | Carry out from 10 to 20 changes per hour 10 to 20 % clear air injection Maximum speed at the workplace: 0,15 m/s |
| Static overpressure | From 12,5 to 25 Pa |
| Vibrations | At a frequency of 200 Hz the maximum acceleration is 0,003 g |
| Noise | 60 dB maximum |
| Lighting | In general from 800 to 1000 lux at the workplace 550 lux minimum at any point in the laboratory Fluorescent lamps with diffuser |
| Earthing | Restricted for the laboratory |

7.2.1 Longitudinal gauge blocks preparation

The longitudinal gauge blocks chosen for calibration are removed from their box and cleaned with a cloth that has been dampened with alcohol. In this way, errors in the calibration are avoided by a bad preparation, since the standards are kept in the box with vaselin, which has a thickness. This vaselin is used to protect them from oxidation and corrosion. It creates a protective layer around the blocks, preventing them from coming into contact with air and moisture, which can cause damage to the gauge block material. In addition, vaselin helps prevent the accumulation of dirt and particles on the surface of the blocks, which could affect the measurements accuracy. By applying a thin layer of vaselin, a barrier is created between the blocks and the environment, preserving their quality and accuracy over time.

7.3 Calibration procedure

The micrometer is then placed in the holder and measurements are taken:



Figure 5. Calibration situation



Figure 6. Measuring reading

In the image above, the longitudinal gauge block used is 5 mm. An image of it is shown below:



Figure 7. One of the gauge blocks used

In this way, measurements have been taken from up to 11 points on the micrometer scale. These points have been chosen so that their nominal values are equidistant. In addition, 12 measurements have been made for each point in order to obtain an accurate estimate of the variability and error associated with the instrument. This approach is based on the use of statistics and probabilities to obtain a more reliable assessment of the instrument measurement characteristics.

By making multiple measurements, sufficient data can be obtained to calculate statistical parameters such as mean, standard deviation and other indicators of variability. These parameters provide information on the average behavior and dispersion of the measurements made by the instrument. In addition, making a sufficient number of measurements makes it possible to identify possible sources of error, such as random variations, systematic errors or environmental influences.

Table 2. Calibration points

| Calibration Points | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Nominal values(mm) | 1,11 | 2,50 | 2,80 | 5,00 | 7,47 | 10,09 | 14,50 | 17,00 | 20,00 | 23,00 | 24,5 |

7.4 Data processing

Having performed a number of repetitions N=12, for each calibration point, we can continue the data processing with up to 10 valid measurements. This verification whose measurements are valid is performed by applying the Chauvenet criterion, which identifies and discards measurements that can be considered as outliers or inconsistent values. This criterion is based on the calculation of the standard deviation of measurements set and establishes a limit at which a measurement is considered to be outside the expected.

A table with the measurements obtained for each calibration point is shown below:

Table 3. Chauvenet criterion application (First iteration)

| CHAUVENET CRITERION | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1º ITERATION | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 1,113 | 2,502 | 2,801 | 5,001 | 7,471 | 10,094 | 14,502 | 17,001 | 20,001 | 23,001 | 24,501 |
| 2 | 1,112 | 2,503 | 2,804 | 5,002 | 7,473 | 10,091 | 14,502 | 17,002 | 20,001 | 23,002 | 24,502 |
| 3 | 1,113 | 2,503 | 2,802 | 5,002 | 7,474 | 10,092 | 14,501 | 17,004 | 20,002 | 23,002 | 24,501 |
| 4 | 1,114 | 2,502 | 2,805 | 5,003 | 7,472 | 10,096 | 14,501 | 17,001 | 20,002 | 23,002 | 24,502 |
| 5 | 1,113 | 2,504 | 2,803 | 5,001 | 7,473 | 10,092 | 14,502 | 17,005 | 20,005 | 23,001 | 24,501 |
| 6 | 1,113 | 2,504 | 2,807 | 5,001 | 7,471 | 10,092 | 14,503 | 17,002 | 20,004 | 23,001 | 24,502 |
| 7 | 1,114 | 2,505 | 2,804 | 5,003 | 7,472 | 10,091 | 14,503 | 17,003 | 20,002 | 23,001 | 24,502 |
| 8 | 1,112 | 2,503 | 2,805 | 5,002 | 7,473 | 10,094 | 14,501 | 17,004 | 20,001 | 23,002 | 24,503 |
| 9 | 1,113 | 2,502 | 2,804 | 5,002 | 7,472 | 10,092 | 14,501 | 17,002 | 20,002 | 23,002 | 24,501 |
| 10 | 1,113 | 2,502 | 2,803 | 5,001 | 7,471 | 10,093 | 14,502 | 17,001 | 20,001 | 23,001 | 24,502 |
| 11 | 1,114 | 2,503 | 2,802 | 5,001 | 7,473 | 10,094 | 14,502 | 17,001 | 20,002 | 23,001 | 24,501 |
| 12 | 1,114 | 2,504 | 2,802 | 5,005 | 7,474 | 10,093 | 14,501 | 17,002 | 20,001 | 23,001 | 24,502 |

Table 4. Data obtained from the first iteration

| | | | | | | | | | | | |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Mean | 1,113166667 | 2,503083333 | 2,803500000 | 5,002000000 | 7,472416667 | 10,092833333 | 14,501750000 | 17,002333333 | 20,002000000 | 23,001416667 | 24,501666667 |
| S | 0,00071774 | 0,0009962 | 0,00167874 | 0,00120605 | 0,00108362 | 0,001466804 | 0,000753778 | 0,001370689 | 0,001279204 | 0,000514929 | 0,000651339 |
| k(n=12) | 2,04 | | | | | | | | | | |
| k*S | 0,00146419 | 0,00203226 | 0,00342464 | 0,00246033 | 0,00221059 | 0,002992281 | 0,001537708 | 0,002796205 | 0,002609577 | 0,001050454 | 0,001328731 |
| mq | 1,11170 | 2,50105 | 2,80008 | 4,99954 | 7,47021 | 10,08984 | 14,50021 | 16,99954 | 19,99939 | 23,00037 | 24,50034 |
| Mq | 1,11463 | 2,50512 | 2,80692 | 5,00446 | 7,47463 | 10,09583 | 14,50329 | 17,00513 | 20,00461 | 23,00247 | 24,50300 |

With the calculations obtained, it has to be checked which values should be discarded as invalid:

Table 5. Valid and invalid values (First iteration)

| | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 1,113 | 2,502 | 2,801 | 5,001 | 7,471 | 10,094 | 14,502 | 17,001 | 20,001 | 23,001 | 24,501 |
| 2 | 1,112 | 2,503 | 2,804 | 5,002 | 7,473 | 10,091 | 14,502 | 17,002 | 20,001 | 23,002 | 24,502 |
| 3 | 1,113 | 2,503 | 2,802 | 5,002 | 7,474 | 10,092 | 14,501 | 17,004 | 20,002 | 23,002 | 24,501 |
| 4 | 1,114 | 2,502 | 2,805 | 5,003 | 7,472 | 10,096 | 14,501 | 17,001 | 20,002 | 23,002 | 24,502 |
| 5 | 1,113 | 2,504 | 2,803 | 5,001 | 7,473 | 10,092 | 14,502 | 17,005 | 20,005 | 23,001 | 24,501 |
| 6 | 1,113 | 2,504 | 2,807 | 5,001 | 7,471 | 10,092 | 14,503 | 17,002 | 20,004 | 23,001 | 24,502 |
| 7 | 1,114 | 2,505 | 2,804 | 5,003 | 7,472 | 10,091 | 14,503 | 17,003 | 20,002 | 23,001 | 24,502 |
| 8 | 1,112 | 2,503 | 2,805 | 5,002 | 7,473 | 10,094 | 14,501 | 17,004 | 20,001 | 23,002 | 24,503 |
| 9 | 1,113 | 2,502 | 2,804 | 5,002 | 7,472 | 10,092 | 14,501 | 17,002 | 20,002 | 23,002 | 24,501 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10 | 1,113 | 2,502 | 2,803 | 5,001 | 7,471 | 10,093 | 14,502 | 17,001 | 20,001 | 23,001 | 24,502 |
| 11 | 1,114 | 2,503 | 2,802 | 5,001 | 7,473 | 10,094 | 14,502 | 17,001 | 20,002 | 23,001 | 24,501 |
| 12 | 1,114 | 2,504 | 2,802 | 5,005 | 7,474 | 10,093 | 14,501 | 17,002 | 20,001 | 23,001 | 24,502 |

We then discarded the red values and performed the same procedure for the calibration points where there was a red (invalid) value to check that the remaining 11 values are valid.

Table 6. Chauvenet criterion application (Second iteration)

| 2º ITERATION | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------------|---|---|-------|-------|---|--------|---|---|--------|----|----|
| 1 | | | 2,801 | 5,001 | | 10,094 | | | 20,001 | | |
| 2 | | | 2,804 | 5,002 | | 10,091 | | | 20,001 | | |
| 3 | | | 2,802 | 5,002 | | 10,092 | | | 20,002 | | |
| 4 | | | 2,805 | 5,003 | | 10,092 | | | 20,002 | | |
| 5 | | | 2,803 | 5,001 | | 10,092 | | | 20,004 | | |
| 6 | | | 2,804 | 5,001 | | 10,091 | | | 20,002 | | |
| 7 | | | 2,805 | 5,003 | | 10,094 | | | 20,001 | | |
| 8 | | | 2,804 | 5,002 | | 10,092 | | | 20,002 | | |
| 9 | | | 2,803 | 5,002 | | 10,093 | | | 20,001 | | |
| 10 | | | 2,802 | 5,001 | | 10,094 | | | 20,002 | | |
| 11 | | | 2,802 | 5,001 | | 10,093 | | | 20,001 | | |

Table 7. Data obtained from the second iteration

| | | | | | | | | | | |
|---------|---|-------------|-------------|--|--------------|--|--|--------------|--|--|
| Mean | | 2,803181818 | 5,001727273 | | 10,092545455 | | | 20,001727273 | | |
| S | | 0,00132802 | 0,00078625 | | 0,001128152 | | | 0,000904534 | | |
| k(n=11) | 2 | | | | | | | | | |
| k*S | | 0,00265604 | 0,00157249 | | 0,002256304 | | | 0,001809068 | | |
| mq | | 2,800525779 | 5,000154782 | | 10,09028915 | | | 19,99991820 | | |
| Mq | | 2,805837858 | 5,003299764 | | 10,09480176 | | | 20,00353634 | | |

With the calculations obtained, it has to be checked which values should be discarded as invalid:

Table 8. Valid and invalid values (Second iteration)

| | | | | | | | | | | | |
|----|--|--|-------|-------|--|--------|--|--|--------|--|--|
| 1 | | | 2,801 | 5,001 | | 10,094 | | | 20,001 | | |
| 2 | | | 2,804 | 5,002 | | 10,091 | | | 20,001 | | |
| 3 | | | 2,802 | 5,002 | | 10,092 | | | 20,002 | | |
| 4 | | | 2,805 | 5,003 | | 10,092 | | | 20,002 | | |
| 5 | | | 2,803 | 5,001 | | 10,092 | | | 20,004 | | |
| 6 | | | 2,804 | 5,001 | | 10,091 | | | 20,002 | | |
| 7 | | | 2,805 | 5,003 | | 10,094 | | | 20,001 | | |
| 8 | | | 2,804 | 5,002 | | 10,092 | | | 20,002 | | |
| 9 | | | 2,803 | 5,002 | | 10,093 | | | 20,001 | | |
| 10 | | | 2,802 | 5,001 | | 10,094 | | | 20,002 | | |
| 11 | | | 2,802 | 5,001 | | 10,093 | | | 20,001 | | |

It can be seen that there is still one value that is not valid, corresponding to n° 10 calibration point. Thus, it is necessary to repeat the process for this point:

Table 9. Chauvenet criterion application (Third iteration)

| 3º ITERATION | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|--------|----|----|
| 1 | | | | | | | | | 20,001 | | |
| 2 | | | | | | | | | 20,001 | | |
| 3 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 4 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 5 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 6 | | | | | | | | | 20,001 | | |
| 7 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 8 | | | | | | | | | 20,001 | | |
| 9 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 10 | | | | | | | | | 20,001 | | |

Table 10. Data obtained from the third iteration

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|------|--|--|--|--|--|--|--|--------------|--|--|
| Mean | | | | | | | | | 20,001500000 | | |
| S | | | | | | | | | 0,000527046 | | |
| k(n=10) | 1,96 | | | | | | | | | | |
| k*S | | | | | | | | | 0,001033011 | | |
| m _q | | | | | | | | | 20,00046699 | | |
| M _q | | | | | | | | | 20,00253301 | | |

With the calculations obtained, it has to be checked which values should be discarded as invalid:

Table 11. Valid and invalid values (Third iteration)

| | | | | | | | | | | | |
|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--------|--|--|
| 1 | | | | | | | | | 20,001 | | |
| 2 | | | | | | | | | 20,001 | | |
| 3 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 4 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 5 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 6 | | | | | | | | | 20,001 | | |
| 7 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 8 | | | | | | | | | 20,001 | | |
| 9 | | | | | | | | | 20,002 | | |
| 10 | | | | | | | | | 20,001 | | |

Finally, all the values are valid. Thus, the following table is obtained:

Table 12. Results template

| Total calibration points | I = | 11 | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|----|
| N measurements at each point | J = | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Scale division: E (mm) = | | | | | 0,001 | Measurement range = | | 0-25 mm | | | | | |
| Calibration points | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
| Nominal values (mm) | 1,110 | 2,500 | 2,800 | 5 | 7,470 | 10,090 | 14,500 | 17 | 20,000 | 23,000 | 24,5 | | |
| Nominal lengths of gauge block used (mm) | 1,11 | 2,5 | 1,5+1,3 | 5 | 6+1,47 | 9+1,09 | 10+4,5 | 10+4+3 | 20 | 20+3 | 20+4,5 | | |
| Standard gauge block uncertainty: u_{ci}^2 (μm) | 0,0045437 | 0,0046694 | 0,0046968 | 0,0049000 | 0,0051332 | 0,0053866 | 0,0058268 | 0,0060840 | 0,0064000 | 0,0067240 | 0,0068890 | | |
| Outside micrometer indications when measuring gauge blocks: q_{ck} (mm) | 1,113 | 2,502 | 2,801 | 5,001 | 7,471 | 10,094 | 14,502 | 17,001 | 20,001 | 23,001 | 24,501 | | |
| | 1,112 | 2,503 | 2,804 | 5,002 | 7,473 | 10,091 | 14,502 | 17,002 | 20,001 | 23,002 | 24,502 | | |
| | 1,113 | 2,503 | 2,802 | 5,002 | 7,474 | 10,092 | 14,501 | 17,004 | 20,002 | 23,002 | 24,501 | | |
| | 1,114 | 2,502 | 2,805 | 5,003 | 7,472 | 10,092 | 14,501 | 17,001 | 20,002 | 23,002 | 24,502 | | |
| | 1,113 | 2,504 | 2,803 | 5,001 | 7,473 | 10,092 | 14,502 | 17,005 | 20,002 | 23,001 | 24,501 | | |
| | 1,113 | 2,504 | 2,804 | 5,001 | 7,471 | 10,091 | 14,503 | 17,002 | 20,001 | 23,001 | 24,502 | | |
| | 1,114 | 2,505 | 2,805 | 5,003 | 7,472 | 10,094 | 14,503 | 17,003 | 20,002 | 23,001 | 24,502 | | |
| | 1,112 | 2,503 | 2,804 | 5,002 | 7,473 | 10,092 | 14,501 | 17,004 | 20,001 | 23,002 | 24,503 | | |
| | 1,113 | 2,502 | 2,803 | 5,002 | 7,472 | 10,093 | 14,501 | 17,002 | 20,002 | 23,002 | 24,501 | | |
| | 1,113 | 2,502 | 2,802 | 5,001 | 7,471 | 10,094 | 14,502 | 17,001 | 20,001 | 23,001 | 24,502 | | |
| 1,114 | 2,503 | 2,802 | 5,001 | 7,473 | 10,093 | 14,502 | 17,001 | | 23,001 | 24,501 | | | |
| 1,114 | 2,504 | | | 7,474 | | 14,501 | 17,002 | | 23,001 | 24,502 | | | |
| Mean value: \bar{X}_j (mm) | 1,113166667 | 2,503083333 | 2,803181818 | 5,001727273 | 7,472416667 | 10,092545455 | 14,501750000 | 17,002333333 | 20,001500000 | 23,001416667 | 24,501666667 | | |
| Local correction: Δx_{ci} (mm) | -0,004 | -0,003 | -0,004 | -0,002 | -0,003 | -0,003 | -0,002 | -0,003 | -0,002 | -0,002 | -0,002 | | |
| Standard deviation: $S_{q_{ck}}$ (mm) | 0,000717741 | 0,000996205 | 0,00132802 | 0,000786245 | 0,001083625 | 0,001128152 | 0,000753778 | 0,001370689 | 0,000527046 | 0,000514929 | 0,000651339 | | |
| Interval | 1,111702476 | 2,501051075 | 2,800525779 | 5,000154782 | 7,470206072 | 10,09028915 | 14,50021229 | 16,99953713 | 20,00046699 | 23,00036621 | 24,50033794 | | |
| | 1,114630857 | 2,505115591 | 2,805837858 | 5,003299764 | 7,474627261 | 10,09480176 | 14,50328771 | 17,00512954 | 20,00253301 | 23,00246712 | 24,5029954 | | |

Where the only data that have not appeared so far are:

- The longitudinal gauge blocks standard uncertainty, for which the following formulas have to be applied:

$$U(\mu\text{m}) = \pm (0,20 + 0,002 \cdot L(\text{mm})) \quad (k=3)$$

$$u = \frac{U}{k}$$

Once the uncertainty of each gauge block has been calculated, its variance is calculated. It should be noted that in cases where more than one gauge block has been used, Variance Propagation Law has been applied.

- The local correction, which is the difference between the nominal length of the gauge block used and the average of the values obtained. It is important to know that this value has been rounded using the 5% rule.

A table with the uncertainty and variance calculations of the gauge blocks is shown below:

| Calibration point | Scale point (Nominal length) | Nominal value (mm) | | | Global use uncertainty (U _i) | | | k | Gauge block variance (µm) |
|-------------------|------------------------------|--------------------|-------|------|--|------------|------------|------|---------------------------|
| | | | | | | | | | |
| 1 | 1,110 | 1,11 | | | 0,20222000 | | | 3,00 | 0,06740667 |
| 2 | 2,500 | 2,50 | | | 0,20500000 | | | 3,00 | 0,06833333 |
| 3 | 2,800 | 1,50 | 1,30 | | 0,20300000 | 0,20260000 | | 3,00 | 0,09560088 |
| 4 | 5 | 5,00 | | | 0,21000000 | | | 3,00 | 0,07000000 |
| 5 | 7,470 | 6,00 | 1,47 | | 0,21200000 | 0,20294000 | | 3,00 | 0,09782561 |
| 6 | 10,090 | 9,00 | 1,09 | | 0,21800000 | 0,20218000 | | 3,00 | 0,09910755 |
| 7 | 14,500 | 10,00 | 4,50 | | 0,22000000 | 0,20900000 | | 3,00 | 0,10114950 |
| 8 | 17 | 10,00 | 4,000 | 3,00 | 0,22000000 | 0,20800000 | 0,20600000 | 3,00 | 0,12206556 |
| 9 | 20,000 | 20,00 | | | 0,24000000 | | | 3,00 | 0,08000000 |
| 10 | 23,000 | 20,00 | 3,00 | | 0,24000000 | 0,20600000 | | 3,00 | 0,10542823 |
| 11 | 24,500 | 20,00 | 4,50 | | 0,24000000 | 0,20900000 | | 3,00 | 0,10608225 |

Table 13. Gauge block uncertainty and variance

It should be noted that this uncertainty is only one of the many uncertainties that must be taken into account in the uncertainty balance. A table with all of them is shown below:

Table 14. Influence magnitudes

| Influence magnitudes | Magnitude X_m | Estimation x_m | Standard uncertainty $u(x)$ | Probability distribution | Sensivity coefficient | Uncertainty contributions Estimated variance $u^2(c_i)$ |
|-----------------------------|-----------------|------------------|--|--------------------------|-----------------------|--|
| Reference (Gauge blocks) | X_{0i} | x_{0i} | $u(x_i) = \frac{U_0}{k}$ | Normal | 1 | $u_0^2 = \left(\frac{U_0}{k}\right)^2$ For more than 1 gauge block \rightarrow $u_0^2 = u_1^2 + u_2^2 + \dots$ |
| Repeatability | x_c | x_c | Calibration $u(x_i) = \frac{s(q_{ck})}{\sqrt{n}}$ | Normal | -1 | $s^2(x_i) = \frac{s^2(q_{ck})}{n}$ |
| | x' | x' | Measuring $u(x_i) = \frac{s(q_{ck})}{\sqrt{m}}$ | | 1 | $s^2(x') = \frac{s^2(q_{ck})}{m}$ |
| Scale division | c_E | 0 | $u(c_E) = \frac{E/2}{\sqrt{3}}$ | Rectangular | 1 | $u^2(c_E) = \frac{(E/2)^2}{3}$ |
| Temperature variation | $c_{\Delta L}$ | 0 | $u(c_{\Delta L}) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha \cdot L \cdot \Delta T}{\sqrt{3}}$ | Rectangular | 1 | Calibration $u_{(c.a.c)}^2 = \frac{(\alpha \cdot L \cdot \Delta T)_{cal}^2}{3}$ |
| | | | | | | Measuring $u_{(c.a.m)}^2 = \frac{(\alpha \cdot L \cdot \Delta T)_{mea}^2}{3}$ |

To make the uncertainties calculation easier, an Excel sheet has been made for each calibration point, as shown below for nº 1 calibration point:

Table 15. Nº 1 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|---|
| Reference | x01 | 1,11 | 0,0000674067 | Normal | 1 | 4,543659E-09 |
| | x02 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | x _c | 1,113166667 | 0,000207194 | Normal | 1 | 4,29293E-08 |
| | x' | 1,113166667 | 0,000717741 | Normal | -1 | 5,15152E-07 |
| Scale division | c _E | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | c _{ΔT} | 0 | 3,68494E-06 | Rectangular | 1 | 1,35788E-11 |
| | | | 1,47398E-05 | | | 2,1726E-10 |
| Correction | Δx _c | -0,004 | -0,002309401 | Rectangular | 1 | 5,33333E-06 |

Nº 2 calibration point:

Table 16. Nº 2 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 2,5 | 0,0000683333 | Normal | 1 | 4,669444E-09 |
| | x02 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 2,503083333 | 0,00028758 | Normal | 1 | 8,2702E-08 |
| | x' | 2,503083333 | 0,000996205 | Normal | -1 | 9,92424E-07 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 8,29941E-06 | Rectangular | 1 | 6,88802E-11 |
| | | | 3,31976E-05 | | | 1,10208E-09 |
| Correction | Δxc | -0,003 | -0,001732051 | Rectangular | 1 | 0,000003 |

Nº 3 calibration point:

Table 17. Nº 3 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 1,5 | 0,0000676667 | Normal | 1 | 4,578778E-09 |
| | x02 | 1,3 | 6,75333E-05 | Normal | 1 | 4,56075E-09 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 2,803181818 | 0,000400413 | Normal | 1 | 1,60331E-07 |
| | x' | 2,803181818 | 0,00132802 | Normal | -1 | 1,76364E-06 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 9,29534E-06 | Rectangular | 1 | 8,64033E-11 |
| | | | 3,71814E-05 | | | 1,38245E-09 |
| Correction | Δxc | -0,004 | -0,002309401 | Rectangular | 1 | 5,33333E-06 |

Nº 4 calibration point:

Table 18. Nº 4 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 5 | 0,0000700000 | Normal | 1 | 4,900000E-09 |
| | x02 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 5,001727273 | 0,000237062 | Normal | 1 | 5,61983E-08 |
| | x' | 5,001727273 | 0,000786245 | Normal | -1 | 6,18182E-07 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 1,65988E-05 | Rectangular | 1 | 2,75521E-10 |
| | | | 6,63953E-05 | | | 4,40833E-09 |
| Correction | Δxc | -0,002 | -0,001154701 | Rectangular | 1 | 1,33333E-06 |

Nº 5 calibration point:

Table 19. Nº 5 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 6 | 0,0000706667 | Normal | 1 | 4,993778E-09 |
| | x02 | 1,47 | 6,76467E-05 | Normal | 1 | 4,57607E-09 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 7,472416667 | 0,000312815 | Normal | 1 | 9,78535E-08 |
| | x' | 7,472416667 | 0,001083625 | Normal | -1 | 1,17424E-06 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 2,47986E-05 | Rectangular | 1 | 6,14972E-10 |
| | | | 9,91945E-05 | | | 9,83956E-09 |
| Correction | Δxc | -0,003 | -0,001732051 | Rectangular | 1 | 0,000003 |

Nº 6 calibration point:

Table 20. Nº 6 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 9 | 0,0000726667 | Normal | 1 | 5,28044E-09 |
| | x02 | 1,09 | 6,73933E-05 | Normal | 1 | 4,54186E-09 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 10,092545455 | 0,000340151 | Normal | 1 | 1,15702E-07 |
| | x' | 10,092545455 | 0,001128152 | Normal | -1 | 1,27273E-06 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 3,34964E-05 | Rectangular | 1 | 1,12201E-09 |
| | | | 0,000133986 | | | 1,79522E-08 |
| Correction | Δxc | -0,003 | -0,001732051 | Rectangular | 1 | 0,000003 |

Nº 7 calibration point:

Table 21. Nº 7 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 10 | 0,0000733333 | Normal | 1 | 5,377778E-09 |
| | x02 | 4,5 | 6,96667E-05 | Normal | 1 | 4,85344E-09 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 14,501750000 | 0,000217597 | Normal | 1 | 4,73485E-08 |
| | x' | 14,501750000 | 0,000753778 | Normal | -1 | 5,68182E-07 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 4,81366E-05 | Rectangular | 1 | 2,31713E-09 |
| | | | 0,000192546 | | | 3,70741E-08 |
| Correction | Δxc | -0,002 | -0,001154701 | Rectangular | 1 | 1,33333E-06 |

Nº 8 calibration point:

Table 22. Nº 8 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 10 | 0,0000733333 | Normal | 1 | 5,377778E-09 |
| | x02 | 4 | 6,93333E-05 | Normal | 1 | 4,80711E-09 |
| | x03 | 3 | 6,86667E-05 | Normal | 1 | 4,71511E-09 |
| Repeatability | xc | 17,002333333 | 0,000395684 | Normal | 1 | 1,56566E-07 |
| | x' | 17,002333333 | 0,001370689 | Normal | -1 | 1,87879E-06 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 5,6436E-05 | Rectangular | 1 | 3,18502E-09 |
| | | | 0,000225744 | | | 5,09603E-08 |
| Correction | Δxc | -0,003 | -0,001732051 | Rectangular | 1 | 0,000003 |

Nº 9 calibration point:

Table 23. Nº 9 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 20 | 0,001000000 | Normal | 1 | 1,000000E-06 |
| | x02 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 20,001500000 | 0,000166667 | Normal | 1 | 2,77778E-08 |
| | x' | 20,001500000 | 0,000527046 | Normal | -1 | 2,77778E-07 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 6,63953E-05 | Rectangular | 1 | 4,40833E-09 |
| | | | 0,000265581 | | | 7,05333E-08 |
| Correction | Δxc | -0,002 | -0,001154701 | Rectangular | 1 | 1,33333E-06 |

Nº 10 calibration point:

Table 24. Nº 10 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 20 | 0,000800000 | Normal | 1 | 6,400000E-09 |
| | x02 | 3 | 6,86667E-05 | Normal | 1 | 4,71511E-09 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 23,001416667 | 0,000148647 | Normal | 1 | 2,2096E-08 |
| | x' | 23,001416667 | 0,000514929 | Normal | -1 | 2,65152E-07 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 7,63546E-05 | Rectangular | 1 | 5,83002E-09 |
| | | | 0,000305418 | | | 9,32803E-08 |
| Correction | Δxc | -0,002 | -0,001154701 | Rectangular | 1 | 1,33333E-06 |

Nº 11 calibration point:

Table 25. Nº 11 Calibration point uncertainties and variances

| Reference magnitude | xm Magnitude | xm Estimation (mm) | u(x) Standard uncertainty (mm) | Probability distribution | Sensitivity coefficient | Uncertainty contribution, estimated variance (mm ²) |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| Reference | x01 | 20 | 0,000800000 | Normal | 1 | 6,400000E-09 |
| | x02 | 4,5 | 6,96667E-05 | Normal | 1 | 4,85344E-09 |
| | x03 | 0 | 0 | Normal | 1 | 0 |
| Repeatability | xc | 24,501666667 | 0,000188025 | Normal | 1 | 3,53535E-08 |
| | x' | 24,501666667 | 0,000651339 | Normal | -1 | 4,24242E-07 |
| Scale division | cE | 0 | 0,000288675 | Rectangular | 1 | 8,33333E-08 |
| Temperature variation | cΔT | 0 | 8,13342E-05 | Rectangular | 1 | 6,61526E-09 |
| | | | 0,000325337 | | | 1,05844E-07 |
| Correction | Δxc | -0,002 | -0,001154701 | Rectangular | 1 | 1,33333E-06 |

8 Results

Once the uncertainty balance has been made, the global uncertainties are calculated for the 3 existing methods:

- For null correction and constant uncertainty for the entire I measurement range, the following formula must be employed:

$$U = \max(U_i)_{\text{corrected}} = \max(U_{ci} + |\Delta x_{ci}|)$$

Table 26. Null correction and constant uncertainty for the entire I measurement range

| Calibration points | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| uReference | 4,54366E-09 | 4,66944E-09 | 4,57878E-09 | 4,9E-09 | 4,99378E-09 | 5,28044E-09 | 5,37778E-09 | 5,37778E-09 | 1,00E-06 | 6,4E-09 | 6,4E-09 |
| | 0 | 0 | 4,56075E-09 | 0 | 4,57607E-09 | 4,54186E-09 | 4,85344E-09 | 4,80711E-09 | 0 | 4,71511E-09 | 4,85344E-09 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4,71511E-09 | 0 | 0 | 0 |
| u _{xc} | 4,29293E-08 | 8,2702E-08 | 1,60331E-07 | 5,61983E-08 | 9,78535E-08 | 1,15702E-07 | 4,73485E-08 | 1,56566E-07 | 2,77778E-08 | 2,2096E-08 | 3,53535E-08 |
| u _{x'} | 5,15152E-07 | 9,92424E-07 | 1,76364E-06 | 6,18182E-07 | 1,17424E-06 | 1,27273E-06 | 5,68182E-07 | 1,87879E-06 | 2,77778E-07 | 2,65152E-07 | 4,24242E-07 |
| u _E | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 |
| u _T | 1,35788E-11 | 6,88802E-11 | 8,64033E-11 | 2,75521E-10 | 6,14972E-10 | 1,12201E-09 | 2,31713E-09 | 3,18502E-09 | 4,40833E-09 | 5,83002E-09 | 6,61526E-09 |
| | 2,1726E-10 | 1,10208E-09 | 1,38245E-09 | 4,40833E-09 | 9,83956E-09 | 1,79522E-08 | 3,70741E-08 | 5,09603E-08 | 7,05333E-08 | 9,32803E-08 | 1,05844E-07 |
| Δx _{ci} | -0,004 | -0,003 | -0,004 | -0,002 | -0,003 | -0,003 | -0,002 | -0,003 | -0,002 | -0,002 | -0,002 |
| U _{ci} | 0,001136828 | 0,001525975 | 0,002008934 | 0,001238788 | 0,001658586 | 0,001732432 | 0,001223508 | 0,002091761 | 0,001711041 | 0,000980618 | 0,001154679 |
| U _{ci} +Δx _{ci} | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,003 | 0,005 | 0,005 | 0,003 | 0,005 | 0,004 | 0,003 | 0,003 |
| U=max(U _i) _{corrected} | | | 0,006 | | | | | | | | |

- For constant correction and uncertainty, the following formulas must be used:

$$u_i = \sqrt{u_{0i}^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{\delta_{ci}}{3} + \dots}$$

$$U = k \cdot \max(u_i)$$

Table 27. Constant correction and uncertainty

| Calibration points | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Reference | 4,54366E-09 | 4,66944E-09 | 4,57878E-09 | 4,9E-09 | 4,99378E-09 | 5,28044E-09 | 5,37778E-09 | 5,37778E-09 | 1,00E-06 | 6,4E-09 | 6,4E-09 |
| | 0 | 0 | 4,56075E-09 | 0 | 4,57607E-09 | 4,54186E-09 | 4,85344E-09 | 4,80711E-09 | 0 | 4,71511E-09 | 4,85344E-09 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4,71511E-09 | 0 | 0 | 0 |
| u _{xc} | 4,29293E-08 | 8,2702E-08 | 1,60331E-07 | 5,61983E-08 | 9,78535E-08 | 1,15702E-07 | 4,73485E-08 | 1,56566E-07 | 2,77778E-08 | 2,2096E-08 | 3,53535E-08 |
| u _{x'} | 5,15152E-07 | 9,92424E-07 | 1,76364E-06 | 6,18182E-07 | 1,17424E-06 | 1,27273E-06 | 5,68182E-07 | 1,87879E-06 | 2,77778E-07 | 2,65152E-07 | 4,24242E-07 |
| u _E | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 |
| u _T | 1,35788E-11 | 6,88802E-11 | 8,64033E-11 | 2,75521E-10 | 6,14972E-10 | 1,12201E-09 | 2,31713E-09 | 3,18502E-09 | 4,40833E-09 | 5,83002E-09 | 6,61526E-09 |
| | 2,1726E-10 | 1,10208E-09 | 1,38245E-09 | 4,40833E-09 | 9,83956E-09 | 1,79522E-08 | 3,70741E-08 | 5,09603E-08 | 7,05333E-08 | 9,32803E-08 | 1,05844E-07 |
| u _{Residual Correction} | 3,33333E-07 | 0 | 3,33333E-07 | 3,33333E-07 | 0 | 0 | 3,33333E-07 | 0 | 3,33333E-07 | 3,33333E-07 | 3,33333E-07 |
| u _i | 0,000989708 | 0,001079027 | 0,001533376 | 0,001049109 | 0,001172797 | 0,001225014 | 0,001040105 | 0,001479098 | 0,001340583 | 0,000902297 | 0,000999988 |
| U=k*max(ui) | | | 0,003 | | | | | | | | |

The residual correction being the difference between the local correction and the average correction:

$$\delta_{ci} = \Delta x_{ci} - \Delta \bar{x}_c$$

- For null correction and constant uncertainty for the entire II measurement range, the following formulas must be utilized:

$$u_i = \sqrt{u_{0i}^2 + \frac{S^2(q_{ck})}{n_c} + \frac{S^2(q_{ck})}{m} + \frac{(E/2)^2}{3} + \frac{\Delta x_{ci}^2}{3} + \dots}$$

$$U = k \cdot \max(u_i)$$

Table 28. Null correction and constant uncertainty for the entire II measurement range

| Calibration points | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Reference | 4,54366E-09 | 4,66944E-09 | 4,57878E-09 | 4,9E-09 | 4,99378E-09 | 5,28044E-09 | 5,37778E-09 | 5,37778E-09 | 1,00E-06 | 6,4E-09 | 6,4E-09 |
| | 0 | 0 | 4,56075E-09 | 0 | 4,57607E-09 | 4,54186E-09 | 4,85344E-09 | 4,80711E-09 | 0 | 4,71511E-09 | 4,85344E-09 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4,71511E-09 | 0 | 0 | 0 |
| uxc | 4,29293E-08 | 8,2702E-08 | 1,60331E-07 | 5,61983E-08 | 9,78535E-08 | 1,15702E-07 | 4,73485E-08 | 1,56566E-07 | 2,77778E-08 | 2,2096E-08 | 3,53535E-08 |
| ux' | 5,15152E-07 | 9,92424E-07 | 1,76364E-06 | 6,18182E-07 | 1,17424E-06 | 1,27273E-06 | 5,68182E-07 | 1,87879E-06 | 2,77778E-07 | 2,65152E-07 | 4,24242E-07 |
| uE | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 | 8,33333E-08 |
| uT | 1,35788E-11 | 6,88802E-11 | 8,64033E-11 | 2,75521E-10 | 6,14972E-10 | 1,12201E-09 | 2,31713E-09 | 3,18502E-09 | 4,40833E-09 | 5,83002E-09 | 6,61526E-09 |
| | 2,1726E-10 | 1,10208E-09 | 1,38245E-09 | 4,40833E-09 | 9,83956E-09 | 1,79522E-08 | 3,70741E-08 | 5,09603E-08 | 7,05333E-08 | 9,32803E-08 | 1,05844E-07 |
| uCorrection | 5,33333E-06 | 0,000003 | 5,33333E-06 | 1,33333E-06 | 0,000003 | 0,000003 | 1,33333E-06 | 0,000003 | 1,33333E-06 | 1,33333E-06 | 1,33333E-06 |
| ui | 0,002445306 | 0,002040662 | 0,002711317 | 0,001449355 | 0,002091759 | 0,002121476 | 0,001442851 | 0,002277659 | 0,001672472 | 0,0013469 | 0,001414205 |
| U=k*max(ui) | | | 0,006 | | | | | | | | |