

Colección Manuales Docentes

Teoría y práctica de la metrología dimensional aplicada a la fabricación en ingeniería

María Carmen Manjabacas Tintero
Valentín Miguel Eguía



Ediciones de la Universidad
de Castilla-La Mancha

**TEORÍA Y PRÁCTICA DE LA METROLOGÍA
DIMENSIONAL APLICADA A LA FABRICACIÓN EN
INGENIERÍA**

TEORÍA Y PRÁCTICA DE LA METROLOGÍA DIMENSIONAL APLICADA A LA FABRICACIÓN EN INGENIERÍA

María Carmen Manjabacas Tendero

Profesora Asociada del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación en
la ETSII de Albacete

Valentín Miguel Eguía

Catedrático del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación en la
ETSII de Albacete



Ediciones de la Universidad
de Castilla-La Mancha

Cuenca, 2022

YPMT3 (Thema)

© de los textos: sus autores.

© de la edición: Universidad de Castilla-La Mancha.

Edita: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha

Colección MANUALES DOCENTES N.º 25



UNIÓN DE
EDITORIALES
UNIVERSITARIAS
ESPAÑOLAS

Esta editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional.

I.S.B.N.: 978-84-9044-539-6 (Edición electrónica)

D.O.I.: https://doi.org/10.18239/manuales_2022.25.00

ISNI: 0000000506819532

Composición: Compobell, S.L.

Hecho en España (U.E.) – *Made in Spain (E.U.)*



Esta obra se encuentra bajo una licencia internacional Creative Commons CC BY 4.0. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra no incluida en la licencia Creative Commons CC BY 4.0 solo puede ser realizada con la autorización expresa de los titulares, salvo excepción prevista por la ley. Puede Vd. acceder al texto completo de la licencia en este enlace:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>

PRÓLOGO

El presente texto consiste en la actualización de un libro anterior titulado *Apuntes de Metrología y Práctica de la Metrología Dimensional*, publicado en el año 2007 y pensado para servir de guía a estudiantes de Ingenierías de la Rama Industrial en el ámbito de la metrología, principalmente aplicada a los procesos de fabricación.

La metrología es una disciplina que ha experimentado una evolución muy importante en los últimos años, por lo que era indispensable la actualización mencionada, sobre todo en lo relacionado con la definición de unidades de medida basada en los valores de las 7 constantes universales, en vigor desde el 20 de mayo de 2019, en lo que se ha denominado “un sistema internacional para el siglo XXI”. Conviene destacar a este respecto la nueva definición del kilogramo en función de la constante de Planck. Esto permite abandonar el prototipo patrón depositado en el Bureau Internacional de Pesas y Medidas de París siendo posible reproducir la definición mediante una experiencia físico-química que favorece enormemente la diseminación de dicha unidad y que ha supuesto uno de los grandes avances de la metrología científica del siglo XXI.

Lógicamente, en el campo de la metrología legal también se ha producido una evolución significativa, por lo que se han referenciado los procedimientos, criterios metrológicos, notas técnicas y guías de diversos organismos nacionales e internacionales. Particularmente, en el texto se hace referencia en este contexto a la Entidad Nacional de Acreditación, ENAC, y al Centro Español de Metrología, CEM.

Asimismo, el desarrollo normativo en la materia establecido en normas UNE EN ISO también ha sido revisado, actualizado y ampliado.

Además, también se han modificado los contenidos de los capítulos de metrología aplicada, capítulos 5 al 10, incluyendo más material visual y aclaraciones técnicas que hacen del texto un material dirigido a cualquier lector interesado

PRÓLOGO

en el ámbito de la metrología dimensional y no solo al estudiante universitario. Como ejemplo, cabe destacar la ampliación en el capítulo 12 de los conceptos relacionados con la capacidad de un proceso de fabricación y, particularmente, con la fabricación robusta, incluyendo la función de pérdidas de Taguchi.

En definitiva, los cambios realizados justifican que el texto lleve un nombre diferente, acorde con los contenidos.

La bibliografía empleada ha sido también modificada, aunque, no obstante, se han mantenido reseñas, bien porque muchos conceptos permanecen en la actualidad en vigor, bien porque permiten entender el proceso evolutivo de la metrología dimensional establecido con anterioridad.

Los autores agradecen a los lectores de la versión inicial, en su mayoría estudiantes de ingeniería, las sugerencias comunicadas durante 15 años, lo que, sin duda, ha permitido mejorar sustancialmente el contenido del libro.

En Albacete, a 18 de julio de 2022
Los autores

ÍNDICE

PRÓLOGO	7
CAPÍTULO 1. LA METROLOGÍA EN EL ÁMBITO DE LOS SISTEMAS DE CALIDAD INDUSTRIAL	17
1. Concepto de metrología. Facetas: metrología científica, metrología legal y metrología aplicada	19
1.1. Facetas de la metrología.	20
2. La metrología en el ámbito de los sistemas de calidad industrial . .	21
2.1. Calidad, normalización, acreditación, certificación y homologación	21
2.2. Normalización	22
2.3. Certificación y homologación	24
2.4. Acreditación.	25
2.5. Ensayos y calibración.	25
2.6. Inspección y control.	26
3. Trazabilidad	26
3.1. Trazabilidad externa. Organizaciones internacionales de calibración y ensayos	26
4. La metrología legal.	27
5. Organización nacional de la Metrología.	30
6. Evolución del proceso normalizador de los sistemas de la calidad .	34
7. Sistemas de gestión de la calidad.	35
8. Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición (UNE-EN ISO 10012).. .	37
9. Normativa referente a instrumentos y elementos de medición en el ámbito de la metrología dimensional.	38

10. Normativa aplicable a la verificación y calibración relativas a ensayos mecánicos y a máquinas de ensayos mecánicos.	40
11. Normativa relativa a elementos mecánicos: roscas y engranajes . . .	41
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS METROLÓGICOS BÁSICOS . .	43
1. Términos empleados en metrología	45
1.1. Magnitud física. Mensurando	45
1.2. Valor verdadero de una magnitud.	45
1.3. Valor convencionalmente verdadero de una magnitud.	45
1.4. Magnitud de influencia	45
1.5. Exactitud de medida	45
1.6. Repetibilidad (de los resultados de las mediciones)	46
1.7. Reproducibilidad (de los resultados de las mediciones)	46
1.8. Patrón	46
1.9. Trazabilidad	47
1.10. Calibración	47
1.11. Material de referencia	47
1.12. Incertidumbre de medida	47
2. Clasificación de la metrología.	47
3. Cualidades de un instrumento de medida	48
3.1. Instrumento de medida	48
3.2. Incertidumbre del instrumento de medida.	48
3.3. Clase de exactitud	49
3.4. Escala.	49
3.5. División de escala	49
3.6. Rango de medida.	49
3.7. Sensibilidad	49
3.8. Resolución	49
3.9. Transparencia.	49
3.10. Deriva	49
3.11. Ajuste	50
3.12. Confirmación metrológica	50
3.13. Verificación de un instrumento de medida	50
4. Unidades y patrones de medida	50

4.1. Introducción	50
4.2. Sistema Internacional de Unidades (SI)	52
CAPÍTULO 3. CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA.	55
1. Conceptos estadísticos	57
1.1. Población, muestra, y variable estadística..	57
1.2. Función de distribución	57
1.3. Función de densidad.	57
1.4. Esperanza matemática y varianza	58
1.5. Función de distribución normal.	59
1.6. Distribución normal reducida	59
1.7. Estimaciones en el muestreo	61
1.8. Distribución t de Student	62
1.9. Distribución rectangular	63
1.10. Distribución triangular. Otras distribuciones.	64
1.11. Teorema del límite central	65
2. Planteamiento del proceso de expresión de la incertidumbre en la medición.	66
3. Ley de propagación de varianzas	68
4. Modelo de medición directa y suma de contribuciones de incertidumbre asociadas al proceso	69
5. Evaluación de las incertidumbres de tipo A	70
6. Evaluación de las incertidumbres de tipo B	70
6.1. Incertidumbre de un patrón, U_0	71
6.2. Incertidumbre debida a la resolución del instrumento de medida U_R	71
6.3. Incertidumbre de deriva de un patrón, U_D	72
6.4. Incertidumbre debida al redondeo U_{RE}	74
7. Calibración de un instrumento en un punto de su campo de medida	75
8. Cálculo de la incertidumbre asociada al proceso de medición en un punto, U_M	76
8.1. Consideraciones sobre el cálculo de la incertidumbre típica de tipo A en el proceso de medición con un instrumento de medida	78

9. Consideraciones acerca del factor de recubrimiento K	79
10. Consideraciones acerca de la expresión de la incertidumbre	80
11. Calibración y medición de un instrumento en todo su campo de medida.	81
11.1 Aspectos generales. Selección de los puntos de calibración.	81
11.2. Cálculo de incertidumbres para todo el campo de medida mediante funciones de correlación.	82
11.3. Método simplificado para el cálculo de la incertidumbre de medición o de uso global	84
12. Consideraciones finales	86
12.1. Evaluación de la temperatura como magnitud de influencia	87
CAPÍTULO 4. ELEMENTOS TÉCNICOS DE UN PLAN DE CALIBRACIÓN. INTERCOMPARACIÓN DE LABORATORIOS	
1. Elementos técnicos de un plan de calibración	91
2. Diagrama de niveles	91
3. Diagramas de trazabilidad interna	94
4. Fichero de instrucciones. Elaboración de hojas de procedimientos	94
5. Archivo de resultados	96
6. Etiquetas de calibración	97
7. Períodos de calibración.	97
8. Intercomparación de laboratorios	98
CAPÍTULO 5. AJUSTES. VERIFICACIÓN CON CALIBRES DE TOLERANCIA. ACOTACIÓN PARA FABRICACIÓN	
1. Introducción.	103
2. Conceptos.	103
2.1. Acoplamiento eje-agujero	103
2.2. Tolerancia	103
3. Normalización de las tolerancias	104
3.1. Tolerancias e índice de calidad.	104
3.2. Posiciones de las tolerancias.	105
3.3. Sistemas de ajustes.	107

4. Verificación con calibres de tolerancia	109
4.1. Empleo de los calibres de tolerancia	110
5. Acotación para fabricación. Operaciones con cotas. Método del caso peor (worst case)	111
5.1. Introducción	111
5.2. Adición de cotas	112
5.3. Transferencia de cotas	114
6. Resolución de operaciones con tolerancias mediante métodos estadísticos	116
6.1. Definición de índice de capacidad de un proceso.	117
6.2. Operaciones con cotas con tolerancias con establecimiento de un grado de probabilidad en el cumplimiento de los resultados.	118
6.3. Ejemplo de cálculo (adaptado de W.R. Devries, <i>Analysis of Material Removal Processes</i> , Springer-Verlag, 1992)	119
7. Diseño y fabricación robusta	120
7.1. Función de pérdidas de Taguchi	121

CAPÍTULO 6. INTRODUCCIÓN AL LABORATORIO DE METROLOGÍA DIMENSIONAL. PRINCIPIOS GENERALES 123

1. Introducción	125
2. Causas de error en las mediciones.	125
2.1. Errores debidos al instrumento de medida	125
2.2. Errores debidos al operador	126
2.3. Errores debidos a la pieza que se mide.	127
2.4. Errores debidos a los agentes externos o ambientales	128
3. Bloques patrón longitudinales	128
3.1. Introducción	128
3.2. Requisitos generales.	129
3.3. Requisitos en función del grado.	129
3.4. Otras consideraciones	131
3.5. Juegos y calidades comerciales de BPL	131
3.6. Composición de los juegos de bloques patrón longitudinales	133
4. Medición de longitudes mediante pie de rey	135
4.1. Descripción de un pie de rey	135

4.2. Tipos de pie de rey.	136
4.3. Descripción del nonius como sistema de lectura	137
5. Medición de longitudes mediante micrómetro.	141
5.1. Descripción de un micrómetro y tipos.	141
5.3. Sistema de lectura analógico	143
6. Medida de longitudes con comparadores	144
7. Instrumentos para la medición y verificación de ángulos	144
7.1. Transportadores de ángulos	144
7.2. Nivel de burbuja.	145
7.3. Regla de senos	147
8. Bloques patrón de ángulos	148
9. Mesas de planitud.	149
10. Aplicación práctica: propuesta de calibración de un micrómetro de exteriores de dos contactos	151
10.1. Introducción y objetivos.	151
10.2. Requisitos establecidos para la calibración.	152
10.3. Operaciones y comprobaciones previas	152
10.4. Proceso de calibración	153
10.5. Cálculo de la corrección de calibración en cada punto de calibración	154
10.6. Cálculo de incertidumbres.	154
10.7. Hoja de toma de datos.	155
10.8. Interpretación y expresión de los resultados.	156
CAPÍTULO 7. MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN DE ROSCAS. .	159
1. Introducción.	161
1.1. Definición de la rosca Métrica ISO.	161
1.2. Errores en un elemento roscado.	163
1.3. Definición de tolerancias en roscas	165
2. Procedimientos para la comprobación de roscas.	167
3. Verificación de un tornillo por medición separada de cada atributo	168
3.1. Medición del diámetro de flancos mediante un micrómetro de puntas intercambiables	169

3.2. Medición del diámetro de flancos mediante el método de las tres varillas o de los tres alambres	171
3.3. Medición del ángulo del perfil de rosca mediante el método de las tres varillas	175
3.4. Selección del paso de rosca mediante patrones de perfil	176
4. Algunas recomendaciones para afianzar destrezas prácticas en la medición de roscas	177

CAPÍTULO 8. VERIFICACIÓN DE ENGRANAJES. 179

1. Introducción	181
1.1. Perfil de evolvente	182
1.2. Conceptos fundamentales	183
1.3. Relaciones dimensionales.	185
2. Verificación de engranajes cilíndricos rectos.	186
2.1. Verificación del perfil del diente	186
2.2. Verificación del paso. Verificación de la división angular	187
2.3. Verificación de la distorsión de los dientes. Verificación de la rugosidad superficial de los flancos	188
2.4. Verificación de la excentricidad	188
3. Verificación del espesor del diente	188
3.1. Verificación del espesor del diente mediante el pie de rey de dentados	189
3.2. Verificación del espesor del diente mediante la medición de la separación entre un número predeterminado de dientes	191
3.3. Consideraciones relacionadas con la práctica de la comprobación del espesor del diente	193

CAPÍTULO 9. METROLOGÍA DE ÁNGULOS: INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN DIRECTA E INDIRECTA DE ÁNGULOS 195

1. Introducción	197
2. Comprobación de la sensibilidad aparente de un nivel	197
3. Medición directa de ángulos.	198
4. Medición de ángulos de forma indirecta	198
4.1. Medición de un cono exterior	198

ÍNDICE

4.2. Medición del ángulo de un cono interior.	200
4.3. Materialización de ángulos	201
4.4. Consideraciones acerca de la evaluación de la incertidumbre en la medición de un ángulo de forma indirecta.	202
CAPÍTULO 10. VERIFICACIÓN DE FORMAS EN PIEZAS CILÍNDRICAS	205
1. Introducción	207
2. Método general de verificación de formas cilíndricas	209
3. Definición de tolerancias de formas cilíndricas	211
4. Verificación de la redondez.	212
5. Verificación de la cilindridad	214
BIBLIOGRAFÍA Y OTROS RECURSOS	217

CAPÍTULO 1

LA METROLOGÍA EN EL ÁMBITO DE LOS SISTEMAS DE CALIDAD INDUSTRIAL

1. Concepto de metrología. Facetas: metrología científica, metrología legal y metrología aplicada.
 - 1.1. Facetas de la metrología.
2. La metrología en el ámbito de los sistemas de calidad industrial.
 - 2.1. Calidad, normalización, acreditación, certificación y homologación.
 - 2.2. Normalización.
 - 2.3. Certificación y homologación.
 - 2.4. Acreditación.
 - 2.5. Ensayos y calibración.
 - 2.6. Inspección y control.
3. Trazabilidad.
 - 3.1. Trazabilidad externa. Organizaciones internacionales de calibración y ensayos.
4. La metrología legal.
5. Organización nacional de la metrología.
6. Evolución del proceso normalizador de los sistemas de la calidad.
7. Sistemas de gestión de la calidad.
8. Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición (UNE-EN ISO 10012).
9. Normativa referente a instrumentos y elementos de medición en el ámbito de la metrología dimensional.
10. Normativa aplicable a la verificación y calibración relativas a ensayos mecánicos y a máquinas de ensayos mecánicos.
11. Normativa relativa a elementos mecánicos: roscas y engranajes.

1. CONCEPTO DE METROLOGÍA. FACETAS: METROLOGÍA CIENTÍFICA, METROLOGÍA LEGAL Y METROLOGÍA APLICADA

En principio, podemos establecer que la metrología es la ciencia que trata de las medidas, es decir el resultado numérico de las mediciones. En este sentido hemos de considerar diferentes magnitudes físicas: fuerza, magnitudes eléctricas, dimensiones... La metrología es, tal y como la define D. Leonardo Villena Pardo:

”El conjunto de conocimientos y aplicaciones que sirve de base para establecer las Leyes de la Naturaleza, así como para explicar y predecir los fenómenos que en ella tienen lugar”.

Ahora bien, en un contexto más concreto, podemos afirmar que la metrología es fundamental para el progreso industrial. En la actualidad se exige un control de lo que se está fabricando en cada momento, y esto requiere de una metrología en tiempo real. Por otra parte, la industria moderna se basa en el concepto de intercambiabilidad, lo que hace que ya no se fabrique una pieza determinada para un conjunto dado, sino que cualquier pieza de las fabricadas debe poder formar parte de cualquier de los conjuntos fabricados o existentes; en otras palabras, la intercambiabilidad puede definirse como:

“La posibilidad, cuando se monta un conjunto mecánico, de tomar al azar en un lote de piezas semejantes, terminadas y verificadas, una pieza cualquiera, sin que haya necesidad de ningún trabajo de ajuste, y poder estar seguro, cuando el montaje esté terminado, de que el mecanismo funciona correctamente”.

El problema se complica con la necesidad de producir en forma económica grandes cantidades de determinados productos y aparece lo que se denomina fabricación en serie.

La persecución de los anteriores objetivos, junto con el desarrollo técnico conduce a la consecución de precisiones cada vez más estrechas lo cual trae consigo la aplicación de técnicas muy específicas como lo es la metrología.

Las magnitudes significativas de los productos industriales se especifican habitualmente mediante tolerancias, que son los intervalos de valores admisibles prescritos en cada caso para la magnitud en cuestión. Las tolerancias definidas en el diseño de un producto determinan que los objetos producidos con valores fuera del intervalo de tolerancia han de ser rechazados.

La especificación mediante tolerancias es compatible con el principio de intercambiabilidad al que nos referíamos anteriormente. El diseño con tolerancias se efectúa de forma que las tolerancias especificadas aseguren la intercambiabilidad de elementos análogos en conjuntos más complejos sin alterar la funcionalidad de los mismos. Por ello, es imprescindible conocer la incertidumbre de los instrumentos o sistemas de medida, esto es, el rango de valores entre los que se puede asegurar que se encuentra el verdadero valor de la magnitud medida.

En resumen, en la fabricación es inevitable medir para decidir si la magnitud medida pertenece o no a un intervalo de tolerancia, T . Cuando el valor de la medida es tal que el intervalo de incertidumbre, $2U$, resulta totalmente contenido en el de tolerancia, o cuando ambos intervalos no poseen puntos comunes, la decisión se adopta sin dificultad. Sin embargo, las restantes situaciones determinan la necesidad de un análisis más cuidadoso. Una postura prudente y simple es definir como intervalo de decisión el correspondiente a $T-2U$ y limitar el valor del cociente de ambos intervalos (tolerancia e incertidumbre).

Efectivamente, si la relación $T/2U$ es demasiado grande es un indicativo de que se están empleando instrumentos y métodos muy costosos en relación al intervalo de tolerancia definido. Por otra parte, una relación muy pequeña supone un rechazo importante de elementos correctos y, lógicamente, costes adicionales. En definitiva, una relación $T/2U$ bien elegida suele proporcionar el equilibrio entre el coste razonable de la instrumentación de medida y la adecuación de la misma al valor de la tolerancia a verificar.

En la misma medida en que se incrementan las prestaciones de los productos industriales, suelen reducirse los valores de las correspondientes tolerancias, lo que obliga a emplear instrumentos de medida más precisos y a desarrollar nuevos aparatos de medida basados en principios físicos y tecnológicos que les confieran una menor incertidumbre.

1.1. FACETAS DE LA METROLOGÍA

En función de los objetivos perseguidos podemos clasificar la metrología en tres áreas:

- Metrología científica
- Metrología aplicada
- Metrología legal

La metrología científica es la que se dedica al desarrollo de la investigación para la definición de las unidades básicas del sistema internacional de unidades, a su realización y mantenimiento.

La metrología aplicada es la que se encarga de realizar la difusión de la definición de una unidad básica hasta los patrones de uso diario en el taller o laboratorio, es decir, de la diseminación de la unidad, que se lleva a cabo mediante la actividad de calibración.

La metrología legal es la que tiene como misión llevar a cabo el control metroológico del Estado, sobre los instrumentos en los que legalmente se encuentra dispuesto por el propio Estado: sus fases de aprobación, verificación y vigilancia e inspección. Naturalmente, la metrología legal se ha de apoyar en la aplicada y, por tanto, en la científica.

2. LA METROLOGÍA EN EL ÁMBITO DE LOS SISTEMAS DE CALIDAD INDUSTRIAL

2.1. CALIDAD, NORMALIZACIÓN, ACREDITACIÓN, CERTIFICACIÓN Y HOMOLOGACIÓN

El proceso de innovación debe dar como resultado la obtención de un proceso o producto que cumpla con las expectativas del usuario del mismo a lo largo de su vida útil; por tanto, se puede definir la calidad como:

“la capacidad de un proceso o de un producto para cumplir las expectativas del usuario a lo largo de su vida útil”.

Una política de calidad está constituida por el conjunto de medidas propiciadas por la administración pública tendentes a mejorar la calidad de los procesos y productos industriales. La política de calidad tiene dos aspectos complementarios: elevación de la calidad de los productos propios e impedir la entrada en el mercado propio de productos de baja calidad.

La elevación de la calidad de los productos propios se hace tomando diferentes acciones como: el fomento de la normalización técnica, el desarrollo de sistemas de certificación, la promoción de laboratorios de ensayo, la dotación de ayudas a empresas para mejorar sus sistemas productivos, la promoción de la innovación en las empresas a través de la subvención de proyectos innovadores, la promoción de la gestión de la calidad en las empresas a través de publicaciones, cursos, jornadas, conferencias, etc. Finalmente, es preciso mentalizar a los usuarios para que exijan calidad en los productos.

Para impedir la entrada en el mercado de productos de baja calidad es preciso establecer las condiciones mínimas que deben de poseer los productos mediante

la exigencia del cumplimiento de normas técnicas, que se puede materializar en procesos de homologación de los mismos.

El conjunto de todas las actuaciones de la administración que propician la mejora de la calidad industrial y que son realizadas por distintas instituciones externas a las empresas recibe el nombre de *sistema integrado de calidad industrial*. Esas actuaciones se pueden dividir en las siguientes áreas: normalización, acreditación y certificación, ensayos y calibración, inspección y control.

2.2. NORMALIZACIÓN

Se puede definir como la actividad que establece las características que debe tener todo producto industrial aportando de esta forma soluciones repetitivas. El resultado de la acción normalizadora son las normas, definidas como especificaciones técnicas aprobadas por una institución reconocida con actividades de normalización para su aplicación repetitiva o continua y cuya observancia puede ser no es obligatoria.

A nivel internacional el organismo que asume la coordinación y unificación de las normas industriales es la Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization; ISO), creada en Londres en 1946 por veinticinco organizaciones nacionales. Sus antecedentes se encuentran en la Federación Internacional de Asociaciones Nacionales de Normalización (ISA), fundada en 1926. En la actualidad ISO se ocupa de la actualización de un total de 24183 patrones internacionales que cubren todas las facetas de la tecnología y la fabricación. Además, a ISO pertenecen un total de 167 miembros, uno por país. La actuación de ISO se estructura en base a Comités Técnicos (TC) que cubren los distintos campos de trabajo. En la actualidad, 802 comités técnicos y subcomités velan por el cumplimiento y el desarrollo correcto de patrones científicos y tecnológicos.

Las áreas de actuación de ISO abarcan todos los campos de la normalización, a excepción del eléctrico y el electrónico, que quedan bajo la responsabilidad de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, International Electrotechnical Commission). Además, mantiene vínculos estrechos con la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, International Telecommunication Union) y con la Organización Mundial del Comercio (OMC), cuyas siglas en inglés son WTO (World Trade Organization).

En el ámbito europeo los organismos de normalización son el Comité Europeo de Normalización (CEN), que cubre la práctica totalidad de las distintas áreas objeto de normalización, el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) y el Instituto Europeo de Normalización de las Telecomunicaciones (ETSI).

En España, las actividades de normalización han estado inicialmente encomendadas al Instituto de Racionalización y Normalización (IRANOR), creado en 1945 como órgano dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). IRANOR comenzó a editar las primeras normas españolas bajo las siglas UNE, las cuales eran concordantes con las prescripciones internacionales. El Real Decreto 1614/1985, de 1 de agosto (BOE del 12 de agosto) regula las actividades de normalización en España. Además, en este decreto se establece el Consejo Superior de Normalización como órgano superior y consultivo del Gobierno en materia de normalización, sustituyendo la Comisión Interministerial de Normalización y Homologación.

Por otra parte, el citado Real Decreto transfiere la responsabilidad en materia de normalización del IRANOR, a la Subdirección General de Normalización y Reglamentación del Ministerio de Industria y Energía. También faculta a este Ministerio para la designación de las asociaciones o entidades reconocidas para desarrollar tareas de normalización y certificación.

En 1986, al amparo de la Ley de Asociaciones 191/1964, se creó la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), a partir de IRANOR, como asociación privada sin ánimo de lucro para la gestión de la normalización y la certificación. Por Orden del Ministerio de Industria y Energía de 26 de febrero de 1986 se designó a AENOR como entidad para desarrollar tareas de normalización y certificación. Uno de los principales objetivos perseguidos por AENOR fue incrementar la participación española en las organizaciones internacionales de normalización, en particular, en la International Standard Organization (ISO) y en la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI).

En 2016 la Asamblea General de la Asociación acordó la modificación de sus estatutos y la separación jurídica, funcional y contable de las actividades de normalización y cooperación internacional de las mercantiles, transfiriendo las mismas a AENOR INTERNACIONAL, S.A.U. AENOR comienza su naturaleza como empresa en enero de 2017. En ese momento, la Asociación Española de Normalización y Certificación, creada en 1986, se desdobra en dos organizaciones; por un lado, la Asociación Española de Normalización, UNE, entidad legalmente responsable del desarrollo de la normalización en España, que también lleva a cabo actividades de cooperación. Por otro, AENOR, empresa de gestión del conocimiento que ayuda a corregir brechas de competitividad a través de la evaluación de la conformidad (certificación, verificación, validación, inspección y ensayos), la formación y los servicios de información. AENOR es una sociedad de UNE.

Las normas técnicas se elaboran en el seno de la Asociación Española de Normalización, UNE, a través de los Comités Técnicos de Normalización (CTN) en los que están presentes todas las partes interesadas. La participación en los Comités posibilita el acceso y la capacidad de influir en el contenido de las normas europeas e internacionales.

A fin de desarrollar las diferentes actividades relacionadas con la normalización, AENOR se estructura en base a Comisiones Técnicas de Normalización (CTN) con competencias específicas en campos de actuación concretos. En este contexto debemos destacar el CTN 82 que es el encargado en materia de metrología y calibración.

2.3. CERTIFICACIÓN Y HOMOLOGACIÓN

La homologación es la aprobación oficial de un producto o servicio, realizada por un órgano legal o administración pública. Testifica que dicho producto o servicio cumple con los requisitos técnicos necesarios para su comercialización. Para concederse dicha homologación, los productos deben cumplir con una serie de reglamentos técnicos de carácter obligatorio, adaptados a la normativa vigente.

La certificación se define como la actividad consistente en la emisión de un documento que manifiesta que un proceso productivo, producto o servicio, o una empresa se ajusta a unas determinadas normas técnicas. Por tanto, certifica la homologación de dicho producto.

Tal como se indica en la definición, la certificación se puede realizar a dos niveles: certificación de producto y certificación de empresa.

La certificación de un producto puede ser realizada por:

- La propia empresa que posee el proceso productivo, fabrica el producto o da el servicio.
- Por la administración pública, dando lugar a la *homologación*.
- Por un organismo diferente, no dependiente del fabricante y del usuario, aceptado como certificador. Cuando este organismo es una empresa de reconocido prestigio en el ámbito de la certificación, hablamos de lo que se denomina *calidad concertada*.

La certificación de empresa es una actividad complementaria de la anterior y consiste en el reconocimiento de que una empresa tiene implantado un adecuado sistema de gestión de la calidad. Para llevarla a cabo es necesaria la existencia de una normativa adecuada y de general aceptación. Lo característico de la certificación es que solo puede ser expedida por Entidades de Certificación, que son organismos

oficiales cuya función es evaluar la conformidad y certificar el cumplimiento de la normativa exigida para cada sistema de seguridad. La certificación se consigue cuando los productos y sistemas de seguridad superan una serie de ensayos en los que se pone a prueba su vulnerabilidad y resistencia.

2.4. ACREDITACIÓN

La capacidad de certificar se basa en la credibilidad de quien certifica. En este sentido, consideramos los sistemas de acreditación como requisitos a cumplir por aquellas entidades que demuestran su capacidad de certificar. Como veremos más adelante, en España estas entidades son evaluadas por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC). El Real Decreto 1715/2010, de 17 de diciembre, designa a la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) como organismo nacional de acreditación de acuerdo con lo establecido en el Reglamento (CE) nº 765/2008 del Parlamento Europeo y el Consejo, de 9 de julio de 2008. La entidad líder en certificación de sistemas de gestión, productos y servicios es AENOR que, además, elabora normas técnicas. También se puede recurrir a entidades como Applus, Bureau Veritas, SGS o ECB-S, entre otras.

2.5. ENSAYOS Y CALIBRACIÓN

Para llevar a cabo la certificación y la homologación es necesaria la realización de los ensayos adecuados. Se necesita para ello la existencia de laboratorios acreditados para llevar a cabo esta labor.

Esta labor debe estar tutelada por la administración, que tiene que establecer las condiciones a cumplir por los laboratorios de ensayo y coordinarlos entre sí y con el resto de los componentes del sistema integrado de calidad industrial.

La labor de ensayo se complementa con la calibración de los instrumentos y equipos utilizados en su realización. Ello hace necesaria la existencia de laboratorios de calibración a los que los laboratorios de ensayo han de remitirse periódicamente para llevar a cabo la calibración de sus equipos. En este contexto, hay que resaltar que los laboratorios de calibración establecen su competencia en el ámbito mediante la comparación de sus resultados, en la magnitud considerada, con los obtenidos por otros laboratorios del mismo nivel metrológico (UNE-EN-ISO/IEC 17025:2017 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”).

2.6. INSPECCIÓN Y CONTROL

El cumplimiento de normas por parte de un producto o el adecuado control de calidad de una empresa deben ser comprobados periódicamente, y esta actividad no puede ser ajena a la administración.

Este es un tema importante que la mayoría de los países resuelven mediante entidades colaboradoras de la administración. La reglamentación del funcionamiento de estas entidades debe garantizar su independencia de fabricantes y usuarios, así como su correcto funcionamiento.

3. TRAZABILIDAD

Se define como trazabilidad la cualidad de una medida que consiste en poderla referir a patrones apropiados, generalmente patrones nacionales o internacionales, mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones.

3.1. TRAZABILIDAD EXTERNA. ORGANIZACIONES INTERNACIONALES DE CALIBRACIÓN Y ENSAYOS

En este epígrafe se va a presentar la existencia de algunas de las organizaciones internacionales de calibración y ensayos, necesarias para ver cómo encuentra la organización nacional de la metrología en España el apoyo para enlazar el nivel primario de su trazabilidad interna y prolongarla hasta las referencias adecuadas mediante lo que se suele denominar trazabilidad externa.

El principal organismo encargado de la metrología científica es el Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), que se creó por la Convención del Metro firmada en París en 1875 por 17 naciones (España entre ellas), cuyo trabajo se desarrolla por medio del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), y de los Comités Consultivos, que en un número de siete estudian las diferentes unidades S.I.

En la actualidad, la definición de algunas unidades del SI se realiza por la intercomparación entre las definiciones que se materializan en laboratorios del más alto nivel metrológico de varias naciones; el BIPM actúa como el organismo supremo internacional que organiza, controla y valida los resultados.

La difusión de la definición de una unidad (metrología aplicada) se lleva a cabo mediante los sistemas para la calibración existentes en cada nación, que dependen directamente de los organismos que llevan a cabo la metrología científica.

Aquí se encuentra la Western European Calibration Cooperation (WECC) que es el organismo en el que cooperan los Servicios de Calibración de Europa

Occidental, con objeto de reconocerse mutuamente la certificación emitida, una vez superada una auditoría de admisión.

La WELAC es el organismo equivalente a la WECC en el ámbito de los servicios de ensayos de las naciones de Europa Occidental.

EUROMET es una organización metroológica europea para el intercambio de técnicas y métodos entre las instituciones responsables del mayor nivel metroológico de diversas naciones. Las organizaciones similares en el ámbito de ensayos son EUROLAB Y EUROCHEM. EUROLAB-España es una asociación sin ánimo de lucro creada en 1994. Está dedicada a Ensayo, Calibración y Análisis.

El principal organismo que trabaja en el ámbito de la metrología legal es la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), creada en 1955, y de la que España forma parte desde sus comienzos, que trabaja elaborando especificaciones metroológicas para los instrumentos, mediante órganos de trabajo como el Bureau Internacional de Metrología Legal (BIML) y el Comité Internacional de Metrología Legal (CIML).

4. LA METROLOGÍA LEGAL

La forma en que un país ordena y legisla en el ámbito de la metrología constituye la metrología legal. Previo a cualquier consideración, hemos de conocer sin ambigüedades dicha metrología legal con el fin de poder establecer con claridad un determinado plan de calibración de una empresa o bien estudiar los requisitos a cumplir si se quiere que una empresa o laboratorio se constituya en un centro de calibración que oferte servicios de calibración a otras empresas.

Para establecer la situación actual de la metrología legal en España nos basaremos en el riguroso análisis realizado en un primer momento por D. José Manuel Bernabé Sánchez del Centro Español de Metrología. En definitiva, vamos a exponer el marco legal en relación a materia de metrología en nuestro país.

La Constitución Española, en su artículo 149.1 atribuye al Estado, entre otras, la competencia exclusiva para legislar sobre pesas y medidas. El Gobierno elaboró y presentó al Parlamento la Ley 3/1985, de 18 de marzo, de Metrología, cuyos objetivos fundamentales se pueden resumir:

- Definir las unidades legales de medida en España, conforme a los acuerdos de la Conferencia General de Pesas y Medidas y establecer las cadenas oficiales de calibración a nivel nacional, relacionando y jerarquizando los patrones y reconociendo aquéllos de los que dispongan los laboratorios públicos y privados.

- Establecer el Control Metrológico del Estado con el fin de velar por la corrección y exactitud de las medidas, controlando los instrumentos de medida.
- Unificar la actividad metrológica en nuestro país.

En lo que respecta al Control Metrológico del Estado, determina la Ley que están sujetos al mismo todos los objetos y elementos de aplicación en metrología, así como las mediciones que reglamentariamente se determinen.

En cumplimiento de lo establecido en la Ley 3/1985, se creó por Real Decreto 415/1985, de 27 de marzo, el Centro Español de Metrología, cuyas competencias fueron recogidas en la Ley 31/1990, de 27 de diciembre, que configuró este Centro como Organismo Autónomo de la Administración General del Estado. Dichas competencias son las siguientes:

- Custodia y conservación de los patrones nacionales de medida.
- Establecimiento y desarrollo de las cadenas oficiales de calibración.
- Ejercicio de las funciones de la Administración del Estado en el Control Metrológico del Estado y de la CEE y habilitación de laboratorios de verificación metrológica, en aquellas Comunidades Autónomas que no hayan asumido esta competencia.
- Mantenimiento del Registro de Control Metrológico.
- Ejecución de proyectos de Investigación y Desarrollo en materia metrológica.
- Formación de especialistas en metrología.

Con la adhesión de España a la Comunidad Europea, se hace obligado adaptar la normativa interna española al contenido de las Directivas 71/316/CEE, sobre instrumentos de medida y métodos de control metrológico, y 80/181/CEE, sobre unidades de medida.

Como consecuencia, se modifica la ley 3/1985, de 18 de marzo, de Metrología y se establece el Control Metrológico CEE mediante el Real Decreto 1296/1986, de 28 de junio. Dicho Real Decreto crea un control metrológico aplicable a los instrumentos de medida, así como a los métodos de control metrológico. En virtud de éste se dictó el Real Decreto 597/1988, el cual presenta una serie de peculiaridades con respecto a los controles nacionales. En este Real Decreto, entre otras cuestiones, se asigna al Centro Español de Metrología el Control Metrológico CEE.

Por otro lado, en el Real Decreto 244/2016, de 3 de junio, se desarrolla la Ley 32/2014, de 22 de diciembre, de Metrología. El objeto de esta ley es el establecimiento y la aplicación del Sistema Legal de Unidades de Medida, así como

la fijación de los principios y de las normas generales a las que debe ajustarse la organización y el régimen jurídico de la actividad metrológica en España. Este real decreto regula los siguientes aspectos:

a) El Sistema Legal de Unidades de Medida y, en concreto, la trazabilidad, exactitud e incertidumbre de los patrones, instrumentos de medida y la trazabilidad y certificación de los materiales de referencia. Las unidades legales de medida están actualmente reguladas por el Real Decreto 2032/2019, de 30 de diciembre, de acuerdo con lo dispuesto en la Conferencia General de Pesas y Medidas, instituida por el Convenio de París, de 20 de mayo de 1875, sobre la Unificación y Perfeccionamiento del Sistema Métrico Decimal.

b) El control metrológico del Estado, en sus diferentes fases: Evaluación de la conformidad, verificación periódica y verificación después de la modificación o reparación.

c) La organización de la metrología en España. El Real Decreto 584/2006, de 12 de mayo, por el que se determina la estructura, composición y funcionamiento del Consejo Superior de Metrología y el Real Decreto 1342/2007, de 11 de octubre, por el que se aprueba el Estatuto del Centro Español de Metrología, regulan las instituciones de la estructura metrológica en España. En este real decreto se regula el registro del control metrológico y se incluyen disposiciones relativas a la designación y notificación de los organismos notificados, de control metrológico y de autorización de verificación metrológica.

Al mismo tiempo, la Orden ICT/149/2020, de 7 de febrero, modifica el anexo del Real Decreto 648/1994, de 15 de abril, por el que se declaran los patrones nacionales de medida de las unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades; y la Orden ITC/2581/2006, de 28 de julio, define los patrones nacionales de las unidades derivadas, del sistema internacional de unidades, También se ha de tener en cuenta la Orden ICT/155/2020, de 7 de febrero, por la que se regula el control metrológico del Estado de determinados instrumentos de medida.

El Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, establece las unidades legales de medida. Este real decreto implanta las definiciones de las unidades, sus nombres y símbolos, así como las reglas para la formación de sus múltiplos y submúltiplos de conformidad con los acuerdos de la CGPM y la normativa de la Unión Europea.

El Real Decreto 493/2020, de 28 de abril, modifica el Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida. En el plano de los acuerdos de la CGPM, el SI ha sido sucesivamente modificado para adaptarlo a las nuevas necesidades y a las mejoras técnicas. La última revisión ha

sido adoptada por la 26ª CGPM en noviembre de 2018, tras años de trabajo y como continuidad a las decisiones adoptadas en la Resolución 1 de la 24ª CGPM en 2011 relativa a abordar una nueva forma de definir las siete unidades básicas del SI a partir de constantes fundamentales de la física u otras constantes de la naturaleza y en la 25ª CGPM en 2014, reafirmando esta decisión.

5. ORGANIZACIÓN NACIONAL DE LA METROLOGÍA

A nivel nacional la organización de la metrología más extendida en la mayoría de las naciones es la de un Laboratorio Primario Nacional, encargado de la realización de la mejor definición de las unidades SI, es decir, del mantenimiento de las Referencias Nacionales y, en algunos casos, participando en la definición internacional de la misma unidad, trabajando en este último caso en el ámbito de la metrología científica. En definitiva, el Laboratorio Primario Nacional puede considerarse como la máxima institución responsable de la metrología nacional; debido a esto, suele estar generalmente relacionado con la Administración del Estado.

En este Laboratorio se apoyan un conjunto de laboratorios, tanto públicos como privados, que se encargan de diseminar esas referencias hasta los niveles metrológicos más bajos, y que trabajan en metrología aplicada, encontrándose dentro de los Servicios de Calibración y Ensayos Nacionales.

En España la organización metrológica queda establecida como se indica a continuación. Como podíamos suponer, el Laboratorio Nacional de Metrología es el Centro Español de Metrología (C.E.M.). En la actualidad el C.E.M. realiza el trabajo de Metrología Legal en España en conjunto con otras instituciones de las Comunidades Autónomas españolas que tienen asignada parte de esta labor. Ahora bien, el trabajo relacionado con la Metrología Científica no se encuentra elaborado en su totalidad; efectivamente, no se dispone en algunos campos de una referencia operativa del mayor nivel metrológico en España. Por ello, es necesario recurrir a laboratorios de la referencia del Servicio Nacional de Calibración, algunos de los cuales participan en las comparaciones nacionales para la definición absoluta de la unidad.

Otros organismos similares al CEM en otras naciones son: PTB en Alemania, NPL en Gran Bretaña, IMGC en Italia, LNE y ETCA en Francia, NIST en USA...

El Servicio Nacional de Calibración y Ensayos que en estos momentos actúa en España está englobado en la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC). Otras organizaciones similares de diversas naciones son: BNM en Francia, DKD en Alemania, NAMAS en Gran Bretaña, SIT en Italia...

Por su parte, el Servicio Nacional de Ensayos en España estaba constituido por la Red Española de Laboratorios de Ensayos (RELE). Esta asociación modificó su denominación por Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) según la Resolución de 2 de octubre de 1995, de la Dirección General de Calidad y Seguridad Industrial del Ministerio de Industria.

Los Estatutos de ENAC establecen, entre otras cuestiones, los objetivos de la asociación:

- Formular, implantar y dirigir en el ámbito nacional, sistemas de acreditación de entidades de certificación, entidades auditoras y de inspección, laboratorios de ensayo y laboratorios de calibración, tanto públicas como privadas, en todo lo relacionado con la calidad y seguridad industriales, con arreglo a la legislación española y a las normas y criterios internacionalmente reconocidos.
- Cooperar con la Administración pública española en las actuaciones de fomento de las actividades de certificación, inspección, auditoría, ensayo y calibración, promoviendo la aplicación de la normativa española comunitaria relacionada con el sistema integrado de calidad industrial, así como la participación en los organismos internacionales correspondientes.
- Establecer la comunicación y las relaciones oportunas con organismos extranjeros y, particularmente, con los de aquellos países pertenecientes a la Comunidad Europea que tengan objetivos y funciones similares.
- Fomentar la creación en todo el territorio nacional de una red de laboratorios acreditados que cubra las necesidades de ensayo de carácter industrial.
- Fomentar el establecimiento, perfeccionamiento y especialización de las entidades y laboratorios asociados, asegurando la calidad, seguridad y conformidad a normas de su actividad a través de procedimientos unificados de certificación, acreditación, inspección, auditoría y calibración y ensayo.
- En general, estudiar, coordinar e impulsar todas las actividades y técnicas de interés en general relacionadas con las actividades propias de la Asociación.

En rasgos generales, sus principales misiones consisten pues en la acreditación de laboratorios para asegurar que realizan un ensayo determinado conforme a su norma correspondiente, cumpliendo las condiciones para asegurar su trazabilidad, establecer directrices de funcionamiento, y dar apoyo técnico a los laboratorios asociados, pertenecientes a la Asociación.

ENAC pertenece a la European cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL), asociación basada en un Memorandum de Entendimiento elaborado el 31 de mayo de 1994. A partir de aquí se ha ido desarrollando un programa de acuerdos

multilaterales en aras a una forma de operar equivalente en los esquemas de acreditación de laboratorios de calibración y ensayos. Los principales puntos del programa multilateral de EAL son los siguientes: participación en comités, en programas de intercomparación de laboratorios con discusión de los resultados, evaluación y reevaluaciones de los miembros de EAL y cooperación entre los diversos miembros.

El primer acuerdo multilateral firmado se llevó a cabo en diciembre de 1989 en materia de calibración (WECC) y posteriormente en mayo de 1992 en el campo de ensayos (WELAC). ENAC es miembro de EAL desde noviembre de 1992, en materia de ensayos, y desde julio de 1995, en materia de calibración.

Otros miembros que han suscrito el acuerdo multilateral son: DANAK de Dinamarca, FINAS de Finlandia, COFRAC de Francia, NAB de Irlanda, NA de Noruega, SWEDAC de Suecia, SAS de Suiza, RvA de Holanda, UKAS del Reino Unido, todos ellos en materia de calibración y de ensayos.

En materia de calibración figuran PTB y DKD de Alemania y algunos miembros del SIT en Italia. Existen otros miembros en el ámbito únicamente de ensayos.

ENAC, en el desarrollo de sus funciones, ha publicado diversos documentos entre los que podemos destacar los siguientes:

- **Procedimiento de acreditación (PAC-ENAC):** Es el documento de proceso básico en el sistema de acreditación. Describe el proceso general de acreditación (solicitud, evaluación, respuesta del solicitante/acreditado, definición de alcances y toma de decisiones; derechos y obligaciones del acreditado; etc) y, que establece las condiciones contractuales para la prestación del servicio que tanto ENAC como el solicitante se comprometen a cumplir. Es aplicable a todos los esquemas.
- **Criterios Generales de Acreditación (CGA-ENAC):** Documento de carácter transversal, aclara los requisitos de las normas de acreditación y establece cómo demostrar el cumplimiento. Son elaborados por ENAC de acuerdo, en su caso, con lo establecido por las organizaciones internacionales de acreditación. No todos los esquemas disponen de un CGA.
- **Criterios Específicos de Acreditación (CEA-ENAC):** Tienen un objetivo similar a los CGA pero para un esquema o actividad determinada (Documento de carácter vertical).
- **Reglamentos de Esquema (RDE):** Son documentos elaborados por el propietario de un esquema específico (o por la autoridad competente en actividades reglamentarias) y pueden incluir tanto requisitos adicionales a los establecidos en la norma de acreditación como criterios adicionales y modificaciones al proceso de evaluación. (Documento de carácter vertical).

- **Notas Técnicas (NT):** Amplían y detallan aspectos específicos del Proceso de Acreditación; ajustan el proceso de acreditación para actividades o alcances específicos o para organizaciones en determinadas áreas o establecen pautas (elaboración de alcances; prestación del servicio acreditado...).
- **Guías (G-ENAC):** Recogen recomendaciones, orientaciones o establecen buenas prácticas sobre cómo cumplir con los criterios de acreditación para determinadas normas o actividades concretas. A diferencia de los anteriores, son no obligatorias.
- **EAXX; ILAC XX; IAF XX:** documentos elaborados por EA, ILAC o IAF y pueden tener carácter obligatorio o informativo (su carácter se indica expresamente en el propio documento).

En los documentos se incluye también la “Serie”, que identifica los esquemas a los que es de aplicación. Entre ellas destacamos la Serie 1: Ensayo; la Serie 2: Calibración; la Serie 4: Certificación de sistemas de gestión; la Serie 5: Certificación de producto y la Serie 7: Inspección.

De forma concreta, en la temática que nos ocupa, podemos citar a modo de ejemplo los siguientes documentos y guías:

- CGA- ENAC-LEC: Criterios generales para la acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración según norma UNE-EN-ISO/IEC 17025.
- PAC-ENAC-LEC: Procedimiento de Acreditación de laboratorios.
- G-ENAC-09: Guía para la expresión de la incertidumbre en los ensayos cuantitativos.
- G-ENAC-14: Guía sobre la participación en programas de intercomparación.
- G-ENAC-15: Directrices para informar sobre el cumplimiento con especificaciones. Documento ILAC G8:03/2009.
- G-ENAC-20: Guía para la selección y utilización de kits de ensayo por los laboratorios acreditados.
- NT-03: Política de ENAC sobre intercomparaciones.
- NT-18: Laboratorios de Ensayo: Acreditación para categorías de Ensayo.
- NO-07: Notificación de cambios en Procedimientos técnicos de acuerdo al Procedimiento de Acreditación de Laboratorios –apartado 10.1–.
- NO-11: Desviaciones: Clasificación y Tratamiento.
- EA-4 02 M 2013: Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones.
- ILAC- P 14 01 2013: Política de ILAC sobre incertidumbre en calibración.

Además, resulta también procedente mencionar de nuevo la norma UNE EN ISO 17025:2016 sobre requisitos generales para la competencia técnica de los Laboratorios de Ensayo y Calibración.

6. EVOLUCIÓN DEL PROCESO NORMALIZADOR DE LOS SISTEMAS DE LA CALIDAD

A lo largo de los años 1960-1970 se crearon normas de sistemas de la calidad tanto a nivel nacional como internacional, siendo la actividad relacionada con defensa militar la pionera en estas tareas.

En 1982, el gobierno británico, preocupado por la calidad de sus productos y el fracaso de las exportaciones, empieza a desarrollar un esfuerzo para potenciar el uso generalizado de normas para el aseguramiento de la calidad, que tuvo un eco favorable a nivel internacional.

Paralelamente, en 1979 fue creado, en el seno de ISO, el Comité Técnico ISO/TC 176 para abordar aspectos relacionados con el control y la gestión de la calidad. Se iniciaron los trabajos de este comité con la elaboración de la Norma ISO 8402 acerca de los términos empleados en el campo de la calidad. Posteriormente desarrolló la normativa relativa a los sistemas de la calidad, conocida como Serie ISO 9000, que fue publicada en 1987.

La normativa sobre calidad desarrollada por ISO fue inicialmente en buena medida adoptada por la mayoría de los organismos de normalización nacionales tales como AENOR, en forma de normas UNE de la familia 66000, y CEN, como normas europeas de la familia EN 29000. La normativa UNE sobre calidad ha sido desarrollada por el Comité Técnico de Normalización (Comité nº166), que tiene su secretaría en la Asociación Española para la Calidad (AEC).

En la actualidad, la mayoría de las normas UNE y EN de las series 66000 y 29000 no se encuentran vigentes, siendo sustituidas por la denominación establecida por ISO, con modificación también del contenido, alcance y número de normas.

En particular, la serie de normas UNE 66500 trataba de los criterios generales de los laboratorios de ensayo y organismos de acreditación de laboratorios y de certificación de productos. Dichas normas eran equivalentes a las normas europeas de la serie 17000 (17001-17014). Todas estas normas ya no están vigentes.

En el ámbito de normas UNE de la serie 66000, en el ámbito de los sistemas de calidad, se pueden destacar las siguientes que siguen vigentes:

- UNE 66173:2003. Los recursos humanos en un sistema de gestión de la calidad. Gestión de las competencias.

- UNE 66175:2003. Sistemas de gestión de la calidad. Guía para la implantación de sistemas de indicadores.
- UNE 66178:2004. Sistemas de gestión de la calidad. Guía para la gestión del proceso de mejora continua.
- UNE 66180:2008. Sistemas de gestión de la calidad. Guía para la gestión y evaluación metrológica
- UNE 66923:2003. Sistemas de gestión de la calidad. Criterios y orientaciones para el desarrollo de documentos que cumplan las necesidades de productos específicos y de sectores económicos e industriales.

Se ha generalizado el uso de las normas ISO 9000, consecuencia de un estudio profundo por parte de las autoridades comunitarias y de una política desarrollada para la consecución del Mercado Único.

En definitiva, se ha planteado la calidad como una estrategia competitiva frente a competencias foráneas, así como una estrategia de eliminación de barreras técnicas que permitan conseguir el Mercado Único.

La normativa mostrada, junto con la que se indica posteriormente, se centra en la gestión y aseguramiento de la calidad, así como en lo relativo a laboratorios de ensayo y técnicas de control de la calidad. A efectos de la implantación y seguimiento de actuaciones concretas en calidad debe ser completada con las normas existentes en el campo de actuación correspondiente (alimentación, materiales, etc); también deberán tenerse en cuenta los documentos relativos a las Comisiones Técnicas de Normalización sobre Metrología y Ensayos.

Además, existe la normativa de carácter militar relativa a sistemas de aseguramiento de la calidad. En este contexto se habla de la normativa NATO-AQAP, cuya homología en España son las normas PECAL del Ministerio de Defensa.

7. SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD

Un sistema de la calidad es el conjunto de la estructura de organización, de responsabilidades, de procedimientos, de procesos y de recursos que se establecen para llevar a cabo la gestión de la calidad.

Cuando se habla de desarrollar e implantar por parte de una organización, su sistema de calidad, se pueden presentar dos situaciones distintas:

- Condiciones no contractuales. El sistema intenta dar confianza y garantizar el producto o servicio a la propia organización y a la dirección de la misma; se suele denominar SISTEMA PARA LA GESTION INTERNA DE LA CALIDAD.

- Condiciones contractuales. La organización intenta dar confianza al cliente de aquellos elementos del sistema de calidad que éste considera con mayor influencia en la calidad del producto o servicio; estamos hablando de un SISTEMA DE ASEGURAMIENTO EXTERNO DE LA CALIDAD.

La norma UNE-EN ISO 9000:2015; “Sistemas de gestión de la calidad. Fundamentos y vocabulario”, establece los fundamentos relativos a los sistemas de gestión de la calidad, así como el vocabulario específico en el ámbito. Los elementos de un sistema de gestión interna de la calidad son recogidos por las normas UNE EN ISO 9001:2015 “Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos” y UNE EN ISO 9004:2018 “Gestión de la calidad. Calidad de una organización”. De los distintos elementos que se establecen en dichas normas podemos destacar el importante papel del control metrológico, necesario o potencialmente necesario según la actividad realizada, en algunos de dichos elementos:

- Calidad en las especificaciones y en el diseño: ensayo y medición del producto, calificación y validación del diseño, control de las modificaciones del diseño o gestión de la configuración.
- Calidad en los aprovisionamientos: planificación y controles en la inspección de recepción.
- Calidad en la producción: control de calidad del proceso, suministros, servicios complementarios y condiciones ambientales.
- Control de la producción: control y trazabilidad de componentes, mantenimiento y control del equipo, control de las modificaciones del proceso, control del estado de la verificación.
- Verificación del producto: entrada de materiales y componentes, inspección durante el proceso, verificación del producto acabado.
- Control de los equipos de inspección, medición y ensayo: en todas sus facetas, es decir, procesos y técnicas de evaluación, elementos de medición y ensayo (calibración de patrones e instrumentos, trazabilidad de las medidas y ensayos, registro de resultados de calibración, etc.), control de la medición de los suministradores, acciones correctivas, medición y ensayo en instalaciones ajenas.

En el contexto indicado se incluye la certificación del sistema de gestión de la calidad, que es una de las formas de asegurar que la organización considerada ha implementado un sistema para la gestión de sus actividades. La norma ISO/IEC 17021 especifica requisitos para los organismos que realizan las actividades de auditoría y certificación de sistemas de gestión. El cumplimiento de los requisitos establecidos por ISO/IEC 17021 tiene por objeto asegurar que los

organismos de certificación realicen su actividad de manera competente, coherente e imparcial, facilitando el reconocimiento de los mismos y la aceptación de sus certificaciones en el ámbito nacional e internacional. La norma ISO/IEC 17021 se estructura en 9 partes.

En particular, las entidades u organismos de certificación se basan en laboratorios de ensayos, lo que implica la necesidad de promover la confianza en la operación de los laboratorios. La norma UNE-EN-ISO/IEC 17025:2017 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”, contiene requisitos que permiten a los laboratorios demostrar que operan de forma competente y que tienen la capacidad de generar resultados válidos. Son destacables los requisitos que establece la norma en relación a la trazabilidad metrológica de los resultados de las mediciones y su vinculación con la referencia apropiada mediante la contribución de las incertidumbres relacionadas. Se indica específicamente la trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades. También se establecen los registros y sistemas de documentación de los resultados que se obtienen y de los procedimientos de medición empleados y se establecen las posibilidades para la validación de métodos, incluyendo las comparaciones inter-laboratorio como uno de ellos.

8. SISTEMAS DE GESTIÓN DE LAS MEDICIONES. REQUISITOS PARA LOS PROCESOS DE MEDICIÓN Y LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN (UNE-EN ISO 10012)

Como se puede intuir de lo expuesto, el aseguramiento de la calidad de las medidas debe considerarse como uno de los pilares básicos sobre el que se sustenta cualquier Sistema de la Calidad. Toda la normativa al respecto ha abordado dicho aspecto planteando una serie de requerimientos tendentes a proporcionar garantía objetiva de las mediciones realizadas para comprobar la conformidad del producto.

Si bien en las normas ISO 9000 está presente el proceso de calibración exigible a los instrumentos de medida para garantizar su trazabilidad, con un enfoque sistemático, estableciendo intervalos de recalibración apropiados, documentando los métodos utilizados en las calibraciones y manteniendo registros que indiquen el cumplimiento del plan de calibración, la aparición de la norma ISO 10012 plantea una serie de requisitos adicionales, encaminados a garantizar la bondad del equipo de medida entre calibraciones.

La norma ISO 10012: 2003 desarrolla el concepto de confirmación metrológica, así como establece las directrices para controlar los procesos de medición.

De esta manera, no sólo se confía a los instrumentos el aseguramiento de la calidad de las mediciones sino al proceso de medida en su conjunto.

9. NORMATIVA REFERENTE A INSTRUMENTOS Y ELEMENTOS DE MEDICIÓN EN EL ÁMBITO DE LA METROLOGÍA DIMENSIONAL

En este epígrafe se incluyen las normas UNE y UNE EN ISO que son pertinentes en el ámbito de la metrología dimensional clasificadas en función de la temática que contemplan.

- Instrumentos de medida:
 - UNE 82306:1980. Micrómetros de exteriores.
 - UNE 82308:1985. Niveles de burbuja.
 - UNE 82309-1:1999. Mesas de planitud. Parte 1: Acero fundido.
 - UNE 82309-2:1997. Mesas de planitud. Parte 2: Granito.
 - UNE 82310:1985. Comparadores de cuadrante.
 - UNE 82318:1994. Micrómetros verticales y peanas.

- Ajustes y tolerancias:
 - UNE 82001:1991 Terminología de los ajustes y tolerancias.
 - UNE-EN ISO 286-1:2011, Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 1: Base de tolerancias, desviaciones y ajustes. (ISO 286-1:2010)
 - UNE-EN ISO 286-1:2011/AC:2013, Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 1: Base de tolerancias, desviaciones y ajustes. (ISO 286-1:2010/Cor 1:2013)
 - UNE-EN ISO 286-2:2011, Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 2: Tablas de las clases de tolerancia normalizadas y de las desviaciones límite para agujeros y ejes. (ISO 286-2:2010)
 - UNE-EN ISO 286-2:2011/AC:2013, Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 2: Tablas de las clases de tolerancia normalizadas y de las desviaciones límite para agujeros y ejes. (ISO 286-2:2010/Cor 1:2013).
 - UNE 4031:1976 EX, Verificación de tolerancias de piezas lisas. Generalidades. Calibres de límites.
 - UNE 4032:1979, Verificación de tolerancias de piezas lisas. Medida y empleo de los calibres de límites.
 - UNE 4033:1983, Tolerancias de fabricación y desgaste admisible de calibres.

- UNE 4035:1981, Tolerancias de medida. conversión de pulgadas en milímetros y viceversa.
- UNE 4036:1979, Verificación de tolerancias de piezas lisas. Instrumentos de medida de lectura directa.
- UNE-EN 22768-1:1994, Tolerancias generales. Parte 1: tolerancias para cotas dimensionales lineales y angulares sin indicación individual de tolerancia.
- UNE-EN 22768-2:1994, Tolerancias generales. Parte 2: tolerancias para cotas geométricas sin indicación individual de tolerancia. (ISO 2768-2:1989). (Versión oficial EN 22768-2:1993).

- Redondez y acabado superficial:
- UNE 82301:1986, Rugosidad superficial. Parámetros, sus valores y las reglas generales para la determinación de las especificaciones.
- UNE 82302:1992, Clasificación de los aparatos y dispositivos que sirven para medir y evaluar los parámetros geométricos de los estados de superficie.
- UNE 82303:1991, Instrumentos de medida de la rugosidad de las superficies por el método del perfil. Vocabulario.
- UNE 82305-1:1991, Muestras de comparación de rugosidad. Parte 1: superficies obtenidas por torneado, rectificado, mandrinado, fresado, limado y cepillado.
- UNE 82307:1994. Medidas de redondez y de perfiles curvos. Diagrama de bloques de un sistema medidor. Términos, definiciones y parámetros de redondez
- UNE 82320:1995. Métodos para la evaluación de las desviaciones de redondez. Medición de las variaciones del radio.

- Bloques patrón y materiales de referencia certificados:
- UNE EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS), Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998). AENOR, 2000.
- UNE EN ISO 3650:2001 ERRATUM Especificación geométrica de productos (GPS). Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998). AENOR, 2001.
- UNE 82130:2003 IN, Términos y definiciones utilizados en relación con los materiales de referencia
- UNE 82130:2003 IN/1M:2014, Términos y definiciones utilizados en relación con los materiales de referencia.

- UNE 82131:2003 IN, Materiales de referencia. Contenido de los certificados y las etiquetas.
- UNE 82133:2004 IN, Usos de los materiales de referencia certificados.

10. NORMATIVA APLICABLE A LA VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN RELATIVAS A ENSAYOS MECÁNICOS Y A MÁQUINAS DE ENSAYOS MECÁNICOS

Se mencionan a continuación las normas que establecen los requisitos para la verificación y calibración en materia de ensayos mecánicos, fundamentalmente dirigidas a la definición de patrones y de materiales de referencia, así como a la calibración y verificación de las máquinas empleadas.

- Materiales metálicos. Ensayo de dureza Brinell. Parte 2: Verificación y calibración de las máquinas de ensayo. (ISO 6506-2:2015).
- Materiales metálicos. Ensayo de dureza Brinell. Parte 3: Calibración de los bloques patrón. (ISO 6506-3:2015).
- UNE-EN ISO 3738-2:2007, Metal duro. Ensayo de dureza Rockwell (Escala A). Parte 2: Preparación y calibración de bloques patrón.
- UNE-EN ISO 6508-2:2015, Materiales metálicos. Ensayo de dureza Rockwell. Parte 2: Verificación y calibración de las máquinas de ensayo y de los indentadores. (ISO 6508-2:2015).
- UNE-EN ISO 6508-3:2015, Materiales metálicos. Ensayo de dureza Rockwell. Parte 3: Calibración de los bloques patrón. (ISO 6508-3:2015).
- UNE-EN ISO 6507-2:2018, Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 2: Verificación y calibración de las máquinas de ensayo.
- UNE-EN ISO 6507-3:2018, Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 3: Calibración de los bloques patrón.
- UNE-EN ISO 4545-2:2018, Materiales metálicos. Ensayo de dureza Knoop. Parte 2: Verificación y calibración de las máquinas de ensayo.
- UNE-EN ISO 4545-3:2018, Materiales metálicos. Ensayo de dureza Knoop. Parte 3: Calibración de los bloques patrón.
- UNE-EN ISO 148-2:2017, Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 2: Verificación de las máquinas de ensayo. (ISO 148-2:2016).
- UNE-EN ISO 148-3:2017, Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 3: Preparación y caracterización de las probetas Charpy con entalla en V para la verificación indirecta de las máquinas de ensayo de impacto con péndulo. (ISO 148-3:2016).

- UNE-EN ISO 13802:2016, Plásticos. Verificación de la máquina de ensayo por impacto del péndulo. Ensayos de impacto Charpy, Izod y en tracción. (ISO 13802:2015, Versión corregida 2016-04-01).
- UNE-EN ISO 6892-1:2019. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.
- UNE-EN ISO 7500-1:2018, Materiales metálicos. Calibración y verificación de máquinas de ensayos uniaxiales estáticos. Parte 1: Máquinas de ensayo de tracción/compresión. Calibración y verificación del sistema de medida de fuerza.
- UNE-EN ISO 7500-2:2007 Materiales metálicos. Verificación de máquinas de ensayos uniaxiales estáticos. Parte 2: Máquinas de ensayo de fluencia en tracción. Verificación de la fuerza aplicada.
- UNE-EN ISO 376:2011, Materiales metálicos. Calibración de los instrumentos de medida de fuerza utilizados para la verificación de las máquinas de ensayo uniaxial.

11. NORMATIVA RELATIVA A ELEMENTOS MECÁNICOS: ROSCAS Y ENGRANAJES

Por el contenido del presente texto, que incluye la práctica de medición y verificación de roscas y de engranajes, se indican a continuación las siguientes normas relacionadas:

- UNE 17701: 2002 (equivalente ISO 68-1:1998), Rosca métrica para usos generales.
- UNE-EN ISO 4759-1:2001, Tolerancias para elementos de fijación. Parte 1: Pernos, tornillos, espárragos y tuercas. Productos de clase A, B y C. (ISO 4759-1:2000).
- UNE-EN ISO 4759-3:2017, Tolerancias para los elementos de fijación. Parte 3: Arandelas para pernos, tornillos y tuercas. Productos de clase A, C y F. (ISO 4759-3:2016).
- UNE 18004-1:1993, Engranajes. Vocabulario y definiciones geométricas. Parte 1: definiciones generales, engranajes y pares de engranajes cilíndricos, cónicos e hipoides.
- UNE 18004-4:1979, Engranajes. Vocabulario y definiciones geométricas. Engranajes de tornillo.
- UNE 18005:1984, Engranajes cilíndricos para mecánica general y mecánica pesada. Módulos y diametrales Pitch.
- UNE 18016:1984, Engranajes cilíndricos para mecánica general y mecánica pesada. Cremallera de referencia.

- UNE 18040:1965, Engranajes. Nomenclatura de los desgastes y rotura de los dientes.
- UNE 18048:1983, Sistema ISO de precisión de ruedas dentadas y engranajes cilíndricos-rectos con dientes de perfil evolvente.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS METROLÓGICOS BÁSICOS

1. Términos empleados en metrología.
 - 1.1. Magnitud física. Mensurando.
 - 1.2. Valor verdadero de una magnitud.
 - 1.3. Valor convencionalmente verdadero de una magnitud.
 - 1.4. Magnitud de influencia.
 - 1.5. Exactitud de medida.
 - 1.6. Repetibilidad.
 - 1.7. Reproducibilidad.
 - 1.8. Patrón.
 - 1.9. Trazabilidad.
 - 1.10. Calibración.
 - 1.11. Material de referencia.
 - 1.12. Incertidumbre de medida.
2. Clasificación de la metrología.
3. Cualidades del instrumento de medida.
 - 3.1. Instrumento de medida.
 - 3.2. Incertidumbre del instrumento de medida.
 - 3.3. Clase de exactitud.
 - 3.4. Escala.
 - 3.5. División de escala.
 - 3.6. Rango de medida.
 - 3.7. Sensibilidad.
 - 3.8. Resolución
 - 3.9. Transparencia.
 - 3.10. Deriva.
 - 3.11. Confirmación metrológica.
 - 3.12. Verificación de un instrumento de medida.
4. Unidades y patrones de medida.
 - 4.1. Introducción.
 - 4.2. Sistema Internacional de Unidades (SI).

1. TÉRMINOS EMPLEADOS EN METROLOGÍA

En este epígrafe se establecen las definiciones de los términos empleados en metrología que han sido seleccionados por su importancia en la comprensión de este capítulo. Estas definiciones constituyen interpretaciones que los autores han realizado teniendo en cuenta diversas fuentes de información. En este sentido, es recomendable consultar los términos definidos en el Vocabulario Internacional de Metrología, 3ª edición (2012) del Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), cuya traducción a español se encuentra disponible en el Centro Español de Metrología. Existe también en preparación una 4ª edición, tal y como se desprende de las informaciones existentes en INTERNET.

1.1. *MAGNITUD FÍSICA. MENSURANDO*

Se define magnitud física como un atributo observable y medible de un fenómeno, de un cuerpo o de una sustancia. Se puede referir a una magnitud en general (longitud) o a una magnitud particular (longitud de una barra determinada). El término *mensurando* indica la magnitud particular, objeto de medición.

1.2. *VALOR VERDADERO DE UNA MAGNITUD*

Valor compatible con la definición de una magnitud particular dada. Es un valor que se obtendría por una medición perfecta y, por naturaleza, indeterminado.

1.3. *VALOR CONVENCIONALMENTE VERDADERO DE UNA MAGNITUD*

Valor atribuido a una magnitud particular y aceptado, a veces por convención, como poseedor de una incertidumbre apropiada para un propósito dado.

1.4. *MAGNITUD DE INFLUENCIA*

Magnitud que no es el *mensurando*, pero que puede influir en la medida.

1.5. *EXACTITUD DE MEDIDA*

Grado de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero del *mensurando*. “Exactitud” es un concepto cualitativo. El término *precisión* no debe utilizarse para “exactitud”.

1.6. REPETIBILIDAD (DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES)

Grado de concordancia entre resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando, la misma magnitud, obtenidos con el mismo método, por el mismo observador, con los mismos instrumentos de medida, en el mismo laboratorio y a intervalos de tiempo suficientemente cortos (mediciones efectuadas con aplicación de la totalidad de las mismas condiciones de medida).

1.7. REPRODUCIBILIDAD (DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES)

Grado de concordancia entre los resultados de las mediciones del mismo mensurando, mediciones efectuadas bajo diferentes condiciones de medida.

1.8. PATRÓN

Medida materializada, instrumento de medida, material de referencia o sistema de medida destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores de una magnitud para que sirvan de referencia. Se puede distinguir:

- Patrón colectivo: conjunto de medidas materializadas o de instrumentos de medida similares que, utilizados conjuntamente, constituyen un patrón.
- Patrón de referencia: es aquel patrón en general de la más alta calidad metrológica, disponible en un lugar determinado o en una organización determinada y del cual se derivan las mediciones efectuadas en ese lugar.
- Patrón de trabajo: es aquel patrón que se calibra habitualmente por comparación con el patrón de referencia y que se utiliza para calibrar los aparatos de medida o para verificar las medidas realizadas.
- Patrón internacional: patrón reconocido por acuerdo internacional para servir como referencia internacional para la asignación de valores a otros patrones de la magnitud considerada.
- Patrón nacional: patrón reconocido por decisión nacional para servir de base en un país para la fijación de los valores de todos los otros patrones de la magnitud en cuestión.
- Patrón primario: patrón que presenta las más altas calidades metrológicas en un campo determinado y que dentro de él se utiliza como último término de comparación. En definitiva, los patrones primarios materializan las unidades de medida básicas, de acuerdo a su definición. Con la actual definición de las unidades básicas del SI, los patrones primarios consisten en la realización de una experiencia físico-químico de acuerdo con un procedimiento específico.

En definitiva, un patrón primario puede ser repetido en cualquier lugar siempre que la tecnología y el estadio cultural disponibles lo permitan; es decir, la multiplicidad del patrón primario y su diseminación se hacen más fáciles.

Como hemos mencionado repetidamente, sólo existe un prototipo internacional que es el patrón material que define el kilogramo, unidad de masa. Existen una serie de países, entre ellos España, que poseen duplicados de este prototipo y que son patrones nacionales y primarios de la unidad de masa.

- Patrón secundario: patrón cuyo valor se fija por comparación con un patrón primario.

1.9. TRAZABILIDAD

Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencia, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

1.10. CALIBRACIÓN

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

1.11. MATERIAL DE REFERENCIA

Material o sustancia en la cual uno o más valores de sus propiedades son suficientemente homogéneos y están bien definidos, lo que permite utilizarlos para la calibración de un instrumento, la evaluación de un método de medición, o la asignación de valores a los materiales.

1.12 INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

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

2. CLASIFICACIÓN DE LA METROLOGÍA

Como sabemos, podemos clasificar la metrología en tres áreas en función de sus objetivos (metrología científica, metrología aplicada y metrología legal).

Podemos establecer otra clasificación de la metrología en base al tipo de magnitud que abarque. Según esto distinguimos principalmente:

- Metrología dimensional (dimensiones, formas y acabado superficial).
- Metrología de tiempo y frecuencia.
- Metrología de masa y fuerza.
- Metrología de presión y vacío.
- Metrología de temperatura.
- Metrología de magnitudes ópticas e iluminación.
- Metrología acústica y de vibraciones.
- Metrología de magnitudes eléctricas y electromagnéticas.
- Metrología de radiofrecuencia.
- Metrología de radiaciones ionizantes.
- Metrología química.

Desde otro punto de vista podríamos también distinguir la metrología en base a los ámbitos de actuación, los cuales están sujetos a una normativa específica. Es el caso, por ejemplo de la metrología en el ámbito de los productos sanitarios.

3. CUALIDADES DE UN INSTRUMENTO DE MEDIDA

De nuevo, pueden consultarse estos términos en el Vocabulario Internacional de Metrología, tal y como se ha mencionada con anterioridad, ya que los descritos aquí corresponden a una interpretación libre de los autores del presente texto.

3.1. INSTRUMENTO DE MEDIDA

Un instrumento de medida se puede definir como el dispositivo que sirve para deducir de la magnitud a medir, o de algunas otras magnitudes relacionadas con ésta, una indicación o una información equivalente. Un instrumento puede formar parte, junto con otros elementos auxiliares, de un equipo de medida. Existen diversas características para definir las cualidades de un instrumento de medida; además de algunos conceptos que ya conocemos (exactitud, reproducibilidad y repetibilidad), extensibles al concepto de instrumento de medida, se pueden establecer los que se indican a continuación.

3.2. INCERTIDUMBRE DEL INSTRUMENTO DE MEDIDA

Es la contribución del instrumento a la incertidumbre de medida; más específicamente, es el valor mínimo de la incertidumbre de medida que puede obtenerse utilizando correctamente el instrumento. Caracteriza la clase de un instrumento.

3.3. CLASE DE EXACTITUD

Suele establecer un clase de instrumentos de medida que satisfacen a ciertas exigencias metroológicas destinadas a conservar la incertidumbre dentro de límites especificados.

3.4. ESCALA

Representa un conjunto ordenado de trazos con cualquier numeración asociada, que forma parte de un dispositivo indicador de un instrumento de medida. Signos en el dispositivo indicador que representan valores de la magnitud medida.

3.5. DIVISIÓN DE ESCALA

Es la parte de una escala comprendida entre dos trazos consecutivos cualesquiera.

3.6. RANGO DE MEDIDA

Es el conjunto de valores de una escala de un instrumento, para los que el error de un instrumento de medida se supone comprendido entre límites especificados. El campo de medida se define por sus límites inferior y superior, salvo en el caso que empiece en cero en que basta especificar el límite superior o ***alcance del instrumento*** (valor máximo del rango de medida).

3.7. SENSIBILIDAD

Es el cociente del incremento de la respuesta de un instrumento de medida por el incremento correspondiente de la señal de entrada.

3.8. RESOLUCIÓN

Es el incremento mínimo en la magnitud medida que provoca en el indicador una variación claramente perceptible.

3.9. TRANSPARENCIA

Es la aptitud de un instrumento de medida para no alterar el mensurando.

3.10. DERIVA

Es la variación lenta con el tiempo de una característica metroológica de un instrumento de medida.

3.11. AJUSTE

Es la operación destinada a llevar un instrumento de medida a un estado de funcionamiento caracterizado por tener desviaciones de indicación suficientemente pequeñas, para que sea adecuado para su uso.

3.12. CONFIRMACIÓN METROLÓGICA

Es el conjunto de operaciones requeridas para asegurar que un equipo de medición cumple con los requisitos establecidos para su uso planificado.

3.13. VERIFICACIÓN DE UN INSTRUMENTO DE MEDIDA

Es el conjunto de operaciones efectuadas por un organismo legalmente autorizado y que tiene por objeto comprobar y afirmar que un instrumento de medida satisface enteramente los reglamentos técnicos aplicables. Por extensión, el término verificación se aplica también cuando las operaciones las realiza un organismo acordado entre las partes.

4. UNIDADES Y PATRONES DE MEDIDA

4.1. INTRODUCCIÓN

Una magnitud física se define como el atributo observable y medible de un fenómeno o cuerpo, caracterizado por su naturaleza, su unidad (de la misma naturaleza que ella), y su valor numérico o medida. De acuerdo con ello podemos establecer: Magnitud física = medida x unidad.

La unidad de medida es aquella magnitud física cuyo valor numérico se admite convencionalmente como uno. Con ella se miden todas las magnitudes de una misma clase.

Si al principio bastó con medir, el desarrollo de la técnica exigió posteriormente medir con precisión, lo que ha supuesto una evolución de la metrología en general y de las unidades de medida en particular. Así, en la actualidad, las unidades se definen en base a experiencias físico-químicas. Esto hace que los patrones primarios sean reproducibles en la medida en que exista la tecnología disponible para su realización en la comunidad correspondiente.

Respecto a los sistemas de unidades podemos indicar que son varios los que han existido, y en parte aún perduran algunos de ellos, basados en criterios y magnitudes diferentes, con el consiguiente confusionismo. En los últimos tiempos el sistema de unidades adoptado ha sido, sin duda, el Sistema Internacional de Unidades (SI).

En España se establece el Sistema Legal de Unidades en el Real Decreto 1317/1989 (BOE 13-10-89). Este Decreto fue posteriormente modificado por el Real Decreto 1737/1997, de 20 de noviembre. En el año 2009 se llevó a cabo otra modificación establecida en el Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre y, finalmente, recientemente está en vigor el Real Decreto 493/2020, de 28 de abril, por el que se modifica el Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre. El Real Decreto 493/2020 está publicado en el Boletín Oficial del Estado del 28 de abril de 2020. Por tanto, el Sistema Internacional de Unidades se establece en estos dos últimos Reales Decretos en la actualidad, pudiendo considerarse las siguientes unidades:

- Unidades básicas, que se materializan conforme a su definición. Así, se definen como unidades básicas el metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin, mol y candela, relacionadas respectivamente con las magnitudes longitud, masa, tiempo, intensidad de corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa, respectivamente. Para facilitar la comprensión de las definiciones se establecen ecuaciones algebraicas que materializan las definiciones en función de las constantes utilizadas en su definición.
- Unidades derivadas: son las formadas a partir de productos de potencias de unidades básicas. Las unidades derivadas coherentes son productos de potencias de unidades básicas en las que no existe ningún factor numérico diferente a 1. Las unidades básicas y las derivadas coherentes forman el conjunto de unidades SI coherentes. En los Reales Decretos se hace referencia a los criterios para definir unidades derivadas, así como también se establecen unidades derivadas con nombres y símbolos especiales. También se dedica un apartado a las unidades derivadas expresadas a partir de las que tienen nombres especiales. Así, En el Real Decreto 2032/2009 de 30 de diciembre se enuncian las unidades derivadas en tres tablas: unidades coherentes expresadas a partir de las unidades básicas para magnitudes como área, volumen, velocidad, aceleración, densidad volumétrica, volumen específico, etc.; unidades derivadas con nombres y símbolos especiales, como radián, estereorradián, hercio, newton, vatio, grado celsius, etc.; finalmente, establece unidades derivadas coherentes como, por ejemplo, pascal segundo, newton metro, newton por metro, voltio por metro, etc. Es destacable que se establece el radián y el estereorradián como unidades derivadas cuya expresión en unidades SI básicas son m/m y m^2/m^2 , contrariamente al criterio de adimensionalidad contemplado con anterioridad.

- Otras unidades: son unidades que no pertenecen al SI, pero cuyo uso está aceptado ya que son ampliamente empleadas y tiene una definición exacta en unidades SI: hectárea, litro, tonelada, minuto, hora, día; también grado, minuto y segundo. Existen unidades no pertenecientes al SI utilizadas para responder a necesidades específicas de ciertos grupos: bar, Ångström, decibelio, tex, vuelta, entre otras.

Una de las modificaciones más relevantes que establece el Real Decreto 493/2020 es la definición de la unidad de masa, esto es el kilogramo. Hasta este Real Decreto, el kilogramo era definido como la masa del prototipo internacional del kilogramo. Esta definición se estableció en al 3ª Conferencia General de Pesas y Medidas en el año 1901, tal y como se puede observar en la página 70 del acta de la reunión. Desde entonces, la Metrología Científica ha invertido numerosos esfuerzos por sustituir la definición basada por un patrón físico por una basada en una experiencia de tipo físico-químico, tal y como se establece en la Tabla I del presente capítulo. La definición del resto de unidades básicas, que responden a la definición de este tipo de experimentos, ha ido evolucionando con mayores o menores cambios hasta su definición actual (Tabla I).

El Real Decreto 2032/2009 establece también las reglas de escritura de los símbolos y nombres de las unidades, de expresión de los valores de las magnitudes y para la formación de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades del SI, que de forma resumida se establecen en el epígrafe 4.2.

4.2. SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

4.2.1. REGLAS PRÁCTICAS

Se establecen las siguientes:

- Los símbolos de las unidades SI, excepto el Ω , se expresan con caracteres romanos y minúsculas. Sin embargo, si dichos símbolos corresponden a unidades derivadas de nombres propios, su letra inicial es mayúscula.
- Los símbolos no van seguidos de punto, ni toman la s para el plural.
- El símbolo de la unidad sigue al símbolo del prefijo sin espacio.
- El producto de los símbolos de dos o más unidades se indica con preferencia por medio de un punto como símbolo de multiplicación.
- Los nombres de las unidades debidos a nombres propios de científicos deben escribirse con idéntica ortografía que el nombre de éstos, pero con minúscula inicial.

- Los nombres de las unidades toman una s en el plural, salvo que terminen en s, x o z.
- En los números, la coma se utiliza sólo para separar la parte entera de la decimal. Para facilitar la lectura, se recomienda dividir los números en grupos de tres cifras; estos grupos no se separan jamás por puntos ni por comas. La separación en grupos no se utiliza para los números de cuatro cifras que designan un año.
- Los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades del SI se forman con prefijos que anteceden sin espacio al símbolo de la unidad.

4.2.2. DEFINICIÓN DE LAS UNIDADES BÁSICAS

En la tabla I se indican las magnitudes y unidades básicas o fundamentales del sistema internacional de unidades, junto con los símbolos correspondientes.

Magnitud	Nombre	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Intensidad de corriente eléctrica	amperio	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Intensidad luminosa	candela	cd
Cantidad de sustancia	mol	mol

Tabla I. Unidades básicas del Sistema Internacional de unidades.

Las definiciones de las unidades básicas son las siguientes (Real Decreto 493/2020 de 28 de abril):

Metro: el metro, símbolo m, es la unidad SI de longitud. Se define al fijar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío, c , en 299 792 458, cuando se expresa en la unidad m s^{-1} , donde el segundo se define en función de la frecuencia del cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Kilogramo: el kilogramo, símbolo kg, es la unidad SI de masa. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck, h , en $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$, cuando se expresa en la unidad $\text{J}\cdot\text{s}$, igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, donde el metro y el segundo se definen en función de c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Segundo: el segundo, símbolo s, es la unidad SI de tiempo. Se define al fijar el valor numérico de la frecuencia de la transición hipercana del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, en 9 192 631 770, cuando se expresa en la unidad Hz, igual a s^{-1} .

Amperio: el amperio, símbolo A, es la unidad SI de intensidad de corriente eléctrica. Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental, e, en $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, cuando se expresa en la unidad C, igual a A·s, donde el segundo se define en función de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Kelvin: el kelvin, símbolo K, es la unidad SI de temperatura termodinámica. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Boltzmann, k, en $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, cuando se expresa en la unidad J·K⁻¹, igual a kg·m²·s⁻²·K⁻¹, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h, c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Mol: el mol, símbolo mol, es la unidad SI de cantidad de sustancia. Un mol contiene exactamente $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entidades elementales. Esta cifra es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro, N_A, cuando se expresa en la unidad mol⁻¹, y se denomina número de Avogadro.

Candela: la candela, símbolo cd, es la unidad SI de intensidad luminosa en una dirección dada. Se define al fijar el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, K_{cd}, en 683, cuando se expresa en la unidad lm·W⁻¹, unidad igual a cd·sr·W⁻¹, o a cd·sr·kg⁻¹·m⁻²·s³, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h, c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Se puede observar que las unidades básicas del SI se basan en el valor de 7 constantes a partir de las cuales se obtienen sus definiciones:

- La frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\ 191\ 631\ 770$ Hz.
- La velocidad de la luz en el vacío $c = 299\ 792\ 458$ m/s.
- La constante de Planck $h = 6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}$ J·s
- La carga elemental $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C
- La constante de Boltzmann $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- La constante de Avogadro $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- La eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ Hz, $K_{\text{cd}} = 683$ lm/W.

De este modo, las definiciones de cada unidad especifican el valor numérico exacto de cada constante cuando éste se expresa en unidades SI. La realización práctica de las unidades básicas conforme a su definición requiere la disposición de la tecnología necesaria para ello, así como el conocimiento del procedimiento a llevar a cabo. Una referencia apropiada para la consulta detallada de los procedimientos para la realización práctica de las unidades se puede encontrar en el Anexo 2 del documento “El Sistema Internacional de Unidades, 9ª ed.”, publicado por el Centro Español de Metrología.

CAPÍTULO 3

CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

1. Conceptos estadísticos.
 - 1.1. Población, muestra y variable estadística.
 - 1.2. Función de distribución.
 - 1.3. Función de densidad.
 - 1.4. Esperanza matemática y varianza.
 - 1.5. Función de distribución normal.
 - 1.6. Distribución normal reducida.
 - 1.7. Estimaciones en el muestreo.
 - 1.8. Distribución t de Student.
 - 1.9. Distribución rectangular.
 - 1.10. Distribución triangular. Otras distribuciones.
 - 1.11. Teorema del límite central.
2. Planteamiento del proceso de expresión de la incertidumbre en la medición.
3. Ley de propagación de varianzas.
4. Modelo de medición directa y suma de contribuciones de incertidumbre asociadas al proceso.
5. Evaluación de las incertidumbres de tipo A.
6. Evaluación de las incertidumbres de tipo B.
 - 6.1. Incertidumbre de un patrón, U_0 .
 - 6.2. Incertidumbre debida a la resolución del instrumento de medida, U_R .
 - 6.3. Incertidumbre de deriva de un patrón, U_D .
 - 6.4. Incertidumbre debida al redondeo, U_{RE} .
7. Calibración de un instrumento en un punto de su campo de medida.
8. Cálculo de la incertidumbre asociada al proceso de medición en un punto, U_M
 - 8.1. Consideraciones sobre el cálculo de la incertidumbre típica tipo A en el proceso de medición de un instrumento de medida.
9. Consideraciones acerca del factor de recubrimiento k.

10. Consideraciones acerca de la expresión de la incertidumbre.
11. Calibración y medición de un instrumento en todo su campo de medida.
 - 11.1. Aspectos generales. Selección de los puntos de calibración.
 - 11.2. Cálculo de incertidumbres para todo el campo de medida mediante funciones de correlación.
 - 11.3. Método simplificado para el cálculo de la incertidumbre de medición o de uso global.
12. Consideraciones finales.
 - 12.1. Evaluación de la temperatura como magnitud de influencia.

1. CONCEPTOS ESTADÍSTICOS

1.1. POBLACIÓN, MUESTRA, Y VARIABLE ESTADÍSTICA

Se llama población al conjunto de individuos que son objeto de estudio. Una muestra es cualquier subconjunto de la población.

En una muestra seleccionada de k modalidades (o valores encontrados en términos metrológicos), se denomina frecuencia absoluta al número de individuos n_i que pertenecen a una modalidad dada x_i , esto es, el número de veces que se repite un valor en una muestra de medidas realizadas (por ejemplo). Al número total de individuos de una muestra lo denotamos con n .

Se denomina variable estadística X al conjunto de valores numéricos que puede tomar un carácter cuantitativo. Las variables estadísticas pueden ser discretas o continuas. Una variable estadística es discreta cuando sólo puede tomar un número finito o numerable de valores. La variable se dice que es continua cuando puede tomar todos los valores posibles dentro de un intervalo.

1.2. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN

Se llama función de distribución de la variable aleatoria X , a la función F (de $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$), definida por la expresión (1). En dicha igualdad P_x representa la probabilidad de que la variable sea de menor o igual valor que uno determinado x , esto es, la función de distribución asigna a cada número real x la probabilidad acumulada hasta ese valor x .

$$F(x) = P_x [(-\infty, x)] \quad (1)$$

1.3. FUNCIÓN DE DENSIDAD

Se dice que la función f es una función de densidad de la variable aleatoria continua X , integrable en el sentido de Riemann si verifica que $f(x) \geq 0$, para todo x y si cumple con la condición expresada en (2).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (2)$$

Dada una variable aleatoria X , con función de densidad f y función de distribución F definida por $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx$, se verifica que la probabilidad de que un valor de x pertenezca al intervalo $[a,b]$ es el que se define en la expresión (3).

$$P(X \in [a,b]) = \int_a^b f(x)dx \quad (3)$$

1.4. ESPERANZA MATEMÁTICA Y VARIANZA

La esperanza matemática, valor medio o valor esperado, $E[X]$ o μ , de una variable aleatoria X se obtiene respectivamente para variable discreta y continua mediante las expresiones (4) y (5).

$$\mu = E[X] = \sum xf(x) \quad (4)$$

$$\mu = E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx \quad (5)$$

La media o valor esperado de una variable describe dónde está centrada la distribución de probabilidad y, por tanto, la caracteriza. Sin embargo, la media por sí sola no da una descripción adecuada de la forma de la distribución, siendo necesario conocer cómo se dispersan los valores. El parámetro más utilizado para caracterizar la dispersión de valores es la varianza, σ^2 , definida para variable discreta y continua mediante las expresiones (6) y (7), respectivamente.

$$\sigma^2 = \sum_x (x - \mu)^2 f(x) \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx \quad (7)$$

La raíz cuadrada de la varianza se denomina desviación típica, σ .

Se puede establecer una relación entre la esperanza matemática y la varianza conforme a la expresión (8).

$$\sigma^2 = E[X^2] - \mu^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x)dx - \mu^2 \quad (8)$$

Existe un teorema, debido a Tchebycheff que da una estimación de la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor comprendido en un intervalo $[\mu - k\sigma, \mu + k\sigma]$, siendo k cualquier número real positivo. Este teorema justifica el hecho de utilizar la varianza como medida de dispersión.

1.5. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN NORMAL

Se dice que la variable aleatoria X tiene una distribución normal de parámetros μ y σ , si su función de densidad es la representada por la ecuación (9).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \text{ para todo } x \in \mathbb{R} \quad (9)$$

Se denota a esta distribución como $N(\mu, \sigma)$. La distribución $N(0,1)$ se denomina normal reducida. El paso de una distribución $N(\mu, \sigma)$ a una $N(0,1)$ se obtiene mediante el cambio de variable $Y = \mu + \sigma X$. Esto permite la resolución de problemas a partir de la distribución normal reducida.

1.6. DISTRIBUCIÓN NORMAL REDUCIDA

Dada la variable $Y \in N(\mu, \sigma)$, se denomina variable tipificada a $x = \frac{Y - \mu}{\sigma}$.

Se dice que la variable aleatoria X tiene una distribución normal reducida si su función de densidad viene dada por la expresión (10).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (10)$$

En la figura 1 se representa la función de densidad para una distribución normal reducida $N(0,1)$.

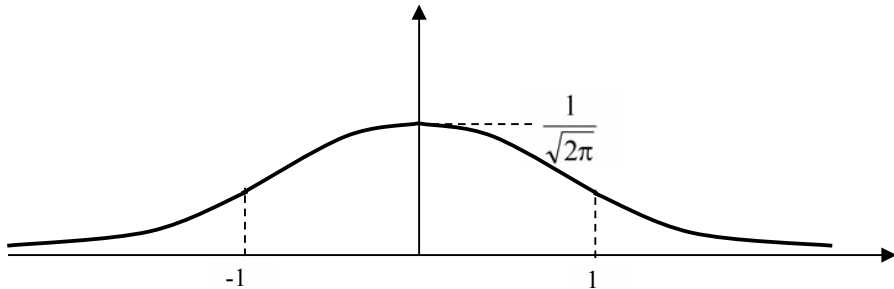


Figura 1. Gráfico de la función de densidad de la distribución normal reducida $N(0,1)$.

La distribución normal presenta una serie de singularidades que pueden ser enumeradas del siguiente modo:

- La media μ vale 0 y la varianza σ^2 vale 1.
- La función de densidad es simétrica respecto del eje Y y tiene como asíntota el eje X .

- Los puntos de inflexión de la curva de la función de densidad se sitúan en el valor de la varianza.

El área encerrada en la curva hasta un determinado valor x (figura 2a) representa la probabilidad acumulada de la variable X hasta dicho valor, esto es, la probabilidad de que el valor de la variable sea menor o igual que x ($X \leq x$). Del mismo modo se puede determinar la probabilidad de que la variable esté contenida en un intervalo centrado en el valor medio μ , expresando la semiamplitud del intervalo en función del valor de la variable k (figura 2b). El valor del área comprendida en el intervalo, que da la probabilidad mencionada, puede obtenerse integrando la función de densidad en el intervalo.

En cualquier caso, existen tablas que expresan el área encerrada en la curva y que son de aplicación más inmediata. Por la significación que tiene el empleo de la distribución normal en el ámbito de la metrología, se expresa la tabla de valores de la normal $N(0,1)$ para valores de k a partir de 1,5 y con una cadencia de 0,1 (tabla I).

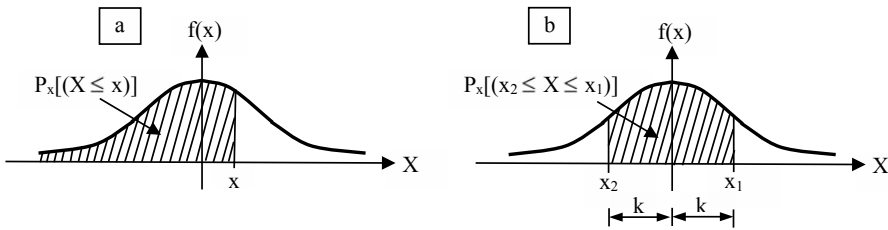


Figura 2. Valores de probabilidad para la variable $X \in N(0,1)$. a. Probabilidad acumulada hasta el valor x ; b. Probabilidad en un intervalo de valores en torno a la media.

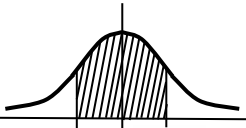
$P_x[(x_2 \leq X \leq x_1)]$ 	k	Área	k	Área	k	Área	k	Área
	1,7	0,9108	2,2	0,9722	2,8	0,9948	3,4	0,9994
1,8	0,9282	2,3	0,9786	2,9	0,9962	3,5	0,9996	
1,9	0,9426	2,4	0,9836	3,0	0,9974	3,6	0,9996	
1,96	0,9500	2,5	0,9876	3,1	0,9980	3,7	0,9998	
2,0	0,9544	2,6	0,9906	3,2	0,9986	3,8	0,9998	
2,1	0,9642	2,7	0,9930	3,3	0,9990	3,9	1,0000	

Tabla I. Valores de probabilidad en un intervalo centrado en el valor medio para la distribución $N(0,1)$.

Resulta interesante destacar que un valor de k de 1,96 acota un intervalo de probabilidad del 95%. Para aumentar la probabilidad hasta un 99% es necesario un valor de k de 2,57.

También se pueden obtener los valores de probabilidad acumulada hasta un determinado valor x con el empleo de aplicaciones informáticas o calculadoras directamente, para la distribución normal de cualquier media y varianza, $N(\mu, \sigma)$. En el caso de la aplicación EXCEL® de Microsoft, se emplea la sintaxis DISTR.NORM(x ; media; desviación standard; VERDADERO). Así, por ejemplo, la probabilidad acumulada para el valor $x=2$ de una variable que cumple con la distribución normal reducida, $N(0,1)$, es 0,9772, tal como se observa en la Figura 3. Teniendo en cuenta la simetría de la función de distribución, se puede comprobar que el resultado se corresponde con el indicado en la Tabla I para $k=2$.

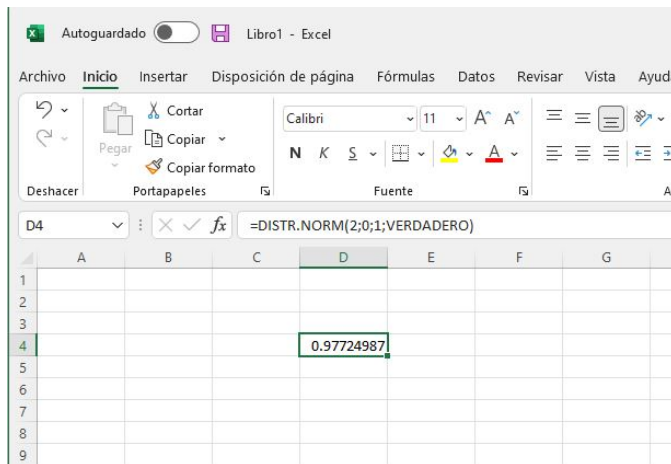


Figura 3. Determinación de la probabilidad acumulada para el valor 2 de una variable estadística que cumple con la distribución $N(0,1)$.

1.7. ESTIMACIONES EN EL MUESTREO

Se llama población a un conjunto de elementos sobre los que se estudia una característica dada. Generalmente no es posible conocer toda la población sino un subconjunto de ella que se denomina muestra. La mejor estimación de la esperanza matemática y de la varianza de la población se obtiene mediante la media muestral, \bar{x} , y la varianza muestral S_x^2 , obtenidas a partir de las expresiones (11) y (12), ya que dichos estimadores convergen a los valores de μ y de σ^2 respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i x_i}{n} \quad (11)$$

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \tag{12}$$

Por otra parte, la varianza de la media muestral, de muestras de tamaño n , es igual a la varianza poblacional dividida por el tamaño de la muestra, conforme a la expresión (13).

$$\sigma^2(\bar{X}) = \frac{\sigma_x^2}{n} \tag{13}$$

Como la varianza de la población es estimada mediante la varianza experimental o muestral definida en la ecuación (12), podemos establecer que

$$\sigma^2(\bar{X}) = \frac{S_x^2}{n} \tag{14}$$

1.8. DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT

Se dice que una variable aleatoria T sigue una distribución t-Student con n grados de libertad si su función de densidad corresponde a la definida para esta distribución (la función de densidad t-Student puede ser consultada en cualquier tratado general de estadística). Es destacable de esta distribución que la función de densidad es independiente de la varianza y que esta distribución converge a la $N(0,1)$ cuando $n \rightarrow \infty$ (en la práctica con $n=30$).

Si una variable aleatoria Y de esperanza matemática μ y desviación típica σ sigue una distribución normal, \bar{Y} es la media aritmética de n observaciones independientes y $S(\bar{Y})$ es la desviación típica muestral de la media aritmética, entonces la variable $t = (\bar{Y} - \mu) / S(\bar{Y})$ pertenece a una distribución t-Student con $n-1$ grados de libertad, ν .

En la tabla II se establecen los valores de la variable t que dan un intervalo de probabilidad p para ν grados de libertad.

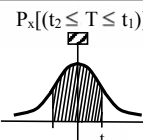
	ν	1	3	5	7	8	9	10	11	12	15	20
	Área											
	0.90	6.31	2.35	2.02	1.9	1.86	1.83	1.81	1.80	1.78	1.75	1.72
	0.95	12.71	3.18	2.57	2.36	2.31	2.26	2.23	2.20	2.18	2.13	2.09
	0.98	31.82	4.54	3.36	3.00	2.90	2.82	2.76	2.72	2.68	2.60	2.53
0.99	63.66	5.84	4.03	3.50	3.36	3.25	3.17	3.11	3.06	2.95	2.84	

Tabla II. Valores de t que dan una probabilidad en función de los grados de libertad ν , según una distribución t-Student.

1.9. DISTRIBUCIÓN RECTANGULAR

Se dice que una variable aleatoria X sigue una distribución rectangular cuando su función de densidad es constante dentro de un intervalo de valores (definido por $[a,b]$) y vale cero para valores fuera del intervalo (figura 4).

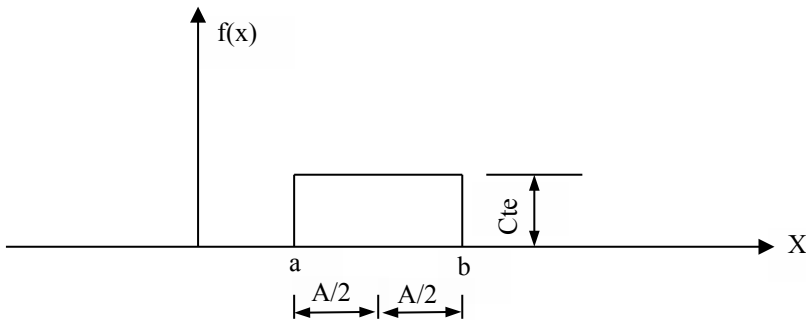


Figura 4. Representación de la función de densidad de una distribución rectangular

Este tipo de distribución es aplicable en metrología para modelizar el comportamiento de variables que se caracterizan por presentar una probabilidad constante entre un valor mínimo y uno máximo de la variable, siendo cero fuera del margen de valores reseñados, como por ejemplo la temperatura o la incertidumbre debida a la escala del instrumento de medida, como se verá posteriormente.

De la definición de la función de densidad se puede determinar fácilmente el valor medio, μ , y la varianza, σ^2 . Así el valor de la constante se determina a partir de la expresión (15).

$$\int_a^b f(x)dx = Cte \int_a^b dx = Cte(b - a) = 1 \quad (15)$$

En consecuencia, la función de densidad $f(x)$ es la inversa de la amplitud del intervalo de definición de la misma, A , esto es, $f(x)=1/A$.

A partir de la definición obtenida en la expresión (5) puede definirse el valor medio, μ , mediante la ecuación (16).

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx = \int_a^b Cte \cdot xdx = \frac{1}{(b-a)} \left[\frac{x^2}{2} \right]_a^b = \frac{(b^2 - a^2)}{2(b-a)} = \frac{a+b}{2} \quad (16)$$

Es decir, como era de esperar el valor medio se obtiene como semisuma de los valores extremos del intervalo.

El valor de la varianza, σ^2 , puede obtenerse a partir de la definición establecida en la expresión (7), pero resulta más inmediato aplicar la propiedad definida en la ecuación (8) que relaciona la varianza con el valor medio, expresión que ha sido desarrollada en la ecuación (17),

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx - \mu^2 = \left(\frac{1}{(b-a)} \frac{(b^3 - a^3)}{3} \right) - \frac{(a+b)^2}{4} = \\ &= \frac{(b^2 + ab + a^2)(b-a)}{3(b-a)} - \frac{a^2 + 2ab + b^2}{4} = \frac{(b-a)^2}{12} = \frac{A^2}{12} \end{aligned} \quad (17)$$

En ocasiones, la variable se expresa con el valor medio de la misma y el incremento centrado en la misma, de la forma $\mu \pm A/2$; así, por ejemplo, la variable temperatura θ si correspondiera a una distribución de tipo rectangular, podría expresarse como $\bar{\theta} \pm \Delta\theta$, en el que el incremento de la temperatura $\Delta\theta$ corresponde a la semiamplitud del intervalo, $A/2$. En estos casos resulta más inmediato relacionar la varianza con el valor del incremento de la variable o semiamplitud del intervalo, $A/2$, conforme a la expresión (18).

$$\sigma^2 = \frac{\left(\frac{2A}{2}\right)^2}{12} = \frac{4\left(\frac{A}{2}\right)^2}{12} = \frac{(A/2)^2}{3} = \left(\frac{A/2}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (18)$$

En el caso de la variable θ mencionada, la varianza se expresa, por tanto, como $\Delta\theta^2/3$, y la desviación típica como $\Delta\theta/\sqrt{3}$.

1.10. DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR. OTRAS DISTRIBUCIONES

En ocasiones, una distribución triangular representa el comportamiento de una determinada magnitud mejor que la distribución rectangular. Este tipo de distribución se diferencia de la rectangular en que la probabilidad no es constante para todo el intervalo de valores $[a,b]$ sino que es máxima para el valor medio y cero para los extremos. En la figura 5 se representa la función de densidad para una distribución de tipo triangular.

Mediante razonamientos similares a los indicados anteriormente para la distribución rectangular se obtienen el valor medio y la varianza asociadas a la distribución triangular.

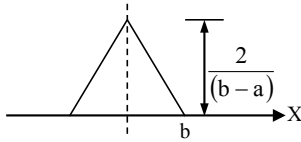


Figura 5. Distribución triangular simétrica.

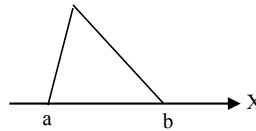


Figura 6. Distribución triangular no simétrica.

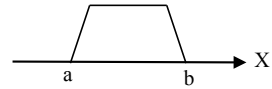


Fig. 7. Distribución trapezoidal.

La distribución triangular es simétrica respecto al intervalo de valores $[a,b]$, pero puede considerarse distribuciones asimétricas (figura 6) e incluso simétricas o asimétricas de tipo trapezoidal (figura 7), esto es, en las que para un rango menor de valores al definido por $[a,b]$ la probabilidad se mantenga constante. La aplicación de una u otra distribución depende de la información que se disponga en relación con el comportamiento de la variable, que generalmente no es exhaustiva. Por ello suele aplicarse de manera extendida la distribución rectangular como simplificación del comportamiento de variables que se encuentran comprendidas en un intervalo de valores y de las que no se tiene información detallada del comportamiento de aquella dentro del intervalo.

1.11. TEOREMA DEL LÍMITE CENTRAL

El teorema del límite central se enuncia de la siguiente forma:

“si $Y=c_1X_1+c_2X_2+\dots+c_nX_n=\sum_{i=1}^n c_iX_i$, y todas las variables X_i vienen caracterizadas por distribuciones normales, la distribución de la variable Y también es normal. No obstante, con frecuencia es posible suponer una distribución normal para Y aunque las distribuciones de las variables X_i no lo sean. Basta con que $\sigma^2(Y)$ sea mucho mayor que cualquier otra componente $c_i\sigma^2(X_i)$ de una X_i cuya distribución no sea normal”.

Existen varias cuestiones relevantes relacionadas con el teorema central del límite, tal y como se refleja en la guía para la determinación de la incertidumbre de medida, JCGM 100:2008:

-Implica que la distribución obtenida tras la combinación (convolución) de variables X_i converge hacia una ley normal a medida que aumenta el número de magnitudes de entrada.

-La convergencia es tanto más rápida cuanto más próximos sean entre sí los valores de $c_i\sigma^2(X_i)$.

-Cuanto más próximas a la normal sean las distribuciones de X_i , menor número de ellas será necesario para obtener una distribución normal de Y .

2. PLANTEAMIENTO DEL PROCESO DE EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN

El resultado de una medición se expresa mediante un intervalo en el que se considera que con una determinada probabilidad se encuentra el valor verdadero de la magnitud medida (desconocido). El valor central del intervalo corresponde al valor convencionalmente verdadero de la magnitud en cuestión, que suele establecerse como el valor medio de la serie de medidas realizadas sobre el mensurando. La cuestión que entraña mayor dificultad es la estimación de la semiamplitud del intervalo mencionado, denominado como ya sabemos incertidumbre.

La evaluación de la incertidumbre se ha efectuado tradicionalmente partiendo de criterios de inferencia estadística a partir de la estimación de intervalos de confianza, considerando la distribución t-Student para la resolución de problemas. De hecho, en algunos ámbitos de la metrología todavía se sigue aplicando el método.

Ante la falta de consenso internacional en la forma de expresar la incertidumbre de medida el CIPM encargó al BIPM la elaboración de una recomendación. El BIPM, junto a expertos de laboratorios nacionales de metrología elaboró la Recomendación INC-1. Tras la aprobación de la Recomendación en 1980 y su confirmación en 1986, el CIPM pidió a ISO desarrollar una guía detallada para su desarrollo, que fue elaborada convenientemente, denominando al documento Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM). Desde su publicación en 1995, este documento ha sido referencia obligatoria en el ámbito metrológico. La guía fue revisada por el BIPM en el año 2008, siendo esta la última versión actualizada de la misma. En este capítulo se pretende formular un texto que facilite lo máximo posible la aplicación de la guía, facilitando su comprensión y acotando su contenido a un alcance mucho más limitado.

El cálculo de incertidumbres es un proceso que involucra todos los pasos seguidos en la cadena metrológica que garantiza la trazabilidad desde la definición de la unidad hasta el proceso de medición considerado con el instrumento de medida. De este modo, la incertidumbre existente en un determinado nivel de la cadena es el punto de partida para el cálculo de la incertidumbre asociada al siguiente nivel, en un proceso ininterrumpido. En este contexto se sitúa la ley de propagación de incertidumbres que será establecida posteriormente.

En particular, los dos ejemplos considerados son dos calibraciones de distinto nivel: la del propio instrumento de medida con el que se va a medir (figura 8; caso 1) y la medición posterior con el instrumento, considerado como patrón (caso 2), aunque conceptualmente desde el punto de vista del cálculo de incertidumbres no existe ninguna diferencia.

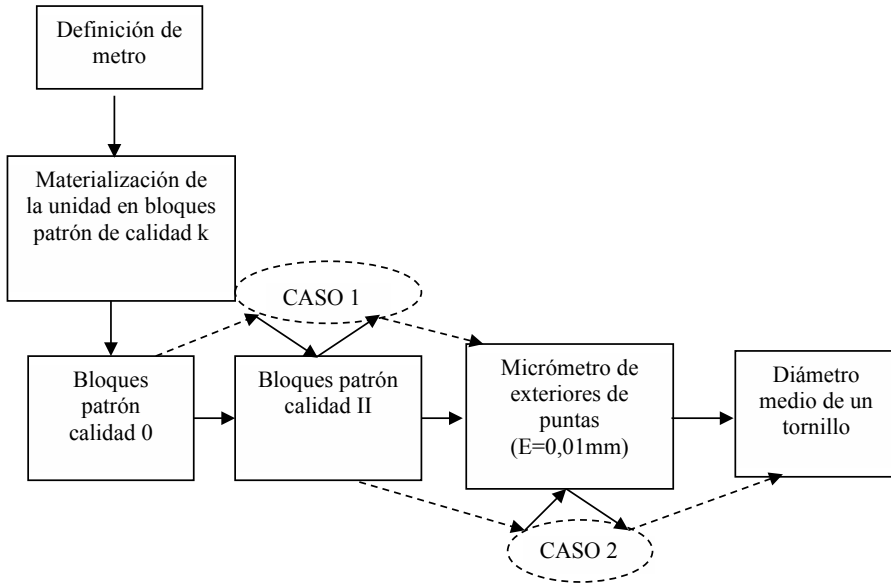


Figura 8. Ejemplo de diseminación en la magnitud longitud.

Las diferentes contribuciones a la incertidumbre, por tanto, se van agregando conforme se disemina la unidad. Por ejemplo, las contribuciones a tener en cuenta en un proceso de medición con un instrumento de medida son la incertidumbre de calibración del instrumento y la incertidumbre del proceso de medición de la rosca con dicho instrumento. A su vez, en la calibración del instrumento con patrones de calidad II, interviene la incertidumbre de los patrones empleados y la propia del proceso de calibración o de medición de los patrones con el instrumento. En definitiva, la incertidumbre de los bloques patrón longitudinales de calidad II interviene en el término de incertidumbre del resultado de la medición del tornillo.

Si aplicamos el razonamiento para el caso 1 y más allá hasta llegar a la definición de la unidad, comprobamos que las incertidumbres se propagan en todo el proceso de diseminación de la magnitud.

La incertidumbre es parte del resultado de una medida, y como ha sido indicado con anterioridad tiene características de probabilidad por cuanto se determina mediante métodos estadísticos. Desde este punto de vista, la incertidumbre va asociada a la dispersión de lecturas obtenidas con un instrumento de medida, o a causas que condicionan a definir el resultado con mayor o menor precisión. En definitiva, el término incertidumbre debe asimilarse al significado etimológico

de aquél ya que un valor elevado de la misma significa un mayor grado de indefinición del resultado de la medición.

El término incertidumbre, por tanto, va asociado al parámetro de dispersión que caracteriza a la muestra o conjunto de lecturas asociadas, por lo que se estima partiendo de la varianza muestral correspondiente. No obstante, existen contribuciones o incertidumbres que no pueden determinarse a partir de la varianza muestral por carecer de los datos necesarios o porque son un dato de partida, como por ejemplo la certificada para un patrón. En estos casos, hay que realizar hipótesis diferentes para asimilar la contribución correspondiente a términos de varianza y poder operar con ellos. Esto hace que se consideren dos tipos de incertidumbre según sea el caso: incertidumbres de tipo A y de tipo B. En lo sucesivo, cuando hagamos referencia a una varianza calculada a partir de una muestra (relacionada con una incertidumbre tipo A) la denotaremos como S^2 ; cuando hagamos referencia a un término de varianza asimilado a partir de hipótesis diferentes (tipo B) la denotaremos como u^2 . Cuando no sea preciso distinguir entre ambos tipos se empleará u^2 .

Cada contribución de incertidumbre va relacionada con el término de desviación típica calculado, S , o asimilado, u (en función de que sea de tipo A o B). En este caso hablamos de incertidumbre típica, u . Generalmente la incertidumbre típica suele multiplicarse por un valor k dando lugar a la incertidumbre expandida, U , (en adelante incertidumbre). El valor de k no es arbitrario, sino que tiene que ver con la probabilidad de que el valor verdadero de la magnitud medida esté contenido en el intervalo acotado por la incertidumbre.

3. LEY DE PROPAGACIÓN DE VARIANZAS

El proceso de medición puede ser directo o indirecto.

Una medida directa es la que se obtiene mediante un instrumento que, al aplicarlo sobre el mensurando, proporciona un valor del mismo en su escala o dispositivo indicador.

En una medida indirecta, la magnitud medida no representa directamente la magnitud que se desea conocer del mensurando, sino otra magnitud que sirve para determinar aquélla mediante una relación funcional. Con frecuencia son varias las magnitudes medidas que intervienen en la relación funcional. En general, un modelo de medición indirecta presupone la medida de q magnitudes x_i , de igual o distinta naturaleza, que determinan el valor de otra magnitud, y , expresada a partir de las primeras, según se puede apreciar en la ecuación (19).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_q) \quad (19)$$

Ello supone conocer para cada una de las magnitudes el valor medio \bar{X}_i , la incertidumbre típica u_i y si existe alguna correlación entre las variables, el estimador de la covarianza que la caracterice, u_{ij} .

Se puede demostrar que, con la hipótesis de aproximar linealmente la función en el punto $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_q)$ y si todas las magnitudes x_1, x_2, \dots, x_q son independientes entre sí, el valor medio y la varianza pueden expresarse conforme a las ecuaciones (20) y (21), respectivamente.

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_q) \quad (20)$$

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^q \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_q}^2 u_i^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)_{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_q}^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)_{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_q}^2 u_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_q} \right)_{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_q}^2 u_q^2 \quad (21)$$

La expresión (21) es una simplificación de la denominada ley de propagación de varianzas. A cada término $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_q}$ se le conoce como coeficiente de sensibilidad de la variable dependiente involucrada.

4. MODELO DE MEDICIÓN DIRECTA Y SUMA DE CONTRIBUCIONES DE INCERTIDUMBRE ASOCIADAS AL PROCESO

El modelo de medición consiste en determinar el mejor estimador de la magnitud medida sobre el mensurando y la incertidumbre asociada. El mejor estimador M de la magnitud medida lo constituye la media de las lecturas obtenidas \bar{X}_M corregida adecuadamente, según la expresión (22):

$$M = \bar{X}_M + C_1 + C_2 + \dots + C_k \quad (22)$$

donde C_1, C_2, \dots, C_k son las diferentes correcciones que hay que tener en cuenta. Así, estas correcciones son, entre otras, la de calibración del instrumento, la corrección por temperatura, corrección por humedad, etc. En ocasiones, estas correcciones se pueden conocer o evaluar; otras veces son desconocidas o despreciadas por el orden de magnitud que representan. Pero, en cualquier caso, aplicando la ley de propagación de varianzas a la expresión (22), se obtienen los diferentes términos de varianza correspondientes a todas ellas, conforme se puede observar en la expresión (23). Estas contribuciones suelen considerarse incluso cuando las correcciones de las que provienen son despreciables.

$$u_M^2 = u_{\bar{X}_M}^2 + u_{C_1}^2 + u_{C_2}^2 + \dots + u_{C_k}^2 \quad (13)$$

En definitiva, en cualquier proceso de medición debe tenerse en cuenta todas las contribuciones a la incertidumbre, convenientemente evaluadas en términos de varianza y sumados para obtener la incertidumbre combinada.

5. EVALUACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES DE TIPO A

Como ya ha sido mencionado, a este tipo de incertidumbre le corresponde un método de evaluación por análisis estadístico de series de observaciones reiteradas.

Cuando realizamos lecturas con un instrumento de medición, tanto al medir con él o al calibrar el mismo (comparando el instrumento con patrones adecuados), si tenemos un número de lecturas adecuado se evalúa la incertidumbre del siguiente modo:

-Se determina la varianza muestral S_x^2 a partir de la expresión (12); la desviación típica S_x se obtiene como raíz cuadrada de la varianza. Este estimador representa la repetibilidad del instrumento de medida en el proceso considerado (medición o calibración).

-La determinación de la incertidumbre tipo A se debe realizar bajo el principio de fiabilidad. El criterio de fiabilidad se cumple siempre que ninguna de las contribuciones a la incertidumbre tipo A estén basadas en menos de 10 observaciones repetidas.

-Como la media se toma como el mejor estimador del valor verdadero de la magnitud medida, es necesario considerar la dispersión respecto de la media de valores y no de los valores de los que proviene ésta. En definitiva, la varianza $S_{\bar{x}}^2$ que debe considerarse y la desviación típica $S_{\bar{x}}$, si la muestra contiene n lecturas, vienen dadas por las ecuaciones (24) y (25).

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{S_x^2}{n} \quad (24)$$

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (25)$$

-La incertidumbre típica corresponde por tanto a la expresión (25).

6. EVALUACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES DE TIPO B

Estas incertidumbres son evaluadas por métodos diferentes al análisis estadístico de series de observaciones reiteradas. Aunque dependiendo del proceso metrológico particular de que tratemos pueden existir diferentes contribuciones de este tipo, las más representativas se indican a continuación.

6.1. INCERTIDUMBRE DE UN PATRÓN, U_0

Esta incertidumbre viene certificada de forma generalmente expandida. En el certificado debe constar el valor del término k (lo denotaremos como k_0 al referirnos al patrón). La incertidumbre típica se obtiene, lógicamente, dividiendo la incertidumbre U_0 por k_0 , y el término de varianza correspondiente elevando la incertidumbre típica al cuadrado, según la expresión (26).

$$u_0^2 = \left(\frac{U_0}{k_0} \right)^2 \tag{26}$$

6.2. INCERTIDUMBRE DEBIDA A LA RESOLUCIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDIDA U_R

Esta incertidumbre se debe a la limitación que supone la apreciación del instrumento de medida frente a la magnitud comparada o medida con él. Así, si en primer término identificamos la resolución del procedimiento de medida con la división de escala del instrumento, lo único que se puede asegurar es si la magnitud medida se encuentra entre dos divisiones o trazos consecutivos de la escala E . En este caso se puede establecer que el enrase con el instrumento entre dos trazos consecutivos tiene igual probabilidad en toda la distancia entre dichos trazos y se puede considerar para esta causa de incertidumbre una distribución de tipo rectangular (figura 9).

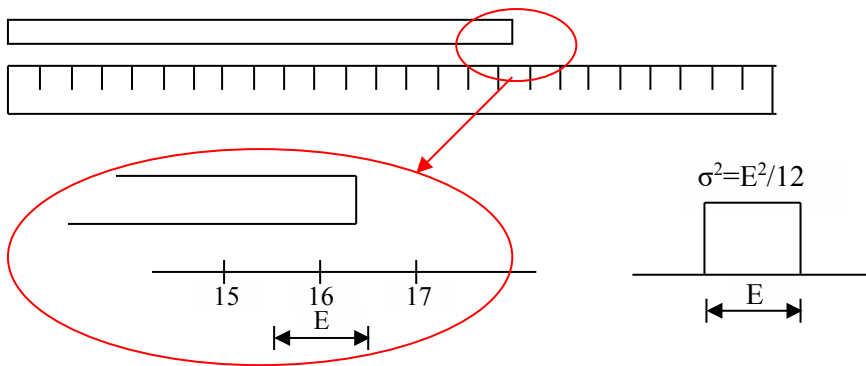


Figura 9. Incertidumbre debida a la resolución del instrumento de medida.

En el ejemplo mostrado en la figura 8, cualquier enrase que se produzca en el entorno de la división 16 dará lugar a una lectura correspondiente a esta división.

Así cualquier enrase comprendido entre 15,5 y 16,5 dará lugar a una lectura de 16. Por tanto, se asume una distribución rectangular en un intervalo correspondiente a la división de escala ($16,5-15,5 = 1=E$).

Por tanto, para este caso el término de varianza u_R^2 se establece conforme a la expresión (27).

$$u_R^2 = \frac{E^2}{12} = \left(\frac{E/2}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad (27)$$

En cualquier caso, este tipo de incertidumbre no debe identificarse necesariamente con la división de escala del instrumento. En equipos con visualización de trazos o marcas, como pueden ser pies de rey, reglas, micrómetros, durómetros..., la resolución puede depender del operador y del criterio de medida, relacionados con su apreciación respecto de la división de escala. Si los trazos están suficientemente distanciados es posible considerar, por ejemplo, la mitad de la división de escala, con lo que la incertidumbre típica debido a esta causa es la mitad que si se hubiese considerado la división de escala.

En los equipos digitales, en cambio, no sólo no es posible introducir el criterio del operador sino que no es posible precisar si el cambio de unidad se produce por encima de la media división. Por ello hay metrologos que prefieren considerar para este tipo de instrumentos una incertidumbre típica y una varianza de valores, respectivamente, los indicados en la expresión (28).

$$u_R = \frac{E}{\sqrt{3}}; \quad u_R^2 = \frac{(2E)^2}{12} \quad (28)$$

6.3. INCERTIDUMBRE DE DERIVA DE UN PATRÓN, U_D

Es la incertidumbre debido a la variación de las características metrológicas de un patrón en el período de tiempo entre calibraciones. Cuando utilizamos un patrón conocemos perfectamente sus características metrológicas en el momento o en un período de tiempo próximo a cuando se realizó la calibración de dicho patrón. Pero los patrones son empleados en cualquier momento de su período entre calibraciones durante el cual los valores característicos de los mismos pueden haber variado respecto del momento en que se calibraron. De este modo, surge una nueva contribución a la incertidumbre de un instrumento de medida que es calibrado con dichos patrones.

Para poder conocer la deriva de un patrón es necesario disponer de un historial de calibraciones del mismo. Inicialmente, cuando no se dispone de dicho historial,

la deriva puede ser sustituida por la exactitud del patrón (“accuracy, clase, etc.) si viene dada por el fabricante. En estos casos la contribución o incertidumbre estándar se calcula con la ecuación (29), teniendo en cuenta la asimilación a una distribución de tipo rectangular.

$$u_D = \frac{\text{exactitud}}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

Cuando se tiene suficiente historia de las calibraciones del patrón se debe utilizar la verdadera deriva. La deriva de un patrón entre dos períodos consecutivos de calibración se considera como la diferencia, en valor absoluto, de los valores certificados del patrón correspondientes a ambas calibraciones. La deriva se puede considerar utilizando el criterio de máxima deriva histórica entre dos certificados de calibración consecutivos.

En función de la tendencia puede establecerse una deriva entre años que puede sustituir a la máxima deriva histórica.

Si prescindimos del término de incertidumbre de un patrón, la deriva D de un patrón materializada entre dos calibraciones se estima como la diferencia entre el valor del patrón en la calibración n, $X_{0,n}$, y el valor del patrón en la calibración n-1, $X_{0,n-1}$, en valor absoluto. La incertidumbre típica u_D de deriva se obtiene dividiendo la deriva por $\sqrt{3}$, conforme a la expresión (30).

$$u_D = \frac{|X_{0,n} - X_{0,n-1}|}{\sqrt{3}} \quad (30)$$

Como generalmente, en los certificados de calibración se aporta la desviación al nominal, d_n , como resultado de la calibración, se puede establecer también la deriva en función de ello, teniendo en cuenta que la desviación al valor nominal es la diferencia entre el valor nominal y el real; véase la expresión (31).

$$d_{n,n} = X_{\text{nom}} - X_{0,n}; \quad d_{n,n-1} = X_{\text{nom}} - X_{0,n-1} \quad ; \quad u_D = \frac{|d_{n,n-1} - d_{n,n}|}{\sqrt{3}} \quad (31)$$

A veces, y sobre todo cuando la deriva afecta a un instrumento o equipo de medida, suele preferirse considerar las correcciones de calibración correspondientes, C. Recordamos que la corrección de calibración es la diferencia entre el valor certificado del patrón de mayor rango metrológico y el valor atribuido al calibrado, o bien la diferencia del valor certificado de un patrón y la media de las lecturas efectuadas por un instrumento sobre dicho patrón en su proceso de calibración. Así, puede calcularse la incertidumbre típica de deriva, u_D , mediante la expresión (32).

$$u_D = \frac{|C_n - C_{n-1}|}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

Si las incertidumbres de los patrones en las diversas calibraciones fuesen dispares puede ser adecuado tenerlas en cuenta. Así, si consideramos las incertidumbres certificadas (expandidas) $U_{0,n}$ e $U_{0,n-1}$, bastaría con sumarlas en el numerador de las expresiones (30), (31) y (32) como se refleja a continuación para la expresión (32), obteniendo la ecuación (33). En la figura 10 se representa esquemáticamente el procedimiento indicado.

$$u_D = \frac{|C_n - C_{n-1}| + U_n + U_{n-1}}{\sqrt{3}} \quad (33)$$

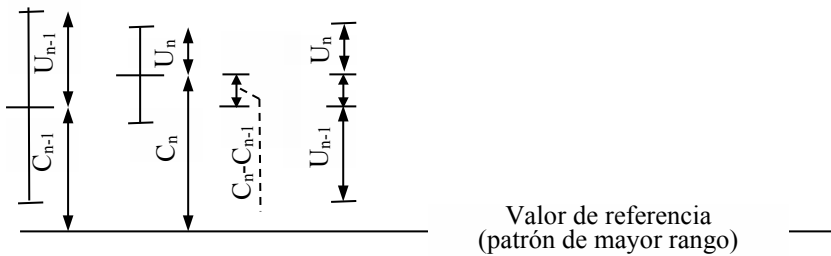


Figura 10. Deriva de un patrón o de un instrumento de medida considerando las incertidumbres de calibración.

6.4. INCERTIDUMBRE DEBIDA AL REDONDEO U_{RE}

Siempre que se realiza un redondeo se introduce una contribución a la incertidumbre igual al máximo valor del redondeo dividido por $\sqrt{3}$, conforme a la expresión (34).

$$u_{RE} = \frac{\text{límite máximo redondeo}}{\sqrt{3}} \quad (34)$$

7. CALIBRACIÓN DE UN INSTRUMENTO EN UN PUNTO DE SU CAMPO DE MEDIDA

El problema que se va a abordar bajo este epígrafe corresponde a la calibración de un instrumento en un punto de su campo de medida. Este planteamiento resulta de utilidad en instrumentos tarados para medir un determinado valor o en un rango muy estrecho respecto de dicho valor. También es aplicable a instrumentos que, aunque dispongan de un determinado campo de medida, se utilicen para determinar o controlar una magnitud cuyo valor se encuentra en el entorno de un determinado punto.

Pero, además, el planteamiento sirve como punto de partida para poder evaluar, como se verá posteriormente, la calibración de un instrumento en todo su campo de medida o calibración global del instrumento.

El objetivo perseguido en la calibración de un instrumento es determinar la corrección de calibración. Para ello, se mide con el instrumento un patrón certificado. El valor del patrón se expresa conforme a la expresión (35), en la que X_0 representa el valor más probable del patrón o el valor convencionalmente verdadero; I_0 representa el valor de la incertidumbre expandida del patrón para un valor de $k=k_0$ conocido.

$$\text{Valor del patrón (certificado)} = (X_0 \pm U_0), \text{ para } (k=k_0) \quad (35)$$

Sobre el patrón se realizan n_c mediciones, obteniendo el valor medio de las lecturas \bar{X}_C y la desviación típica S_C , conforme a las expresiones (11) y (12) respectivamente.

La corrección de calibración C se obtiene a partir de la expresión (36).

$$C = X_0 - \bar{X}_C \quad (36)$$

Este valor es con el que se debe corregir las lecturas efectuadas posteriormente con dicho instrumento. La corrección de calibración tiene su propio signo; si es positiva significa que el instrumento da lecturas inferiores al valor de la magnitud medida; por el contrario, una corrección negativa significa que el instrumento da valores superiores al de la magnitud medida.

Para determinar la incertidumbre típica en el proceso de calibración u_c , esto es, en la determinación de la corrección de calibración, si aplicáramos la ley de propagación de varianzas se obtendría la expresión (37).

$$u_c^2 = \left(\frac{\partial C}{\partial X_0} \right)_{X_0}^2 u^2(X_0) + \left(\frac{\partial C}{\partial \bar{X}_C} \right)_{\bar{X}_C}^2 u^2(\bar{X}_C) = u_0^2 + u^2(\bar{X}_C) = \left(\frac{I_0}{k_0} \right)^2 + \frac{S_C^2}{n_c} \quad (37)$$

A u_C^2 se le han de combinar los términos de varianza de otras contribuciones de incertidumbres presentes durante el proceso como, por ejemplo, la debida a la deriva del patrón y la incertidumbre debida a la resolución del instrumento, lo cual se pone de manifiesto en la ecuación (38).

$$u_c^2 = \left(\frac{U_0}{k_0} \right)^2 + \frac{S_C^2}{n_c} + u_D^2 + \frac{E^2}{12} \quad (38)$$

Finalmente se obtiene la incertidumbre típica, u_c , y multiplicando ésta por el factor $k=k_C$, la incertidumbre expandida U_C como se ve en la expresión (39).

$$U_C = k_C \sqrt{u_c^2} = k_C u_c \quad (39)$$

8. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL PROCESO DE MEDICIÓN EN UN PUNTO, U_M

El problema que se considera en este epígrafe es el cálculo de la incertidumbre asociada al proceso de medición, U_M , que debe considerarse en el resultado de las mediciones efectuadas con el instrumento de medida cuya incertidumbre de calibración es U_C y cuya corrección de calibración es C .

El proceso de medición consiste en la realización de n_M medidas del mensurando en cuestión. A partir de las lecturas efectuadas, m_i , se puede calcular el valor medio, \bar{M} , y la varianza muestral S_M^2 , conforme a las expresiones (40) y (41).

$$\bar{M} = \frac{1}{n_M} \sum_{i=1}^{n_M} m_i \quad (40)$$

$$S_M^2 = \frac{1}{n_M - 1} \sum_{i=1}^{n_M} (m_i - \bar{M})^2 \quad (41)$$

Como valor más esperado o convencionalmente verdadero de la magnitud medida se considera $\bar{M} + C$.

Para el cálculo de la incertidumbre, U_M , hemos de combinar a u_C^2 las nuevas contribuciones que aparecen en el proceso de medición. La primera contribución a considerar es la debida a la repetibilidad de las lecturas, relacionada con \bar{M} , obtenida conforme a la expresión (42).

$$u_M^2 = \frac{S_M^2}{n_m} \quad (42)$$

Además, deben considerarse las contribuciones que afecten al proceso, como por ejemplo la de la resolución del instrumento (o del procedimiento de medición), u_R^2 .

Así, se puede establecer la expresión (43) para u_M^2 .

$$u_M^2 = u_C^2 + \frac{S_M^2}{n_M} + \frac{E^2}{12} = u_0^2 + u_D^2 + \frac{S_C^2}{n_C} + \frac{E^2}{12} + \frac{S_M^2}{n_M} + \frac{E^2}{12} \quad (43)$$

Y finalmente la incertidumbre de la medida, U_M , se obtiene teniendo en cuenta la expresión (44).

$$U_M = k_M \sqrt{u_M^2} = k_M u_M \quad (44)$$

Todo lo considerado presupone que la corrección de calibración se va a tener en cuenta en las mediciones realizadas con el instrumento. Existen dos formas de considerarla, corrigiendo el instrumento en la cuantía indicada por la corrección y en el sentido adecuado o bien sumarla directamente a las lecturas efectuadas.

Pero no siempre es posible o conveniente considerar la corrección. Por ejemplo, cuando el instrumento no puede corregirse, a veces es preferible no considerarla en las lecturas ya que puede olvidarse de manera aleatoria. En otras ocasiones, la corrección de calibración es muy pequeña (inferior a la división de escala del instrumento de naturaleza analógica) y sencillamente, no puede introducirse en el mismo, decidiéndose por el motivo anterior no considerarla en las lecturas. En cualquier caso, no tener en cuenta la corrección de calibración en las lecturas que se hacen con el instrumento en un proceso de medición, presupone que el valor de dicha corrección es pequeño de acuerdo a la resolución del proceso de medida.

Al no considerar la corrección en las lecturas, el valor de la misma debe influir en la incertidumbre de medida o de uso del instrumento, ampliando ésta. La forma en que se debe incluir ha suscitado diversos criterios en la comunidad metrología. Uno de los criterios que tiene un amplio consenso es sumar la corrección en valor absoluto al resultado obtenido en (44), conforme se indica en la ecuación (45).

$$U_M = k_M u_M + |C| \quad (45)$$

Por último, cabe hacer una puntualización más; en ocasiones se corrige sólo una parte de C , dejando sin corregir otra parte. Si denominamos corrección residual δ_C a aquella parte de C que no se considera en las lecturas efectuadas con el instrumento en las mediciones realizadas con éste, δ_C debería ser considerada en

la incertidumbre de calibración. Así, en este caso la incertidumbre de medición o de uso se obtiene conforme a la expresión (46).

$$U_M = k_M u_M + |\delta_C| \quad (46)$$

con el instrumento la denotaremos como C' y δ_C se obtiene como la diferencia entre C y C' , como se pone de manifiesto en la expresión (47).

$$\delta_C = C - C' \quad (47)$$

En la tabla III se resumen todas las posibilidades indicadas en relación a la consideración de la corrección de calibración para el cálculo de la incertidumbre de medición.

Corrección de calibración	Incertidumbre de uso del instrumento	Expresión en la medición
$C = X_0 - \bar{X}_C$	$U_M = k_M \sqrt{u_0^2 + u_D^2 + \frac{S_C^2}{n_C} + \frac{S_M^2}{n_M} + 2 \frac{E^2}{12}}$	$M = \bar{X}_M + C \pm U_M \quad (k = k_M)$
No se considera	$U_M = k_M \sqrt{u_0^2 + u_D^2 + \frac{S_C^2}{n_C} + \frac{S_M^2}{n_M} + 2 \frac{E^2}{12}} + C $	$M = \bar{X}_M \pm U_M \quad (k = k_M)$
Se considera C' (aplicable $\delta_C = C - C'$)	$U_M = k_M \sqrt{u_0^2 + u_D^2 + \frac{S_C^2}{n_C} + \frac{S_M^2}{n_M} + 2 \frac{E^2}{12}} + \delta_C $	$M = \bar{X}_M + C' \pm U_M \quad (k = k_M)$

8.1. CONSIDERACIONES SOBRE EL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE TÍPICA DE TIPO A EN EL PROCESO DE MEDICIÓN CON UN INSTRUMENTO DE MEDIDA

Generalmente en los procesos de medición no se cumple el principio de fiabilidad. Es decir, el número de medidas que se efectúan sobre un mensurando es inferior a 10; en la mayoría de los casos sólo se realiza una medición. En estos casos, la evaluación tipo A de la incertidumbre de medición se llevaría a cabo con muy pocos datos o, incluso, sería absurdo intentar calcularla a partir de un dato. Por ello, hay que recurrir a algún criterio que permita evaluar dicha incertidumbre. Existen dos prácticas habituales en estos casos: recurrir a experiencias similares en el ámbito de la medición o considerar la repetibilidad del instrumento obtenida en el proceso de calibración.

Considerar la repetibilidad S_C en el proceso de calibración del instrumento como representativa del proceso de medición tiene implicaciones de tipo optimistas. Efectivamente, el proceso de calibración se hace “midiendo piezas bien

ejecutadas”, esto es patrones, en condiciones óptimas para la medición (comodidad para el operador, capacidad de posicionar el instrumento y los patrones adecuadamente...) y por un operador, en muchos casos más formado y concienciado en relación a la metrología que el operador que mide una determinada pieza en su proceso de fabricación. El valor de S_C representa la repetibilidad del instrumento de medida, pero bajo condiciones de medición óptimas. Por tanto, aunque es una práctica común, cuando no se dispone de más información, hacer $S_m = S_C$, debe quedar claro que es bajo un criterio optimista ya que es previsible que S_m sea algo mayor. En este caso, como la incertidumbre tipo A va referida al valor medio \bar{X}_M , debe dividirse $S_m^2 = S_C^2$ por el número de medidas n_m . Por tanto, para calcular la incertidumbre combinada basta por sustituir S_m por S_C en las expresiones de la tabla III.

Si se considera un valor experimental o proveniente de datos publicados, S_{exp} , el procedimiento de cálculo de la incertidumbre tipo A es igual que en el caso anterior, bastando sustituir S_m en las expresiones referidas anteriormente por el valor S_{exp} considerado.

9. CONSIDERACIONES ACERCA DEL FACTOR DE RECUBRIMIENTO k

El factor de recubrimiento, como es conocido, es el valor por el que se multiplica la incertidumbre típica u para obtener la incertidumbre expandida I . El valor de k al expandir la incertidumbre está relacionado con la probabilidad de que el valor verdadero de una magnitud, patrón, etc., se encuentre dentro del intervalo correspondiente al resultado indicado para ésta. Si asumimos condiciones de normalidad para el resultado, la relación entre k y la probabilidad que representa se deduce de las características de una distribución de probabilidad normal (tabla I).

No obstante, tal y como se ha visto, la evaluación de la incertidumbre típica es el resultado de la combinación de distintas contribuciones en las que se asumen distintas distribuciones de probabilidad (normal, rectangular...). En este caso, considerar condiciones de normalidad para el resultado final no es inmediato. Tomando como base el teorema del Límite Central se puede asumir para el resultado final, como combinación de diversas contribuciones, condiciones de normalidad, siempre que se cumplan las condiciones del teorema. En la práctica basta con que la incertidumbre típica combinada u_c no esté dominada por una componente de incertidumbre típica obtenida por una evaluación de tipo A basada en pocas observaciones, o por una componente de tipo B basada en una supuesta distribución rectangular.

Según lo visto con anterioridad, la evaluación de la incertidumbre tipo A se hace bajo el criterio de fiabilidad con al menos 10 lecturas, aunque se ha de tener en cuenta que la evaluación realizada es una aproximación al comportamiento de la variable. Así la fiabilidad de una incertidumbre tipo A calculada con este número de datos no tiene por qué ser mayor que una evaluación tipo B si se ha hecho una adecuada hipótesis de comportamiento de la variable. Por tanto, aunque se acepte como adecuado una muestra de 10 individuos, cuanto mayor sea su tamaño, más fiable resultará la incertidumbre tipo A estudiada.

Para obtener una aproximación mayor que la debida a la simple utilización de k deducido de la distribución normal y dado que, en la práctica sólo se dispone de estimadores, debe considerarse una distribución t-Student con $n-1$ grados de libertad.

La distribución t-Student no describe en general la distribución de una variable si ésta es la suma de dos o más componentes de varianzas estimadas, pero sí es posible aproximarse a la distribución t con un número efectivo de grados de libertad ν_{ef} obtenido mediante la fórmula de Welch-Satterthwaite (47). Esta expresión pondera la importancia relativa de las diferentes contribuciones $u_i(y)$ al cálculo (convolución) de la incertidumbre típica combinada u_c . Los grados de libertad ν_i para cada contribución se determinan del siguiente modo:

-Para contribuciones tipo A calculadas a partir de muestras de tamaño n , el grado de libertad es $n-1$.

-Para contribuciones bien definidas (normal, rectangular...) el número de grados de libertad tiende a ∞ .

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (47)$$

10. CONSIDERACIONES ACERCA DE LA EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Los valores numéricos de la incertidumbre típica combinada o de su incertidumbre expandida, esto es como resultado final calculado de la incertidumbre de calibración o de uso de un instrumento, no debe darse con un número excesivo de cifras. La Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida [11] considera suficiente expresar la incertidumbre con dos cifras significativas, aunque en determinados casos sea necesario retener cifras suplementarias para evitar la propagación de errores de redondeo en cálculos posteriores.

El resultado numérico al que acompaña la incertidumbre debe darse con las mismas cifras que ésta. Esto es, una vez redondeada la incertidumbre a dos cifras significativas, el resultado numérico se expresa con el mismo número de cifras, es decir que no contenga cifras posteriores a la última cifra significativa de la incertidumbre asignada al mismo.

En relación al redondeo, suele ser apropiado redondear a una cifra superior, esto es, realizar el redondeo al alza. El redondeo a la cifra inferior puede considerarse adecuado cuando supone un error menor del 15% (orientativo).

11. CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN DE UN INSTRUMENTO EN TODO SU CAMPO DE MEDIDA

11.1. ASPECTOS GENERALES. SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE CALIBRACIÓN

La calibración de un instrumento en todo su campo de medida se efectúa seleccionando diversos puntos de medida y aplicando en cada uno de ellos el procedimiento descrito en el epígrafe anterior. Así, a la notación establecida se le añadirá el subíndice *j* para designar el punto de calibración.

Se deben seleccionar al menos tres puntos de calibración para asegurar la extrapolación de los resultados a todo el campo de medida. Efectivamente, con sólo dos puntos no se puede detectar la falta de linealidad en el comportamiento del equipo.

Así, si se calibra el equipo con los puntos 1 y 2 representados en la figura 11a, el comportamiento lineal podría ser asumido en el campo de medida existente entre ambos puntos, pero no así para el campo de medida a partir del punto 2. En el ejemplo establecido en la figura 11b, si se calibra con solo los puntos 1 y 3 se cometen errores importantes para los puntos de medida situados entre ambos.

En definitiva, cuantos más puntos se elijan en la calibración, dentro de un planteamiento razonable, más información se obtendrá acerca del comportamiento del instrumento de medida. Los puntos de calibración se deben seleccionar para todo el campo de medida del instrumento de forma más o menos equidistante. Suele aconsejarse, en particular, calibrar en el cero del instrumento. Para ello se debe abrir y cerrar el instrumento tantas veces como el número de medidas efectuadas en cualquier otro punto.

También suele ser adecuado considerar distintas unidades para cada uno de los puntos calibrados, en función del tipo de instrumento. Así, por ejemplo, en el caso de un micrómetro no digital, con apreciación 0,01 mm, deberían considerarse

puntos que contuvieran las cifras decimales con el fin de evitar que el tornillo micrométrico solidario al tambor de medida caiga siempre en las mismas posiciones de los filetes de rosca. Así, por ejemplo, en un instrumento con un campo de medida 0-25 mm, se prefiere seleccionar los puntos <0,00; 10,10; 15,00; 20,07; 24,93> en lugar de <0,00; 10,00; 15,00; 20,00; 25,00>.

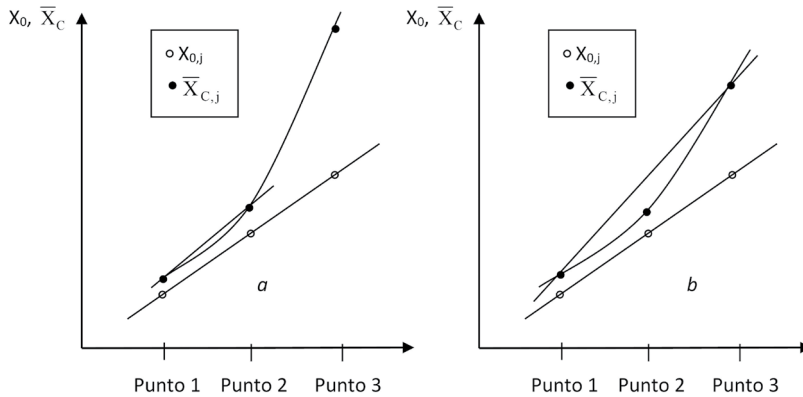


Figura 11. Falta de linealidad en el comportamiento de un equipo de medida.

Al margen de la selección de los puntos de calibración, en el proceso de calibración de un instrumento de medida se debe tener en cuenta aspectos fundamentales relativos al estado del instrumento (buen estado del marcado de la escala, alineamiento relativo de las escalas, planitud y paralelismo de los palpadores...). Algunos de estos aspectos requieren comprobaciones elementales mientras otras requieren del uso de patrones para verificar que la característica que se está comprobando se encuentra dentro de ciertos límites (planitud del palpador de medida...). Este tipo de comprobaciones y verificaciones depende de la naturaleza y características del instrumento de medida en cuestión y debe ser reflejado en la hoja de instrucciones de calibración y de medición del manual de procedimientos correspondiente. En este epígrafe se va a establecer el método de cálculo de incertidumbres de calibración y de uso de un instrumento de medida para todo su campo de medida.

11.2. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES PARA TODO EL CAMPO DE MEDIDA MEDIANTE FUNCIONES DE CORRELACIÓN

La calibración de un instrumento en todo su campo de medida requiere la aplicación de la metodología indicada para un punto, repetida para los puntos j de calibración seleccionados.

Así, para los diferentes puntos de calibración se obtendría la correspondiente corrección de calibración C_j , conforme a la expresión (48).

$$C_j = X_{0,j} - \bar{X}_{C,j} \quad (48)$$

Análogamente, la incertidumbre típica de calibración se obtendría a partir de la expresión (49). Basta multiplicar por el factor de recubrimiento para obtener la incertidumbre expandida en cada punto, $U_{C,j}$.

$$u_{c,j} = \sqrt{u_{0,j}^2 + u_{D,j}^2 + \frac{S_{C,j}^2}{n_{C,j}} + \frac{E^2}{12}} \quad (49)$$

A partir de los valores C_j e $U_{C,j}$ pueden obtenerse las funciones de correlación correspondientes para la corrección de calibración, C y la incertidumbre de calibración U_c en todo el campo de medida del instrumento (figura 12). Las correlaciones pueden obtenerse, por ejemplo, en función del valor medio en cada punto de calibración.

A partir de las funciones obtenidas puede calcularse la incertidumbre en la medición para cualquier punto del campo de medida a partir de la propagación del valor $u_{M,j}^2$ correspondiente de los términos de varianza debidos al proceso de la medición, tal y como se indica en la expresión (50).

La corrección de las lecturas efectuadas con el instrumento se debe efectuar con el valor C_M obtenido para \bar{X}_M en el gráfico de la figura 12, según la expresión (51), expresando finalmente el valor de la magnitud medida, M . Todas las afirmaciones efectuadas en relación a la consideración o no de la corrección de calibración en la medición, son válidas para la evaluación de la incertidumbre de uso o de medición (tabla III), a partir de la expresión (51).

$$U_{M,j} = k_{M,j} \sqrt{\left(\frac{U_c}{k_c}\right)^2 + \frac{S_{M,j}^2}{n_{M,j}} + \frac{E^2}{12}} + |\text{correcc. no efectuada, } j| \quad (50)$$

$$M = \bar{X}_M + C_M \quad (51)$$

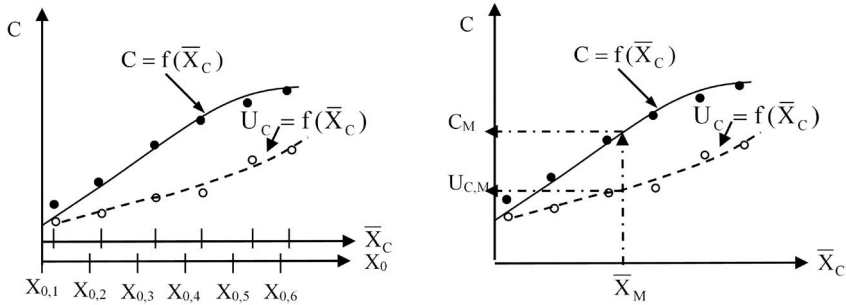


Figura 12. Obtención de las funciones de calibración en todo el campo de medida del instrumento. Evaluación de la corrección y de la incertidumbre en la medición.

La obtención de las funciones de correlación para C e U_C debe hacerse considerando no sólo los resultados en los puntos de calibración, sino también los estadísticos que consideran el grado de correlación de la función respecto a la variable (por ejemplo, \bar{X}_C) y los correspondientes a los coeficientes empleados en la función de correlación. Estos estadísticos modifican la función obtenida inicialmente con los valores correspondientes a los puntos considerados. En la figura 12 se supone utilizada la función finalmente modificada.

La obtención de las funciones de correlación con la consideración de los estadísticos correspondientes se sale del objetivo perseguido en estos apuntes, estableciendo las simplificaciones que corrientemente son utilizadas en el ámbito de la metrología dimensional y que son indicadas a continuación.

11.3. MÉTODO SIMPLIFICADO PARA EL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN O DE USO GLOBAL

La corrección de calibración en cada uno de los puntos de calibración seleccionados es, en general, diferente. Por ello, a la hora de considerar una corrección de calibración para corregir el instrumento, o bien las lecturas obtenidas en las mediciones realizadas con éste, es necesario establecer algún tipo de criterio. Uno comúnmente aceptado es considerar la corrección de calibración global, C_g , como media aritmética de las diferentes C_j obtenidas en la calibración de los diferentes puntos, conforme a la ecuación (52).

$$C_g = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} C_j \quad (52)$$

Esta consideración es válida siempre y cuando se compruebe que los valores C_j son uniformes, lo que suele ser habitual en el ámbito de la metrología dimensional.

Ahora bien, C_g generalmente no coincide con la corrección de calibración en cada punto C_j , y si se corrige el resultado de una medición con C_g existirá para cada punto una parte de la corrección que no ha sido aplicada, es decir una corrección residual cuyo valor se obtiene a partir de la expresión (53).

$$\delta_{C,j} = C_j - C_g \quad (53)$$

Los valores de incertidumbre típica, tampoco resultarán iguales en los diferentes puntos, por lo que el criterio comúnmente aceptado es aplicar el mayor de los valores obtenidos para todo el campo de medida del instrumento, teniendo en cuenta, además, el mayor de los valores de $\delta_{C,j}$ conforme a la expresión (54).

$$U_M = k_M \max \left(\sqrt{u_{0j}^2 + u_{Dj}^2 + \frac{S_{Cj}^2}{n_{Cj}} + \frac{S_M^2}{n_M} + 2 \frac{E^2}{12}} \right) + \max |\delta_{Cj}| \quad (54)$$

Resulta conveniente apuntar que los puntos en los que resulte máximo el valor de la incertidumbre típica u_c y el valor de δ_c no tienen por qué coincidir. Lógicamente, generalizando la expresión (54), la corrección residual debe representar la parte de la corrección de calibración en cada punto que no ha sido considerada, en particular, la propia corrección de calibración cuando ésta no se considera en el resultado de las mediciones con el instrumento. La generalización de la expresión (55) conduce, por tanto, a la expresión (55).

$$U_M = k_M \max \left(\sqrt{u_{0j}^2 + u_{Dj}^2 + \frac{S_{Cj}^2}{n_{Cj}} + \frac{S_M^2}{n_M} + 2 \frac{E^2}{12}} \right) + \max |\text{Correc. no realizada}_j| \quad (55)$$

Cuando no se conoce o no se puede calcular el valor de S_M , y se decide aproximar dicho valor a la repetibilidad del instrumento en la calibración S_C , es conveniente tomar el máximo de los S_{Cj} obtenidos, independientemente del punto en el que la incertidumbre típica de calibración u_{Cj} haya resultado mayor. Así se obtiene la expresión (56).

$$U_M = k_M \max \left(\sqrt{u_{0j}^2 + u_{Dj}^2 + \frac{S_{Cj}^2}{n_{Cj}} + \frac{\max S_{Cj}^2}{n_M} + 2 \frac{E^2}{12}} \right) + \max |\text{Correc. no realizada}_j| \quad (56)$$

12. CONSIDERACIONES FINALES

Aunque el procedimiento para la evaluación de incertidumbres descrito en estos apuntes es aplicable de manera general a cualquier ámbito de la metrología, el tratamiento efectuado ha sido siempre realizado pensando en la metrología dimensional.

Así, en la enumeración de contribuciones tipo B, se han considerado las más comunes y generales dentro de la metrología dimensional para la mayoría de instrumentos. Existen contribuciones más específicas, como el error de Abbey en pies de rey, que pueden considerarse dependiendo del instrumento de medida o de la rigurosidad requerida en el procedimiento de evaluación.

Tampoco se ha considerado la deriva del instrumento de medida, por simplificar las expresiones y porque, normalmente los períodos de calibración de instrumentos son sustancialmente inferiores a los de los patrones. En cualquier caso, el modo de evaluación considerado para la incertidumbre de deriva en un patrón es extrapolable a un instrumento de medida.

El tratamiento de las variables de entrada se ha hecho considerando que son independientes entre sí. En otros ámbitos esta suposición no siempre es cierta. Por ejemplo, si se mide la velocidad de un móvil v de manera indirecta a partir del espacio que recorre e y del tiempo t empleado para ello, hay que evaluar la posible dependencia entre ambas magnitudes. Así puede tener lugar la desigualdad (57).

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{E}{T} \right)_i \neq \frac{1}{n} \left(\frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \right) \quad (57)$$

Si no se pueden establecer las parejas de valores para las variables e y t , sino que la velocidad se debe evaluar conforme al segundo término de la expresión (57), es necesario establecer la covarianza de ambas variables con el fin de evaluar la incertidumbre para la variable v .

En relación a las denominadas magnitudes de influencia, normalmente la única a considerar suele ser la temperatura, aunque en la actual instrumentación es conveniente tomar algunas precauciones como, por ejemplo, estabilizar la alimentación de la red eléctrica. Dada la importancia de la temperatura como magnitud de influencia, ésta se considera a continuación.

12.1. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA COMO MAGNITUD DE INFLUENCIA

La temperatura influye en la magnitud longitud conforme a lo indicado en la ecuación (58), en la que L_0 es el valor de la longitud a la temperatura de referencia T_0 , α es el coeficiente de dilatación del material con la temperatura y L_T es el valor de la longitud de la magnitud medida a la temperatura T .

$$L_0 = L_T [1 + \alpha(T_0 - T)] \quad (58)$$

Por tanto, si se desea determinar el valor de la longitud L a una temperatura T_0 , pero durante el proceso de medición la temperatura de la pieza es T , se debe aplicar a L la corrección por temperatura C_T evaluada conforme a la expresión (59).

$$C_T = L_0 - L_T = L_T \alpha (T_0 - T) \quad (59)$$

La contribución a la incertidumbre de L de la corrección por temperatura se puede obtener mediante la ley de propagación de varianzas, como se puede apreciar en la ecuación (60).

$$u^2(C_T) = \left(\frac{\partial C_T}{\partial L_T} \right)_{L_T, \bar{\alpha}, \bar{T}, \bar{T}_0}^2 u^2(L_T) + \left(\frac{\partial C_T}{\partial \alpha} \right)_{L_T, \bar{\alpha}, \bar{T}, \bar{T}_0}^2 u^2(\alpha) + \left(\frac{\partial C_T}{\partial T} \right)_{L_T, \bar{\alpha}, \bar{T}, \bar{T}_0}^2 u^2(T) + \left(\frac{\partial C_T}{\partial T_0} \right)_{L_T, \bar{\alpha}, \bar{T}, \bar{T}_0}^2 u^2(T_0) \quad (60)$$

La temperatura de la pieza puede venir dada de la forma establecida en la expresión (61).

$$T = \bar{T} \pm U_T \quad (k = k_T) \quad (61)$$

Es decir, el término de varianza para la temperatura puede evaluarse a partir de la incertidumbre expandida de la temperatura medida en la pieza (o en aproximación para el recinto en el que se encuentre) U_T . En este caso, el término de varianza se determina dividiendo U_T por el coeficiente de recubrimiento correspondiente y elevando el resultado al cuadrado, tal como se indica en la expresión (62).

$$u_T^2 = \left(\frac{U_T}{k_T} \right)^2 \quad (62)$$

Pero generalmente, el dato que se conoce es la temperatura máxima y mínima a la que ha estado el entorno de medición. Si se hace la aproximación de conside-

rar la temperatura de la pieza como la del recinto y se asume como constante la probabilidad de que cualquier temperatura situada entre los límites existentes, se puede afirmar que la temperatura a la que ha estado la pieza en todo momento sigue una ley de distribución rectangular entre los límites establecidos (fuera de esos límites no ha podido existir).

Así, si los límites máximo y mínimo son T_{\max} y T_{\min} , respectivamente, se puede expresar la temperatura conforme a la expresión (63), conforme a lo esquematizado en la figura 13.

$$\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \pm \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} = \vartheta \pm \Delta\vartheta \quad (63)$$

La varianza asociada a la temperatura se calcula por tanto como se indica en la ecuación (64).

$$u_T^2 = \left(\frac{\Delta\vartheta}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{\Delta\vartheta^2}{3} \quad (64)$$

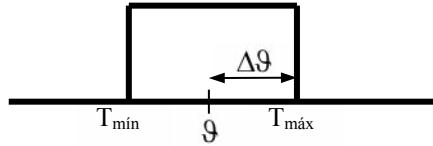


Figura 13. Distribución rectangular aplicada a un intervalo de temperatura de semiamplitud $\Delta\vartheta$.

CAPÍTULO 4

ELEMENTOS TÉCNICOS DE UN PLAN DE CALIBRACIÓN. INTERCOMPARACIÓN DE LABORATORIOS

1. Elementos técnicos de un plan de calibración.
2. Diagrama de niveles.
3. Diagramas de trazabilidad interna.
4. Fichero de instrucciones. Elaboración de hojas de procedimientos.
5. Archivo de resultados.
6. Etiquetas de calibración.
7. Períodos de calibración.
8. Intercomparación de laboratorios.

1. ELEMENTOS TÉCNICOS DE UN PLAN DE CALIBRACIÓN

A continuación, analizaremos la forma de ordenar y organizar el conjunto de los patrones, instrumentos de medida y elementos accesorios existentes, configurando lo que se denomina plan de calibración.

Cualquier forma de organización y desarrollo de un plan de calibración, que cumpla el objetivo final de asegurar la incertidumbre asignada a cada elemento y procedimiento de medida, es válida. No obstante, en la práctica se impone un esquema basado en los cuatro componentes siguientes: diagrama de niveles, fichero de instrucciones, archivo de resultados y etiquetas de calibración.

2. DIAGRAMA DE NIVELES

Un diagrama de niveles consiste en un gráfico en el que figuran, ordenados y agrupados por niveles de calibración todos los patrones, instrumentos y accesorios de medida de la empresa, formando lo que podemos denominar grupos de calibración (figura 1).

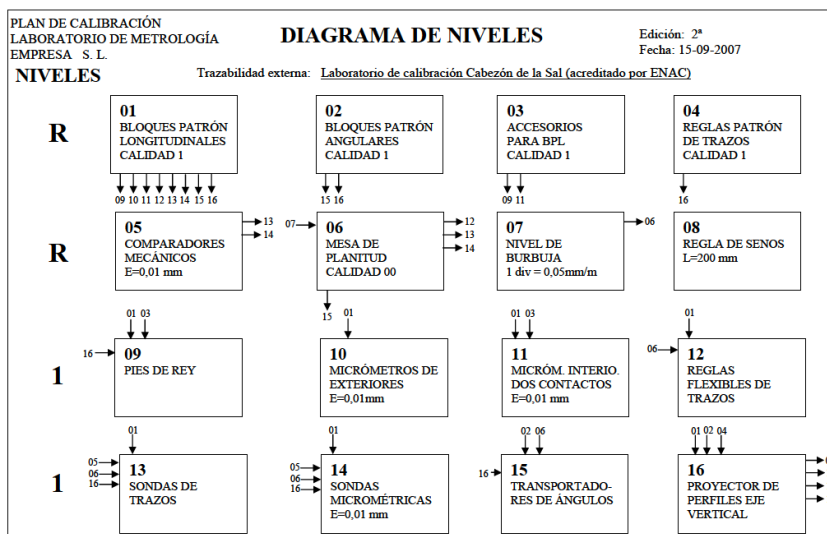


Figura 1. Diagrama de niveles correspondiente al sistema de calibración de una empresa hipotética.

Todos los elementos que se calibran con los mismos grupos de patrones, mediante los mismos procedimientos generales y que sus incertidumbres se estimen con las mismas ecuaciones de cálculo, constituyen un grupo. Los grupos de calibración pueden representarse mediante un rectángulo que se identifica mediante un número y un título.

El título se suele ajustar a las denominaciones establecidas en norma, no incluyendo bajo ningún concepto marcas comerciales o modelos en el diagrama de niveles.

En referencia al número, pueden utilizarse tres dígitos: el primero en referencia al nivel que ocupe el grupo en el diagrama de niveles y los otros dos, en referencia al lugar que ocupa el grupo en el nivel. No obstante, esta propuesta es desaconsejable, puesto que se está vinculando el número del grupo a la posición que ocupa y al nivel que ocupa en el diagrama de niveles, y dicho número puede cambiar si en ediciones sucesivas del diagrama de niveles hay un cambio en el nivel del grupo o se decide por algún motivo cambiar la posición del grupo en el nivel. Estos cambios conllevarían una reordenación compleja. Por ello resulta más acertado numerar los grupos de patrones e instrumentos consecutivamente cuando se realiza un diagrama de niveles por primera vez; posteriormente, al modificar el diagrama de niveles, deben conservarse los números dados a los grupos e ir asignando números sucesivos a los nuevos grupos, lo cual es importante a efectos de archivo histórico de datos. En la propuesta indicada en la figura 1 se adopta este último criterio.

Los niveles a los que se refiere el diagrama de niveles son de calibración y no niveles de precisión. En este contexto, no hay inconveniente alguno en que los diferentes componentes de un mismo grupo del diagrama tengan incertidumbres diferentes, siempre que se calibren análogamente. Tampoco importa que en el mismo nivel haya grupos de diferentes magnitudes físicas, diferentes precisiones y diferentes características.

En cuanto a la formación de niveles dentro del diagrama se establece que los grupos de cada nivel son calibrados por grupos de niveles superiores, nunca inferiores ni tampoco del mismo nivel, a excepción de grupos que actúan de modo auxiliar en la calibración de uno dado. A este respecto, se consideran que actúan de modo auxiliar, cuando con ellos se realizan inspecciones previas en la calibración de otros grupos, o cuando se lleva a cabo otras operaciones que no intervienen para nada en el posterior cálculo de la incertidumbre de calibración de los grupos a los que calibran.

Para indicar qué grupos calibran a uno dado, se representa una flecha vertical entrando por la parte superior del rectángulo que representa a éste último, indi-

cando el número de aquél junto a la flecha. Esto es denominado entrada al grupo. Cuando son varios los grupos que dan calibración a uno dado, se representan junto con la flecha los números de todos ellos, o bien se puede considerar tantas flechas como grupos intervengan.

Análogamente, cuando un grupo dado da calibración a otro o a varios se representa una flecha o flechas verticales salientes, en la parte inferior del rectángulo, junto con los números de los grupos que reciben calibración. Esto se denomina salida del grupo.

Los grupos que participan de forma auxiliar en la calibración de otros, involucran también las entradas y las salidas que correspondan, siendo su representación mediante flechas con los números de grupos asociados. No obstante, en estos casos las flechas son horizontales y se representan en sentido entrante a la izquierda del rectángulo del grupo al que calibran, y en sentido saliente a la derecha del rectángulo del grupo que da calibración.

Además de todo lo expuesto se suelen observar las siguientes indicaciones:

-Los grupos con entradas y salidas (se calibran internamente y participan en otras calibraciones), se colocan en el nivel más elevado posible; efectivamente, la experiencia demuestra que ello facilita las posteriores modificaciones del diagrama al introducir nuevos grupos o por cualquier otra razón.

-Los grupos que sólo tienen entradas, esto es, son calibrados internamente, pero no participan en la calibración de otros grupos, se sitúan todos en el último nivel. Generalmente, estos grupos de instrumentos se emplean únicamente para medir.

-Los grupos que sólo tienen salida, esto es, no reciben calibración interna, reciben calibración externa y participan en la calibración de otros grupos. Estos grupos se sitúan en el nivel más alto del diagrama que se suele denominar nivel de referencia, R. El nivel de referencia es, por tanto, el más elevado en el diagrama, formado por los grupos de patrones e instrumentos patrones para el laboratorio, es decir, aquellos elementos que han de recibir calibración externa en un laboratorio de superior categoría metrológica y de cuyas incertidumbres certificadas se parte para calibrar a todos los demás.

Mediante las reglas y criterios establecidos se logra cumplir el objetivo fundamental de que cualquier cadena de calibración ha de ser descendente a través de los niveles, sin saltos atrás y sin cerrarse sobre sí misma. Esto asegura la calibración de todo elemento por otro de mayor precisión y la adecuada trazabilidad de los resultados.

Conviene destacar también que pueden existir grupos en el nivel de referencia que no calibran a ningún elemento y que tienen el mismo uso que los del último nivel; esto representaría, por tanto, la existencia de grupos sin entradas ni salidas.

3. DIAGRAMAS DE TRAZABILIDAD INTERNA

Pueden obtenerse a partir del diagrama de niveles los diagramas de trazabilidad interna para cada grupo de calibración; estos diagramas consisten en materializar los enlaces del grupo en cuestión con aquéllos de los niveles superiores que intervienen en su calibración.

Los diagramas de trazabilidad interna ponen en relieve la mayor o menor complejidad del árbol mediante el que llega la trazabilidad a los elementos del último nivel a partir de los del nivel de referencia.

4. FICHERO DE INSTRUCCIONES. ELABORACIÓN DE HOJAS DE PROCEDIMIENTOS

Consiste en una colección de hojas de instrucciones o procedimientos, identificables fácilmente con los grupos del diagrama de niveles mediante la misma numeración, que contienen fundamentalmente:

- Las exigencias de calibración externa en referencia a los grupos del nivel de referencia, así como detalles de su preparación para salir del laboratorio y de su recepción, una vez calibrados. En este aspecto, los certificados de calibración externa deben asegurar la trazabilidad de los instrumentos del primer nivel (nivel de referencia) a patrones nacionales e internacionales reconocidos; deben contener información sobre las medidas realizadas y las incertidumbres asociadas a las mismas y, por último, deben estar emitidos por laboratorios de calibración con trazabilidad a entidades acreditadas por ENAC o a cualquiera de los otros organismos de acreditación firmantes del acuerdo EAL-Calibración, o a laboratorios participantes en EUROMET, así como NIST y NCR en América.
- El proceso detallado de calibración y de cálculo de incertidumbres en referencia a los patrones e instrumentos de calibración interna, así como todos los detalles que deban tenerse presentes para un correcto desarrollo de la misma, particularizados para cada uno de los elementos del grupo de calibración.

El contenido de las hojas de instrucciones para los patrones e instrumentos de calibración interna se puede realizar libremente siempre que se garantice la trazabilidad de los instrumentos involucrados. No obstante, resulta muy práctico basarse a nivel consultivo en documentos existentes. En particular, los ejemplos de hojas de instrucciones de calibración pueden elaborarse conforme a lo que se indica en el documento CGA-ENAC-LEC rev. 10 de marzo de 2021. Aunque el laboratorio

objeto de un plan de calibración no precisa seguir los requisitos establecidos en los documentos ENAC, salvo que persiga su acreditación según este Organismo, es interesante su observancia con el fin de facilitar la adecuación del plan de calibración si en el futuro se persigue como objetivo la acreditación del laboratorio.

En definitiva, las hojas de instrucciones de calibración interna, según las exigencias indicadas, contienen la siguiente información:

- Instrumentos o patrones a los que se aplica el procedimiento de calibración (nombre y número de inventario).
- Instrumentos o patrones/materiales de referencia necesarios para su aplicación (nombre y número de inventario).
- Condiciones ambientales, límites aplicables y procedimientos para introducción de correcciones debido a condiciones ambientales, si procede, y en ese caso, período mínimo de estabilización previo a calibración.
- Instrucciones sobre la realización de las operaciones de medida.
- Cálculo y asignación de incertidumbres.
- Formato de toma de datos.
- Criterios de aceptación y rechazo.
- Controles a realizar entre calibraciones, si procede.
- Identificación adecuada de los equipos a fin de indicar su estado de calibración.

Además, se puede incluir otra información como:

- Nivel en el que se encuentra el grupo en el diagrama de niveles. A efectos de localización puede resultar útil esta información.
- Fecha de última revisión y edición en relación a la elaboración del procedimiento de calibración. Son dos datos que deben figurar, actualizándolos cada vez que se realice alguna modificación del procedimiento.

En lo que se refiere a las propias instrucciones de calibración se consideran particularmente para cada instrumento:

- Observaciones previas y preparación de material. Se incluyen aquí todos los detalles referentes a cuestiones de comprobaciones previas a la calibración, operaciones de limpieza, legibilidad de escalas, desplazamientos suaves de diferentes elementos del instrumento...
- Patrones de calibración a emplear en detalle, indicando valores nominales a seleccionar, uniones, elementos auxiliares de manipulación, la forma en que han de tomarse las incertidumbres de los mismos...

- Puntos de calibración a tomar y número de medidas que se reiteran en cada uno de ellos.
- Parámetros a calcular, indicando las ecuaciones matemáticas a emplear.
- Resultados de la calibración.
- Observaciones y decisiones finales.

Por último, es destacable la importancia de dar un formato específico a las hojas de instrucciones de calibración por diferentes motivos: destacar estos documentos del entorno en el que se encuentren, garantizar un orden relativo correcto en la lectura de un procedimiento e identificar todas las hojas con el procedimiento al que pertenecen, entre otras cuestiones.

5. ARCHIVO DE RESULTADOS

Consiste en cualquier sistema que permita almacenar toda la información proporcionada por la realización de las operaciones de calibración internas, de forma que dicha información sea de fácil disponibilidad. En la actualidad, las herramientas informáticas disponibles proporcionan el marco ideal para la elaboración del archivo de resultados.

La explotación informática de los datos de las calibraciones debe plantearse con cierta versatilidad pues, con frecuencia, los procedimientos de calibración utilizados se modifican obligando a una readaptación de los programas o aplicaciones informáticas utilizados.

La forma primigenia de establecer el archivo podría ser elaborando un registro de fichas de equipos, de manera que se elabore una ficha por cada patrón o instrumento que contenga la siguiente información:

- Nombre del equipo.
- Nombre del fabricante, modelo y número de serie.
- Fecha de recepción y fecha de puesta en servicio.
- El emplazamiento habitual, si procede.
- Su estado cuando fue incorporado (nuevo, usado, reacondicionado).
- Detalles sobre el mantenimiento que hay que realizar.
- Historial de cualquier daño, mal funcionamiento, modificación o reparación.
- Datos de manejo, procedimiento de ajuste de la escala, si procede, accesorios disponibles para su utilización, etc.
- Resultados de las sucesivas calibraciones realizadas al equipo resaltando la incertidumbre del equipo en la última calibración; si procede, se indicará el sentido de medida adecuado.

- Otras características del equipo, tales como campo de medida, alcance y división de escala.

6. ETIQUETAS DE CALIBRACIÓN

Se trata de unos pequeños adhesivos para colocar en cada patrón o instrumento del plan, una vez calibrado, indicando las fechas de calibración y de próxima recalibración. Se pueden establecer diversas propuestas en función de las necesidades que surgen en el sistema metrológico; por ejemplo, se puede establecer un sistema de colores de las etiquetas que tenga un significado adicional, como por ejemplo que si el instrumento está en período de garantía del fabricante o está fuera del sistema de medición del laboratorio por algún motivo.

7. PERÍODOS DE CALIBRACIÓN

En el Plan de Calibración, uno de los puntos más importantes es la determinación de los períodos en que los instrumentos deben ser calibrados nuevamente. No hay un criterio único en la fijación del tiempo. Los períodos de revisión según deben fijarse teniendo en cuenta:

- Grado de precisión.
- Frecuencia de uso.
- Rentabilidad económica de la calibración.
- Estabilidad y deriva con el tiempo.

De forma orientativa se estiman los períodos indicados en la tabla I, si bien existen ciertas divergencias en función de la fuente consultada.

Instrumento	Período revisión (meses)
Reglas de senos	48
Bloques patrón angulares	60
Bloques patrón longitudinales (calidades 1 y 2)	24
Comparadores de cuadrante y de palanca	24
Mesas de planitud	60
Niveles electrónicos y de burbuja	12
Micrómetros	12
Pies de rey	36
Transportadores de ángulos	36

Tabla I. Períodos orientativos de calibración (Clasificación de instrumentos de metrología dimensional, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, 2ª Ed. Madrid, 1992).

8. INTERCOMPARACIÓN DE LABORATORIOS

Se ha acuñado el término “ensayo de aptitud” (en inglés, “proficiency testing”) para determinar la competencia de un laboratorio en comparación con el desempeño de otros laboratorios que realizan el mismo tipo de trabajo. Ello constituye un elemento fundamental de para asegurar la calidad del laboratorio ya que permite situar al laboratorio en cuestión en relación a otros que llevan a cabo ensayos o calibración en las mismas magnitudes. En el proceso de acreditación de un laboratorio, la participación en este tipo de procedimiento puede ser un requisito indispensable. Este tipo de prueba de competencia, en definitiva, se lleva a cabo mediante el establecimiento de un programa establecido, con participación de diversos laboratorios en un ejercicio de comparación de los resultados obtenidos por los participantes, respecto a la medición o ensayo de un patrón o material de referencia establecido que permite situar a cada laboratorio en relación a los demás. La guía EA-4/21 INF: 2018, “Guidelines for the assessment of the appropriateness of small interlaboratory comparison within the process of laboratory accreditation”, es una referencia fundamental para este tipo de actividad. Otros documentos relacionados son las normas ISO/IEC 17025 y ISO/IEC 17043.

La guía EA-4/21 establece las definiciones de “comparación interlaboratorios”, con el sentido indicado con anterioridad, fijando dos o más laboratorios que cumplan condiciones predeterminadas en la norma ISO/IEC 17043, “Requisitos generales para los ensayos de aptitud”. En esta norma se establece que los ensayos de aptitud deben estar a cargo de proveedores que tengan capacidad para llevar a cabo las comparaciones interlaboratorios, así como el conocimiento y experiencia en relación al tipo de magnitud o ítem a determinar. También establece de manera pormenorizada las condiciones que deben cumplir los proveedores de ensayos de aptitud. Se establecen los requisitos para el diseño de los programas de ensayos de aptitud y, en particular, se indica que es necesario desarrollar diseños estadísticos para cumplir los objetivos del programa.

La norma ISO/IEC 17043 establece también indicadores para determinar el grado de adecuación del desempeño de determinado laboratorio en relación a los participantes en un programa interlaboratorios. Así, establece el indicador z , definido en la ecuación (1), en la que x es el resultado del participante, X el valor asignado al patrón o magnitud a determinar y S es la desviación estándar para la evaluación de la aptitud.

$$z = \frac{x - X}{S} \quad (1)$$

La diferencia $x-X$ se denomina estimación del sesgo del laboratorio. La desviación estándar se determina mediante rondas de aptitud previas, expectativas basadas en la experiencia, mediante un valor establecido por reglamento o determinado por un experto o por un valor tradicional basado en los resultados de los participantes.

Otro indicador cuantitativo es el número E_n , ecuación (2), basado en la diferencia $x-X$ y en la composición de las incertidumbres expandidas del resultado del laboratorio en cuestión, U_{lab} , y la de referencia establecida por un laboratorio externo no participante en el proceso de intercomparación, U_{ref} .

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (2)$$

La evaluación del desempeño conforme a los indicadores señalados se considera conforme a lo establecido en la tabla II.

$ z \leq 2$	$E_n \leq 1$	Desempeño satisfactorio
$2 < z < 3$		Desempeño dudoso
$ z \geq 3$	$E_n > 1$	Desempeño insatisfactorio

Tabla II. Evaluación del desempeño conforme al indicador z o E_n .

La norma ISO/IEC 17025 se ocupa de los requisitos que deben cumplir los laboratorios para la competencia, imparcialidad y operación coherente.

CAPÍTULO 5

AJUSTES. VERIFICACIÓN CON CALIBRES DE TOLERANCIA. ACOTACIÓN PARA FABRICACIÓN

1. Introducción.
2. Conceptos.
 - 2.1. Acoplamiento eje-agujero.
 - 2.2. Tolerancias.
3. Normalización de las tolerancias.
 - 3.1. Tolerancias e índice de calidad.
 - 3.2. Posiciones de las tolerancias.
 - 3.3. Sistemas de ajustes.
4. Verificación con calibres de tolerancias.
 - 4.1. Empleo de los calibres de tolerancias.
5. Acotación para fabricación. Operaciones con cotas.
 - 5.1. Introducción.
 - 5.2. Adición de cotas.
 - 5.3. Transferencia de cotas.
6. Resolución de operaciones con tolerancias mediante métodos estadísticos.
 - 6.1. Definición de índice de capacidad de un proceso.
 - 6.2. Operaciones con cotas con tolerancias con establecimiento de un grado de probabilidad en el cumplimiento de los resultados.
 - 6.3. Ejemplo de cálculo.
7. Diseño y fabricación robusta.
 - 7.1. Función de pérdidas de Taguchi.

1. INTRODUCCIÓN

Como se ha visto en los capítulos anteriores, la producción en serie tiene el fin de obtener elementos de forma que, cualquiera de ellos pueda integrarse en un conjunto cualquiera de la serie (una máquina ...). En definitiva, prevalece la intercambiabilidad y los sistemas de producción deben establecer los principios adecuados a este fin y que, en parte, se estudian en este capítulo.

2. CONCEPTOS

2.1. ACOPLAMIENTO EJE-AGUJERO

Toda máquina o estructura ha de considerarse como una cadena constituida por elementos acoplados. Cada par de elementos, reducidos a su expresión más simple, se dividen en pieza que contiene o agujero y en pieza contenida o eje.

Se comprende fácilmente que el acoplamiento eje-agujero no puede ser nunca perfecto por la imposibilidad de reproducir exactamente las cotas del plano y por la necesidad de garantizar la intercambiabilidad.

Al acoplamiento lo denominamos ajuste y puede ser de dos tipos:

- **juego:** cuando el diámetro del agujero es mayor que el del eje. El valor del juego es la diferencia de diámetros del agujero y del eje, $D-d$, siendo D y d los diámetros del agujero y del eje, respectivamente.
- **aprieto o apriete:** se produce cuando el diámetro del agujero es menor que el del eje. El valor del aprieto es $d-D$.

Puede ocurrir que por la definición de las piezas no se garantice siempre juego o aprieto, sino que ocurrirá uno u otro en función de la dimensión real de las piezas. A este tipo de ajuste se le denomina **incierto o indeterminado**.

2.2. TOLERANCIA

Entendemos como cotas límites máxima y mínima las medidas máximas y mínimas permisibles en una pieza o elemento para cumplir perfectamente su función en base a las especificaciones establecidas en proyecto.

Si consideramos como cotas nominales aquéllas especificadas en plano, redondeadas en un número entero de milímetros, podemos definir:

- desviación superior: es la diferencia entre la cota límite máxima y la cota nominal de una pieza ($D_s = D_M - D$, para agujeros; $d_s = d_M - d$, para ejes).
- desviación inferior: es la diferencia entre la cota límite mínima y la cota nominal de una pieza ($D_i = D_m - D$, para agujeros; $d_i = d_m - d$, para ejes).
- tolerancia: es la diferencia entre la cota límite máxima y la cota límite mínima ($T = D_M - D_m$, para agujeros ; $T = d_M - d_m$, para ejes). Lógicamente se cumple que la tolerancia es la diferencia existente entre la desviación superior y la inferior ($T = D_s - D_i$, para agujeros ; $T = d_s - d_i$, para ejes).

3. NORMALIZACIÓN DE LAS TOLERANCIAS

Se han normalizado las tolerancias, las diferencias superiores e inferiores y las cotas nominales relacionadas con ellas. Así se consigue economizar en lo relacionado con la adquisición de herramientas y aparatos de medida. En el sistema de tolerancias ISO, que son las que se considerarán en lo sucesivo, existen los siguientes elementos característicos:

- Una serie de tolerancias que determinan la precisión, establecidas en 18 calidades distintas. Su valor depende no sólo de la calidad o índice de calidad considerado sino también del valor de la cota nominal de la pieza que se trate.
- Una serie de posiciones de la tolerancia en base al valor de la desviación superior y/o inferior.

3.1. TOLERANCIAS E ÍNDICE DE CALIDAD

Se comprende que, para igual precisión, la tolerancia deberá ser mayor cuanto mayor sea la dimensión de la pieza. Esto parece indicar que deberíamos tener una tolerancia distinta para cada diámetro, pero resultaría excesivamente engorroso. ISO ha determinado grupos de dimensiones, asignando a cada grupo una tolerancia distinta.

El valor de la tolerancia, para un grupo de dimensiones, varía en función de la precisión deseada para el elemento en cuestión, existiendo 18 calidades como se ha indicado anteriormente. Cada calidad se define con un índice (índice de calidad) simbolizado por las letras IT seguidas del número que define la clase de calidad.

En la tabla I se indican los valores de tolerancias considerados por ISO para los diferentes grupos dimensionales y clases de calidad.

Como se observa en la tabla el valor de la tolerancia para un grupo de dimensiones es tanto mayor cuanto mayor es el índice de calidad; esto es, los índices

más bajos se corresponden con precisiones mayores. Las calidades 12 a 18 no se adoptan generalmente más que para piezas aisladas que no se ajustan con otras, o para trabajos de forja o de mecánica agrícola.

Las calidades 9 a 11 caracterizan los trabajos de mecánica corriente; las calidades 6 a 8 caracterizan los trabajos de mecánica fina. La calidad 5 corresponde a la máxima precisión empleada en mecánica y sólo se aplica a cotas exteriores. Las calidades 1 a 4 se reservan a la fabricación de instrumentos de verificación.

VALORES DE TOLERANCIAS (mm)															
Grupos de dimensiones (mm)	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15
1,6 hasta 3	1,5	2	3	4	5	7	9	14	25	40	60	90	140	250	400
más de 3 hasta 6	1,5	2	3	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480
más de 6 hasta 10	1,5	2	3	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580
más de 10 hasta 18	1,5	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700
más de 18 hasta 30	1,5	2	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840
más de 30 hasta 50	2	3	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000
más de 50 hasta 80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200
más de 80 hasta 120	3	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400
más de 120 hasta 180	4	5	8	12	18	25	40	63	100	160	220	400	630	1000	1600
más de 180 hasta 250	5	7	10	14	20	29	46	72	115	186	290	460	720	1150	1850
más de 250 hasta 315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100
más de 315 hasta 400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300
más de 400 hasta 500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500

Tabla I. Valores de tolerancia ISO para diferentes grupos dimensionales y clases de calidad (UNE-EN ISO 286-2).

3.2. POSICIONES DE LAS TOLERANCIAS

No interesa considerar únicamente la magnitud de la tolerancia, sino también el lugar que ocupa en relación con la cota nominal. La posición de la tolerancia se define mediante una letra (mayúscula para agujeros y minúscula para ejes). Cada posición corresponde a una distancia de la desviación superior o de la desviación inferior a una línea de referencia que representa el valor nominal (figura 1). En las tablas II y III se recopilan las posiciones más usuales para grupos dimensionales, hasta 120 mm.

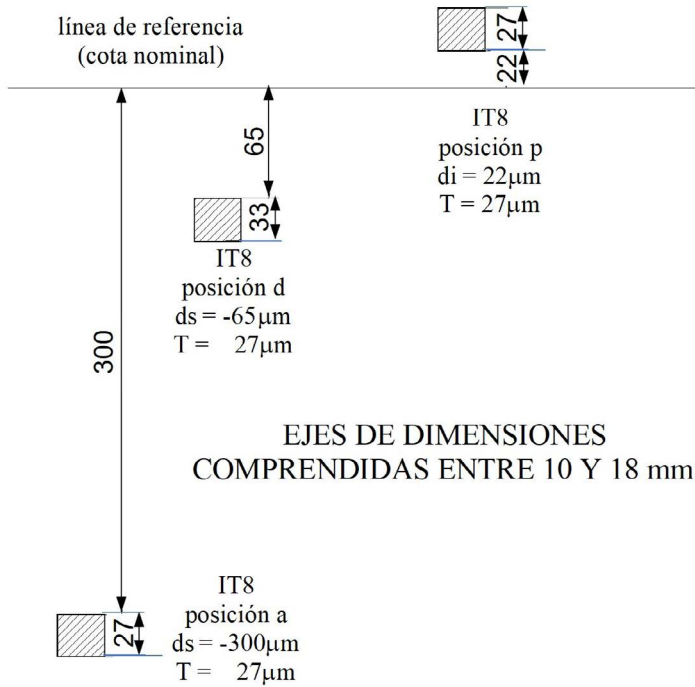


Figura 1. Representación de algunas posiciones de tolerancia para el grupo dimensional 18 a 30 mm.

		EJES: DESVIACIONES SUPERIORES E INFERIORES (mm)											
		más de hasta	1	3	6	10	18	30	40	50	65	80	100
Desviación superior	a	-270	-270	-280	-290	-300	-310	-320	-340	-360	-380	-410	
	b	-140	-140	-150	-150	-160	-170	-180	-190	-200	-220	-240	
	c	-60	-70	-80	-95	-110	-120	-130	-140	-150	-170	-180	
	d	-20	-30	-40	-50	-65	-80	-100	-120				
	e	-14	-20	-25	-32	-40	-50	-60	-72				
	f	-7	-10	-13	-16	-20	-25	-30	-36				
	g	-3	-4	-5	-6	-7	-9	-10	-12				
	h	0	0	0	0	0	0	0	0				
	j 5,6	-1	-1	-2	-3	-4	-5	-7	-9				
Desviación inferior	k 5,7	---	---	1	1	2	2	3					
	k 8,11	0	0	0	0	0	0	0					
	m	2	4	6	7	8	9	11	13				
	n	6	8	10	12	15	17	20	23				
	p	9	12	15	18	22	26	37	43				
	r	12	15	19	23	28	34	41	43	51	54		
	s	15	19	23	28	35	43	53	59	71	79		
	t	---	---	---	---	---	41	48	54	66	75	91	104

Tabla II. Posiciones de tolerancias para ejes (faltan posiciones hasta z).

AGUJEROS: DESVIACIONES INFERIORES (mm)												
más de hasta	1 3	3 6	6 10	10 18	18 24	24 30	30 40	40 50	50 65	65 80	80 100	100 120
A	270	270	280	290	300		310	320	340	360	380	410
B	140	140	150	150	160		170	180	190	200	220	240
C	60	70	80	95	110		120	130	140	150	170	180
D	20	30	40	50	65		80		100		120	
E	14	20	25	32	40		50		60		72	
F	7	10	13	16	20		25		30		36	
G	3	4	5	6	7		9		10		12	
H	0	0	0	0	0		0		0		0	
J 8,	-7	-9	-10	-12	-13		-15		-18		-20	
K 6	---	---	-7	-9	-11		-12		-15		-18	
M 8	---	---	-21	-25	-29		-34		-41		-48	
N 8	-15	-20	-25	-30	-36		-42		-50		-58	
N 9	-25	-30	-36	-43	-52		-62		-74		-87	
P 8	-23	-30	-37	-45	-55		-65		-78		-91	
R 6	-17	-20	-25	-31	-37		-45		-54	-56	-66	-69

Tabla III. Selección de posiciones de tolerancias para agujeros (UNE-EN ISO 286-2).

3.3. SISTEMAS DE AJUSTES

De la observación de las tablas I, II y III, en las que no están contempladas siquiera todas las posiciones de las tolerancias normalizadas por ISO, se desprende que el número de ajustes posible es extremadamente elevado y que pueden obtenerse múltiples combinaciones. Además, se pueden obtener resultados prácticamente iguales con diferentes combinaciones. Al objeto de simplificar, se ha decidido adoptar dos sistemas de ajustes:

- **Sistema de ajuste de agujero único.** Se adopta siempre la posición H para los agujeros; esto es, el diámetro mínimo para el agujero coincide con el nominal. En definitiva, el diámetro del agujero siempre es mayor al nominal. Los juegos o aprietes deseados se obtienen escogiendo adecuadamente las posiciones de tolerancia para los ejes.

- **Sistema de eje único.** Se adopta siempre la posición h para los ejes; esto es, el diámetro máximo del eje coincide con el nominal. En definitiva, el diámetro del eje siempre es menor que el nominal. Los juegos o aprietes deseados se obtienen escogiendo adecuadamente las posiciones de tolerancia para los agujeros.

Excepto en caso particulares, se debe escoger uno de estos sistemas de ajustes, y, particularmente el de agujero único. El sistema de eje único no se emplea apenas; se utiliza para los ajustes de agujeros con árboles calibrados en acero estirado o cuando hay diversos ajustes de varias piezas sobre un mismo eje. El sistema de eje único se aplica también en el montaje de anillos exteriores de rodamientos en sus alojamientos.

En la tabla IV se indican diversos ajustes recomendados, aunque se recomienda consultar fuentes bibliográficas que abarcan con más extensión este tema.

AJUSTE	APLICACIONES	OBSERVACIONES
H8/e7	Ajustes en articulaciones, máquinas-herramienta...	Ajuste de precisión media para piezas móviles, particularmente las que giran o deslizan en un casquillo.
H8/e9 H9/e8	Cigüeñales, bielas, ejes sobre tres cojinetes, bombas de engranajes...	Condiciones de empleo poco severo con sólo necesidad de una precisión media y con posibilidad de funcionar sin engrase.
H7/h6 H6/h5	Fijación normal mediante chavetas, casquillos de máquinas de taladrar. En general para órganos que deben estar sometidos a una gran precisión de rotación.	Ajustes de gran precisión para piezas deslizantes o para piezas inmóviles, entre sí, que deben montarse y desmontarse a mano sin deterioro.
H7/p6 H6/p5	Acoplamientos fijos: rotores sobre árboles hasta 50 mm de diámetro, montaje de poleas o engranajes de gran tamaño, de cojinetes de pie de biela...	Ajustes con apriete utilizados en piezas inmóviles entre sí, que no pueden montarse y desmontarse sin deterioro. Se utiliza en conjuntos en los que el giro no solidario puede ser fatal para el elemento que no gira.
H8/h9	Para ruedas dentadas	Ajuste deslizante

Tabla IV. Algunas familias de ajustes recomendados (adaptada de García-Mateos, A., Tolerancias, ajustes y calibres, 2ª ed., Ed. Urmo, 1987).

4. VERIFICACIÓN CON CALIBRES DE TOLERANCIA

Establecida una fabricación con un sistema de tolerancias, la verificación o comprobación de las dimensiones de las piezas fabricadas se reducirá a comprobar se estas dimensiones están comprendidas en el campo de la tolerancia establecido, prescindiendo de la medida efectiva que puedan tener. Se utilizan para ello los denominados calibres de tolerancia.

Los calibres de tolerancia materializan en dos extremos del calibre o en un par de calibres diferentes, las cotas máxima y mínima correspondientes a la tolerancia especificada en la pieza que se desea verificar.

Los calibres de tolerancia son denominados también calibres “pasa” y “no pasa”. En los calibres de tolerancia para ejes (figura 2) el lado del calibre pasa corresponde a la dimensión máxima admisible y el lado “no pasa”, a la mínima; el eje estará dentro de su tolerancia cuando pueda entrar en el lado “pasa” y no pueda entrar en el lado o calibre “no pasa”.

Si se trata de un agujero, el calibre “pasa” corresponde a la cota mínima y el “no pasa” corresponde a la cota máxima (figura 3).

Existen formas muy variables para los calibres de tolerancias, según se trate de calibres para ejes o agujeros y según la dimensión nominal correspondiente (tampón cilíndrico, planos, varillas de extremos esféricos, de boca o herradura...).



Figura 2. Calibres de tolerancias o de límites de herradura para la verificación de ejes.

4.1. EMPLEO DE LOS CALIBRES DE TOLERANCIA

Es necesario hacer una serie de consideraciones en relación con el empleo de calibres de tolerancia. En primer lugar, hay que considerar que la fabricación de los propios calibres de tolerancia está sujeta también a tolerancias. Lógicamente estas tolerancias están relacionadas con las de las piezas que han de verificar. Dado que en la verificación con calibres de tolerancias se ha de asegurar que la medida a controlar quede siempre dentro de los límites especificados, se produce siempre una disminución en el campo de tolerancia efectiva de la pieza.

Por otra parte, al tener que preverse un cierto desgaste del calibre, esto disminuye aún más el campo de tolerancia cuando la pieza se comprueba con calibres nuevos.

Una disminución en el grado de precisión de los calibres conduce a una disminución en el campo real de las tolerancias de las piezas con ellos verificadas y, con ello, la fabricación de las piezas en taller es más costosa. No obstante, el empleo de calibres muy precisos puede no ser aconsejable en muchos casos debido a que no resulta compensado su precio y el enorme cuidado en su empleo.



Figura 3. Calibre de tolerancias para agujeros.

Un sistema de control mediante calibres de tolerancia comúnmente aceptado consiste en utilizar dos tipos de calibres diferenciados por su grado de precisión. Los calibres construidos con un grado de precisión menor son utilizados para la comprobación de las piezas en el taller y que proporcionan un campo de tolerancia más cerrado que el admitido para ellas. Los calibres de verificación, con un grado de precisión mayor, se reservan para el control de las piezas rechazadas con los anteriores calibres. Como sólo algunas piezas de las rechazadas anteriormente están dentro de tolerancias, las condiciones de desgaste a las que se somete a los calibres de verificación se minimizan, prolongando su duración.

5. ACOTACIÓN PARA FABRICACIÓN. OPERACIONES CON COTAS. MÉTODO DEL CASO PEOR (*WORST CASE*)

5.1. INTRODUCCIÓN

Cualquier pieza está definida por las cotas que se indican en el plano (figura 4). Ahora bien, si se deseara conocer la longitud del cilindro de mayor sección del croquis indicado en la figura 4, longitud que no viene especificada en el mismo, sería necesario realizar una operación conocida como **adición de cotas**. De este modo, podríamos conocer los límites entre los que se encontrará dicha longitud si la pieza se fabrica respetando las cotas indicadas en el plano.

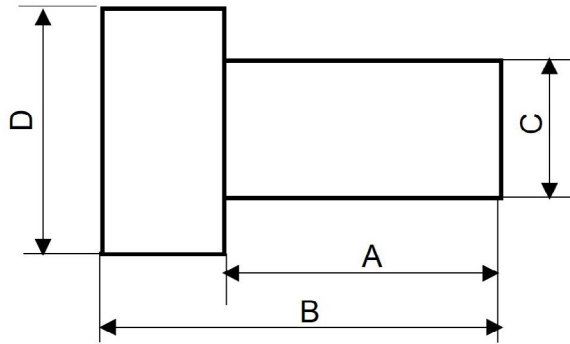


Figura 4. Croquis de un elemento mecánicos.

Si en una pieza se desea emplear una determinada cota que no viene en el plano para fabricar o verificar la pieza, es preciso obtenerla de modo que si en la fabricación o verificación de esa cota se encuentra dentro de la tolerancia calculada, también estén dentro de sus respectivas tolerancias las dimensiones indicadas en el plano y que no se han tenido en cuenta en la fabricación o verificación. Para ello el método empleado en el cálculo de la nueva cota es el denominado método de **transferencia de cotas**, que se basa en la adición de cotas, pero que asegura la invariabilidad de las cotas indicadas en el plano. En este epígrafe se va a describir la metodología de operaciones con cotas que permite alcanzar resultados que garanticen su cumplimiento en la totalidad de las piezas de un lote o en el peor de los casos. Por este motivo se suele denominar al método como el del caso peor para diferenciarlo de las metodologías que aplican métodos estadísticos y que

supeditan los resultados en función de la probabilidad de su cumplimiento, y que serán descritas en el epígrafe siguiente.

5.2. ADICIÓN DE COTAS

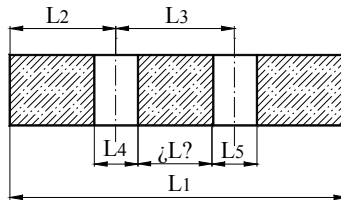


Figura 5. Acotación de un elemento mecánico.

Supongamos la pieza croquizada en la figura 5, que ha sido fabricada teniendo en cuenta las cotas indicadas. Si se desea conocer L se deberá emplear en su cálculo una cadena de cotas que contenga a L y en la que se conozcan las otras, por ejemplo:

$$L + \frac{1}{2} L_4 + \frac{1}{2} L_5 = L_3, \text{ luego}$$

$$L = L_3 - \frac{1}{2} L_4 - \frac{1}{2} L_5, \text{ en lo referente a valores nominales.}$$

Como todas estas cotas pueden estar afectadas de tolerancias se puede escribir:

$$L_{MÁX} = L_{3MÁX} - \frac{1}{2} L_{4\min} - \frac{1}{2} L_{5\min}, \text{ o bien,}$$

$$L + D_{SL} = L_3 + D_{SL3} - \frac{1}{2} (L_4 + D_{iL4}) - \frac{1}{2} (L_5 + D_{iL5}) \quad (1)$$

$$D_{SL} = D_{SL3} - \frac{1}{2} D_{iL4} - \frac{1}{2} D_{iL5}$$

$$\begin{aligned} \text{Análogamente, } L_{\min} &= L_{3\min} - \frac{1}{2}L_{4\text{MÁX}} - \frac{1}{2}L_{5\text{MÁX}} \text{ ,} \\ L + D_{iL} &= L_3 + D_{iL3} - \frac{1}{2}(L_4 + D_{SL4}) - \frac{1}{2}(L_5 + D_{SL5}) \text{ ,} \\ D_{iL} &= D_{iL3} - \frac{1}{2}D_{SL4} - \frac{1}{2}D_{SL5} \end{aligned} \quad (2)$$

Haciendo (1)-(2):

$$D_{SL} - D_{iL} = (D_{SL3} - D_{iL3}) - \frac{1}{2}(D_{iL4} - D_{SL4}) - \frac{1}{2}(D_{iL5} - D_{SL5}) \quad (3)$$

o lo que es lo mismo

$$T_L = T_{L3} + \frac{1}{2}T_{L4} + \frac{1}{2}T_{L5} \quad (4)$$

En resumen, para la determinación de una cierta dimensión A y su tolerancia T_A a partir de otros valores asociados C_i , se procede de la siguiente forma:

- Establecer la cadena de cotas correspondiente: $A = f(C_i)$
- Calcular el valor nominal de A : $A = \sum^+ C_i - \sum^- C_i$, donde $\sum^+ C_i$ indica la suma de valores nominales de las cotas que toman el mismo sentido que A ; $\sum^- C_i$ indica la suma de valores que toman sentido contrario al de A .
- Calcular la desviación superior de A como: $D_{SA} = \sum^+ D_{SCi} - \sum^- D_{iCi}$, donde $\sum^+ D_{SCi}$ representa la suma de las desviaciones superiores de las cotas que tienen el mismo sentido que A ; $\sum^- D_{iCi}$ representa la suma de las desviaciones inferiores de las cotas que tienen sentido contrario a A .
- Calcular la desviación inferior de A como: $D_{iA} = \sum^+ D_{iCi} - \sum^- D_{SCi}$, donde $\sum^+ D_{iCi}$ representa la suma de las desviaciones inferiores de las cotas que tienen el mismo sentido que A ; $\sum^- D_{SCi}$ representa la suma de las desviaciones superiores de las cotas que tienen sentido contrario a A .
- La tolerancia de A viene se obtiene a partir de: $T_A = \sum T_i$.

Si se verifica que las cotas parciales C_i se encuentran cumpliendo sus tolerancias, se puede asegurar que la cota obtenida por adición también se encuentra dentro de la tolerancia calculada. Sin embargo, la recíproca no es siempre cierta.

Por este motivo, para verificar o fabricar una pieza se deben cumplir siempre las cotas que se indican en el plano y no las obtenidas a partir de ellas por adición.

5.3. TRANSFERENCIA DE COTAS (ADAPTADO DE SÁNCHEZ-PÉREZ, A. M., COMPLEMENTOS DE TECNOLOGÍA MECÁNICA Y METROLOGÍA DIMENSIONAL, SERVICIO DE PUBLICACIONES DE LA ETSII DE MADRID, 1980)

Consideremos la pieza acotada según la figura 6a. Esta acotación es incorrecta porque para mecanizar el taladro es preciso conocer, además de la posición de su centro, su diámetro. Por ello resulta necesario volver a plantear la acotación conforme se indica en la figura 6b.

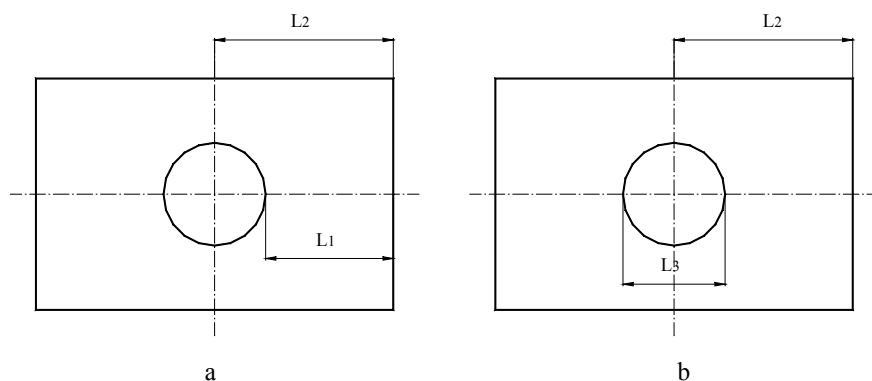


Figura 6. Proceso de transferencia o sustitución de cotas.

Ahora bien, hemos de respetar las tolerancias que se indican en el plano suministrado. En definitiva, hemos sustituido la cota L_1 por la cota L_3 . Ahora bien la obtención de las desviaciones de la cota L_3 depende de la cadena de cotas que planteemos (tabla V).

Como se puede observar, se obtienen tres resultados diferentes. La solución correcta es aquella que garantiza la invariabilidad de la cota sustituida (L_1), es decir, la solución 3. Efectivamente la filosofía de resolución del problema es la siguiente:

- Fabricar la pieza comprobando que las dimensiones reales de las cotas L_2 y L_3 se encuentran dentro de las tolerancias que se definían en el plano para L_2 y que se han calculado para L_3 .
- Determinar el valor de L_1 a partir de L_2 y L_3 por adición de cotas confiando en que L_1 tenga dimensiones reales que cumplan con sus tolerancias.

<p>SOLUCIÓN 1</p> $L_2 = L_1 + \frac{1}{2}L_3$	$D_{SL2} = D_{SL1} + \frac{1}{2}D_{SL3}$ $D_{iL2} = D_{iL1} + \frac{1}{2}D_{iL3}$	$D_{SL3} = 2(D_{SL2} - D_{SL1})$ $D_{iL3} = 2(D_{iL2} - D_{iL1})$
<p>SOLUCIÓN 2</p> $L_3 = 2(L_2 - L_1)$		$D_{SL3} = 2(D_{SL2} - D_{iL1})$ $D_{iL3} = 2(D_{iL2} - D_{SL1})$
<p>SOLUCIÓN 3</p> $L_1 = L_2 - \frac{1}{2}L_3$	$D_{SL1} = D_{SL2} - \frac{1}{2}D_{iL3}$ $D_{iL1} = D_{iL2} - \frac{1}{2}D_{SL3}$	$D_{SL3} = 2(D_{iL2} - D_{iL1})$ $D_{iL3} = 2(D_{SL2} - D_{SL1})$

Tabla V. Planteamiento del problema de la transferencia de cotas.

Como se puede observar, se obtienen tres resultados diferentes. La solución correcta es aquella que garantiza la invariabilidad de la cota sustituida (L_1), es decir, la solución 3. Efectivamente la filosofía de resolución del problema es la siguiente:

- Fabricar la pieza comprobando que las dimensiones reales de las cotas L_2 y L_3 se encuentran dentro de las tolerancias que se definían en el plano para L_2 y que se han calculado para L_3 .
- Determinar el valor de L_1 a partir de L_2 y L_3 por adición de cotas confiando en que L_1 tenga dimensiones reales que cumplan con sus tolerancias.

La realización práctica de la transferencia de cotas exige que se trabaje con la cadena de cotas que posea en el primer miembro la cota a sustituir exclusivamente, es decir:

$$\text{Cota a sustituir } (C_{\text{sust}}) = \text{Cota nueva } (C_{\text{nueva}}) \pm \text{Cotas conservadas } (C_{\text{cons}})$$

de donde se deduce que

$$T_{\text{cota sust}} = T_{\text{cotanuev}} + \sum T_{\text{cotacons}}$$

es decir,

$$T_{\text{cota nuev}} = T_{\text{cotasust}} - \sum T_{\text{cotacons}} \quad (5)$$

De la expresión (5) se deduce que no siempre es posible el proceso de sustitución o transferencia de cotas, sino que sólo se puede llevar a cabo si se cumple que $T_{\text{cotasust}} - \sum T_{\text{cotacons}} > 0$.

En cualquier caso, el proceso de sustitución de cotas siempre implica una reducción de la amplitud de la franja de tolerancia de la cota nueva. Esto obliga a un mecanizado más preciso y lógicamente más caro. Por ello, así como por la posibilidad de producir un error o una mala interpretación que cause que las piezas mecanizadas no correspondan a los requisitos del proyecto, no se debe emplear el proceso de transferencia de cotas más que en casos excepcionales.

6. RESOLUCIÓN DE OPERACIONES CON TOLERANCIAS MEDIANTE MÉTODOS ESTADÍSTICOS

El método del peor caso presenta como limitación más importante la obtención de tolerancias elevadas cuando el número de elementos dimensionales presente aumenta. Por ejemplo, si se trata de determinar mediante una operación de adición de cotas el en el hueco existente en el pre-ensamblaje de la figura 7, los valores de las tolerancias serían muy elevadas y el juego se definiría de forma poco precisa. Del mismo modo, una operación de sustitución de cotas conduciría a reducir mucho la tolerancia de la cota que va a sustituir otra de las existentes en plano y haciendo excesivamente cara la fabricación del elemento en cuestión.

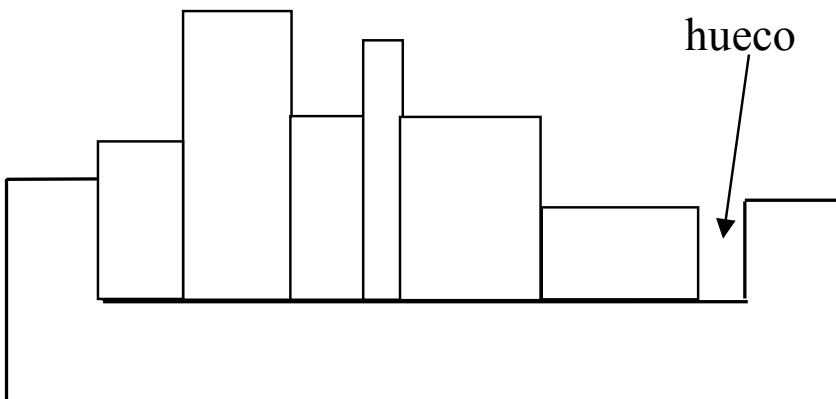


Figura 7. Ensamblaje de diversos elementos.

En definitiva, el método del caso peor toma como premisa la posibilidad de que se alcance la combinación de extremos dimensionales en las cotas involucradas en el elemento mecánico o el ensamblaje correspondientes. Esto resulta poco probable, particularmente cuando el número de cotas o de elementos es elevado, lo que aconseja aplicar procedimientos diferentes al del caso peor, asumiendo en todos ellos un grado de probabilidad, establecido como hipótesis, de que no exista cumplimiento con el resultado obtenido para la adición o la transferencia de cotas.

6.1. DEFINICIÓN DE ÍNDICE DE CAPACIDAD DE UN PROCESO

El índice de capacidad de un proceso, C_p , se encuentra íntimamente ligado a la capacidad del proceso para fabricar piezas dentro de unos límites dimensionales o tolerancias establecidos, ecuación (6). El rango de dimensiones se establece como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo, L_M y L_m , respectivamente. Se considera como rango natural de los límites de tolerancia 6 veces la desviación típica característica, σ , del proceso en cuestión, conforme a una distribución normal. Por tanto, un proceso tiene un valor de $C_p = 1$ si es capaz de producir piezas con una tolerancia, T , de valor 6σ . Normalmente, se suele trabajar con una expresión de la tolerancia centrada en el valor nominal del producto, esto es, $L_{\pm a}$, siendo $a = T/2$. Habitualmente, los textos que tratan este aspecto suelen emplear “ T ” para referirse al valor de la semitolerancia “ a ” y se refieren a este valor como el de la tolerancia. Dado que esto puede conducir a confusión, en el presente epígrafe se seguirá manteniendo la notación “ T ” para todo el intervalo de tolerancia y “ a ” para el semintervalo.

$$C_p = \frac{L_M - L_m}{6\sigma} \quad (6)$$

En definitiva, un proceso que es capaz de mantener los límites dimensionales del producto especificado en $\pm 3\sigma$ respecto al valor nominal, tiene un índice de capacidad 1 y se considera un proceso natural o normal. De acuerdo con la distribución normal, esto supone que el cumplimiento de la especificación tiene una confiabilidad del 99,73%. Del mismo modo, un índice de valor 2 significa que el proceso es capaz de mantener la especificación entre $\pm \sigma$ respecto al valor nominal, lo que supone un proceso con calidad “six sigma” y un número de fallos prácticamente cero (0,002 fallos por millón).

6.2. OPERACIONES CON COTAS CON TOLERANCIAS CON ESTABLECIMIENTO DE UN GRADO DE PROBABILIDAD EN EL CUMPLIMIENTO DE LOS RESULTADOS

Para el establecimiento del método se parte de una cota caracterizada por su valor nominal y la tolerancia centrada. Si no es así, se debe centrar la tolerancia a partir de los valores máximo, L_M , y mínimo, L_m , admisibles para la cota L en cuestión, calculando también el valor central de la dimensión. De este modo, se redefine la cota como $A_n \pm a$, conforme a lo indicado en las ecuaciones (7) a (9).

$$L = L_n \begin{matrix} D_s \\ D_i \end{matrix} \quad L_M = L_n + D_s \quad L_m = L_n + D_i \quad (7)$$

$$A_n = \frac{L_M + L_m}{2} = L_n + \frac{D_s + D_i}{2} \quad (8)$$

$$a = L_M - A_n = A_n - L_m \quad (9)$$

Una vez centrada la tolerancia, es preciso asignar una varianza a la cota. Conforme a la definición del índice de capacidad de proceso, ecuación (6), se establece el valor de la desviación típica conforme a lo indicado en la ecuación (10).

$$\sigma = \frac{L_M - L_m}{6 \cdot C_p} = \frac{2 \cdot a}{6 \cdot C_p} = \frac{a}{3 \cdot C_p} \quad (10)$$

Así, por ejemplo, para un proceso natural con un C_p de valor la unidad, la especificación de la cota puede asimilarse a una variable con una desviación típica de valor $a/3$, lo que significa que el valor de la cota se establece dentro de un intervalo de $\pm 3\sigma$ para la variable con una función de probabilidad normal, correspondiente a una probabilidad del 99,73%.

Para una cadena de cotas $(X_1 \pm x_1) \pm (X_2 \pm x_2) \dots \dots \pm (X_n \pm x_n)$, la varianza de la cota resultante se calcula a partir de las varianzas asociadas a cada una de las cotas mediante la ley de propagación de varianzas, conforme a la ecuación (11).

$$\sigma_x^2 = \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 + \dots \dots + \sigma_{x_n}^2 = \left(\frac{x_1}{3 \cdot C_p} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{3 \cdot C_p} \right)^2 + \dots \dots + \left(\frac{x_n}{3 \cdot C_p} \right)^2 \quad (11)$$

En el caso particular de un proceso natural con un C_p igual a la unidad, la desviación típica de la cadena se expresa con la conocida expresión establecida en (12).

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{3}\right)^2} \quad (12)$$

6.3. EJEMPLO DE CÁLCULO (ADAPTADO DE W.R. DEVRIES, ANALYSIS OF MATERIAL REMOVAL PROCESSES, SPRINGER-VERLAG, 1992)

Se dispone de un elemento acotado conforme a lo establecido en la figura 8. Diversos elementos de un lote deben ser alojados en la pieza C. Se debe de obtener la probabilidad de que el montaje sea posible.

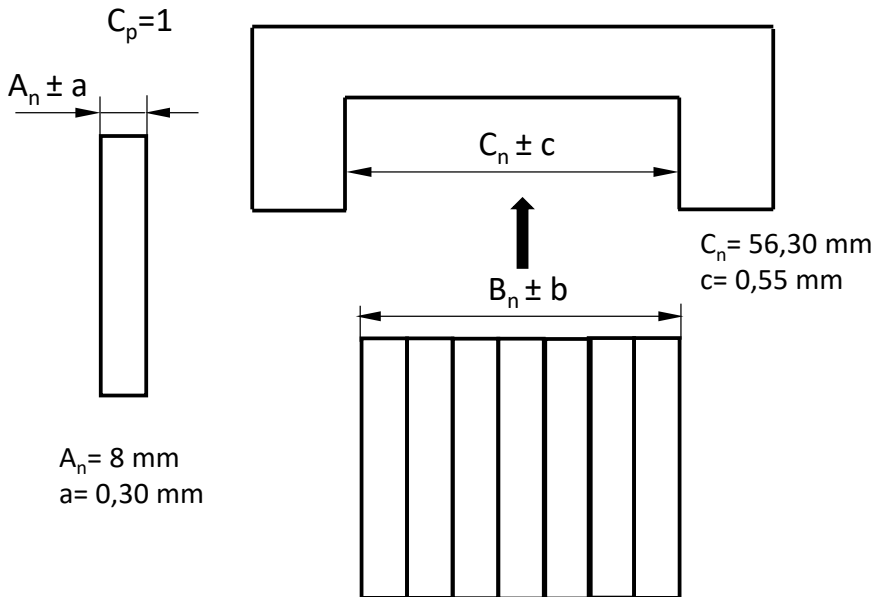


Figura 8. Apilado o “stack” de tolerancias y ensamblaje en elemento contenedor o “bracket”.

6.3.1. OBTENCIÓN DEL VALOR DE LA COTA DEL APILAMIENTO DE ELEMENTOS.

Al tratarse de 7 elementos, el valor nominal del montaje será 56 mm. Para el cálculo de la varianza se procede de acuerdo a la ley de propagación de varianzas, conforme a la expresión (13).

$$\sigma_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{A_i}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{3}\right)^2} = \sqrt{7 \cdot \left(\frac{0,3}{3}\right)^2} = 0,265 \text{ mm} \quad (13)$$

Por tanto, la cota resultante puede expresarse como $B = 56 \pm 3 \cdot 0,265 = (56,000 \pm 0,795) \text{ mm}$.

Para calcular si el montaje de B en C es posible, es necesario plantear la cadena de cotas $D = C - B$, por lo que el valor de la posible interferencia D se puede expresar conforme a (14) y (15).

$$D_n = C_n - B_n = 56,30 - 56 = 0,30 \text{ mm} \quad (14)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_B^2} = \sqrt{\left(\frac{0,55}{3}\right)^2 + 0,265^2} = 0,322 \text{ mm} \quad (15)$$

La variable $D \in N(0,30; 0,322^2)$, por lo que es necesario normalizar la variable a una distribución $N(0; 1)$. La probabilidad de interferencia, P, en el ensamblaje viene establecida como $P(\text{interferencia}) = P(D < 0)$. Normalizando la variable conforme a (16),

$$z = \frac{D - \mu_D}{\sigma_D} = \frac{D - D_n}{\sigma_D} = \frac{0 - 0,30}{0,322} = -0,9316 \quad (16)$$

Por tanto, $P(\text{interferencia}) = P(D < 0) = P(z < -0,9316) = 0,176$, por lo que la probabilidad de no poder realizar el montaje es del 17,6%.

7. DISEÑO Y FABRICACIÓN ROBUSTA

Se define como diseño robusto como aquel en que la función o puesta en escena del producto, o del proceso de fabricación del mismo, son relativamente invariantes con cualquier factor de ruido existentes en el funcionamiento del producto o en el proceso. Un aspecto muy relacionado con este concepto es la función de pérdidas de Taguchi. Los defectos detectados, reparados o reprocesados antes de distribuir un producto, son costes de fabricación. En cambio, la pérdida que un producto le cuesta a la sociedad desde el momento en que el producto sale a la venta, está relacionado con la calidad del producto según Taguchi. Entre estos costes o pérdidas se incluyen los fallos de funcionamiento, que hacen necesarios el mantenimiento y reparación del producto, la insatisfacción de los clientes y los daños causados por un diseño poco adecuado. Por tanto, el coste final de una pieza producida puede variar

en función de la distancia de sus dimensiones respecto de su valor nominal, que representa el mejor valor definido por diseño para su para su mejor funcionamiento. En este contexto, resulta necesario tratar la significación de las tolerancias definidas en plano junto al análisis de la función de pérdidas de Taguchi.

7.1. FUNCIÓN DE PÉRDIDAS DE TAGUCHI

Se puede establecer como hipótesis, tal como se ha comentado, que cuando una determinada dimensión de un componente difiere de su valor nominal, su función se ve afectada negativamente. Taguchi definió diversas funciones que establecen la pérdida o efectos negativos en un componente en función de la distancia de su verdadera dimensión respecto de la nominal. Una de las funciones más empleadas es parabólica, definida tal y como aparece en la figura 9, en la que $L(x)$ representa la función de pérdidas y K es una constante. La función tiene relevancia dentro de los valores límites definidos mediante tolerancias para la dimensión considerada.

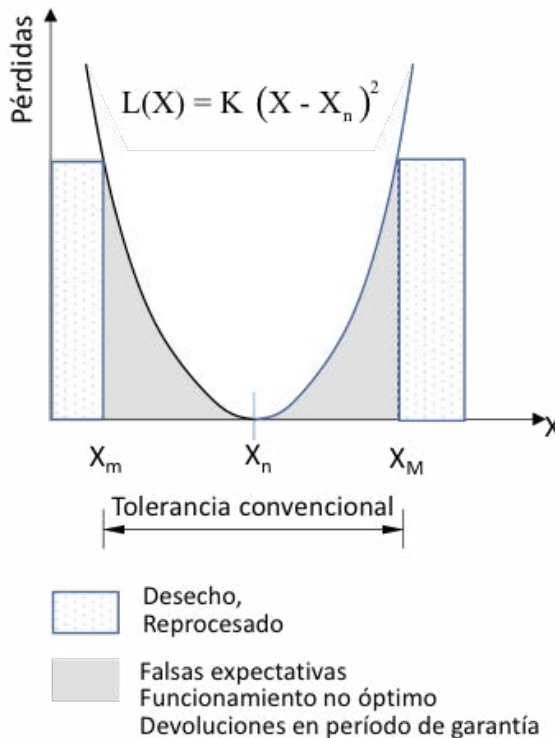


Figura 9. Representación de la función de pérdidas de Taguchi (modelo parabólico).

Bajo esta óptica, el coste de producción total de una pieza debe obtenerse sumando al coste de producción típico el coste proporcional repercutido por el reprocesado o desecho de piezas producidas fuera de las tolerancias especificadas, así como el coste repercutido conforme a la función de pérdidas de Taguchi. El coste total se expresa conforme a la ecuación (17), en la que se ha incluido también el coste de inspección o del control de calidad por pieza. En la ecuación (17) q representa la proporción de piezas defectuosas por unidad de piezas producidas. El último término, $E\{L(x)\}$, corresponde a la esperanza matemática de la función de pérdidas, esto es, el sumatorio del producto de la probabilidad de producir una pieza de valor determinado dentro del intervalo de tolerancia por el coste establecido por la función de pérdidas para la dimensión considerada. El sumatorio se establece para todo el intervalo de tolerancia. De este modo, y teniendo en cuenta los fundamentos de la estadística, $E\{L(x)\}$ puede expresarse como $k\sigma^2$, siendo σ la varianza representativa del proceso de producción.

$$C_{\text{total}} = C_{\text{producción}} + C_{\text{inspección}} + q \cdot C_{\text{reprocesado}} + E\{L(x)\} \quad (17)$$

CAPÍTULO 6

INTRODUCCIÓN AL LABORATORIO DE METROLOGÍA DIMENSIONAL. PRINCIPIOS GENERALES

1. Introducción.
2. Causas de error en las mediciones.
 - 2.1. Errores debidos al instrumento de medida.
 - 2.2. Errores debidos al operador.
 - 2.3. Errores debidos a la pieza que se mide.
 - 2.4. Errores debidos a los agentes externos o ambientales.
3. Bloques patrón longitudinales.
 - 3.1. Introducción.
 - 3.2. Requisitos generales.
 - 3.3. Requisitos en función del grado.
 - 3.4. Otras consideraciones.
 - 3.5. Juegos y calidades comerciales de BPL.
 - 3.6. Composición de los juegos de bloques patrón longitudinales.
4. Medición de longitudes mediante pie de rey.
 - 4.1. Descripción de un pie de rey.
 - 4.2. Tipos de pie de rey.
 - 4.3. Descripción del nonius como sistema de lectura.
5. Medición de longitudes mediante micrómetro.
 - 5.1. Descripción de un micrómetro y tipos.
 - 5.2. Partes de un micrómetro.
 - 5.3. Sistema de lectura analógico.
6. Medida de longitudes con comparadores.
7. Instrumentos para la medición y verificación de ángulos.
 - 7.1. Transportadores de ángulos.
 - 7.2. Nivel de burbuja.
 - 7.3. Regla de senos.
8. Bloques patrón de ángulos.

9. Mesas de planitud.

10. aplicación práctica: propuesta de calibración de un micrómetro exteriores de dos contactos.

10.1. Introducción y objetivos.

10.2. Requisitos establecidos para la calibración.

10.3. Operaciones y comprobaciones previas.

10.4. Proceso de calibración.

10.5. Cálculo de la corrección de calibración en cada punto de calibración.

10.6. Cálculo de incertidumbres.

10.7. Hoja de toma de datos.

10.8. Interpretación y expresión de los resultados.

1. INTRODUCCIÓN

La metrología dimensional engloba la medición de longitudes, de ángulos y de formas (planitud, rectitud, formas de revolución, paralelismo, perpendicularidad...). A un nivel microgeométrico se considera la medición del acabado superficial o rugosidad.

En el presente capítulo se describen, en primer término, los errores fundamentales cometidos en los procesos de medición y verificación. A continuación, se hace una descripción general de la instrumentación a utilizar en el laboratorio de metrología dimensional, así como se explican algunos principios de medida fundamentales.

2. CAUSAS DE ERROR EN LAS MEDICIONES

Existen causas de error que influyen en el resultado de las mediciones. Conviene establecer una enumeración de las mismas y una breve descripción con el objeto de tenerlas presentes durante el proceso de medición en el laboratorio y, en la medida de lo posible identificarlas y evitarlas.

Según Carro, una clasificación típica de errores de medición puede establecerse del siguiente modo:

- Debidas al instrumento de medida.
- Debidas al operador.
- Debidas a la pieza que se mide.
- Debidas a los agentes externos o ambientales.

Aunque, en algunos casos, un mismo error puede deberse a más de una causa, en la enumeración que se establece a continuación se considera la causa de error más habitual.

2.1. ERRORES DEBIDOS AL INSTRUMENTO DE MEDIDA

Se consideran los siguientes:

- De diseño y fabricación, debidos a defectos de planitud y/o paralelismo en los contactos, defectos en órganos amplificadores, en el grabado de escalas, defectos de rectitud, holguras...

- Por desgaste del instrumento.
- Por histéresis, como consecuencia de irreversibilidad de los fenómenos dentro del instrumento.
- Por efecto de carga, cuando el instrumento de medida interviene modificando el parámetro que mide. Ocurre especialmente en los instrumentos de medida eléctricos y electrónicos puesto que, para producir una indicación precisan energía que ha de ser proporcionada por el circuito en el que se realiza la medida.
- Por condiciones de trabajo, cuando el instrumento o el sensor no funciona bajo condiciones normales de trabajo (sensor alimentado a una tensión incorrecta...).
- Por inadecuada calibración del instrumento.

2.2. ERRORES DEBIDOS AL OPERADOR

- De lectura, por mala apreciación, interpolación no adecuada, etc.
- De paralaje, cuando la visual del operador no es perpendicular al sistema de lectura y éste está formado por planos diferentes; el índice y la escala están situados en planos paralelos separados una distancia h (figura 1).

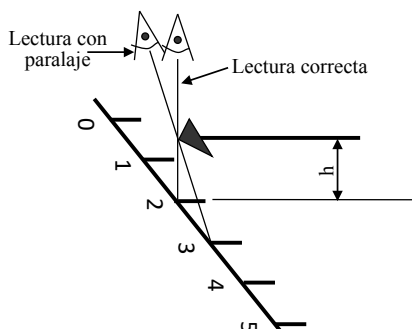


Figura 1. Error de paralaje (adaptado de Carro, J., Curso de metrología dimensional, ETSII de Madrid, Madrid, 1984).

- Por presión excesiva del instrumento en los contactos, provocando deformaciones en el instrumento y en la pieza.
- Por descuido, omisiones, etc., como mal ajuste del cero, manejo incorrecto del instrumento, mal posicionamiento de la pieza...
- Debidos al cálculo o al redondeo, al anotar los resultados, empleo de fórmulas no adecuadas...

2.3. ERRORES DEBIDOS A LA PIEZA QUE SE MIDE

Existen defectos en las piezas que pueden conducir a resultados erróneos en la medición. Uno de los ejemplos clásicos lo constituyen la medición de diámetros en piezas con defectos de ovalización (figura 2). Este defecto se detecta con la medición de varios diámetros, pero existen piezas trianguladas en las que los diámetros son constantes a pesar de su falta de redondez.

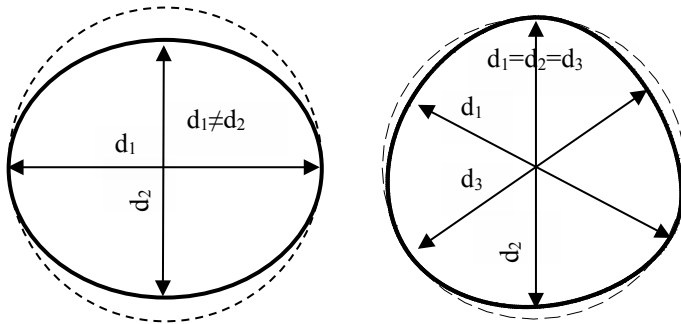


Figura 2. Defecto de redondez; en ocasiones el defecto no se detecta por medición de distintos diámetros.

En ocasiones se cometen errores por la deformación experimentada por las piezas debido a un apoyo inadecuado, por ejemplo (figura 3).

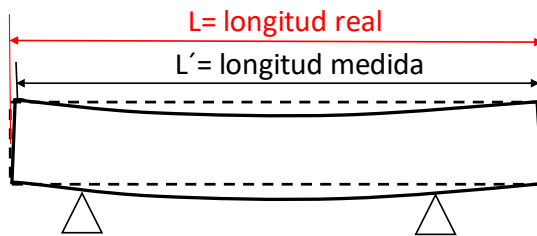


Figura 3. Errores de medición por acortamiento de piezas debido a su propio peso (adaptado de Carro, J., Curso de metrología dimensional, ETSII de Madrid, Madrid, 1984).

2.4. ERRORES DEBIDOS A LOS AGENTES EXTERNOS O AMBIENTALES

- Por presencia de señales o elementos parásitos, como vibraciones y perturbaciones mecánicas, señales de radio y frecuencia, campos eléctricos y magnéticos...
- Por factores ambientales como la temperatura, humedad, presión atmosférica, etc. El factor más importante suele ser la temperatura que hace variar las dimensiones de los cuerpos, el volumen, la densidad y la viscosidad de líquidos y gases, la resistividad de los conductores eléctricos, afecta a las medidas con termopares... La presión atmosférica suele tener influencia en la pesada de cuerpos en balanzas en las que la columna de aire sobre la balanza depende del volumen del cuerpo (generalmente el encapsulado del instrumento evita este error (figura 4).

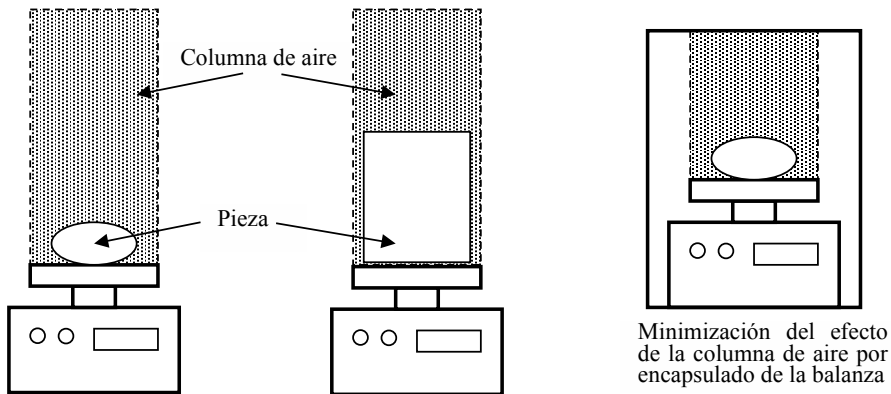


Figura 4. Influencia de la presión atmosférica en la medición en una balanza.

3. BLOQUES PATRÓN LONGITUDINALES

3.1. INTRODUCCIÓN

Los bloques patrón son patrones de longitud que representan fracciones específicas de la unidad de longitud, el metro, del sistema internacional de unidades, SI. Dependiendo del tipo de aplicación y de la calidad requerida, los bloques patrón se suministran en diversos grados. La calibración de un bloque patrón, es decir, la medida del valor de la longitud en un punto específico de la cara de medida y la evaluación de la incertidumbre de medida son la base para la aplicación de los bloques patrón como patrones de longitud.

La normalización de los bloques patrón longitudinales (BPL) se establece en UNE-EN ISO 3650. Esta norma establece las características metroológicas y de diseño más importantes de los bloques patrón de sección rectangular y longitud nominal l_n comprendida entre 0,5 mm y 1000 mm. Se contemplan cuatro calidades metroológicas de BPL en función de diferentes requisitos metroológicos: grado K, grado 0, grado 1 y grado 2.

3.2. REQUISITOS GENERALES

Existen una serie de requisitos genéricos para los BPL independientemente de su grado: fabricación en acero de alta calidad o en otros materiales de resistencia al desgaste parecida, en los que pueda lograrse un acabado superficial tal que permita la adherencia entre bloques. El coeficiente de dilatación térmica de los bloques patrón de acero, en el campo de temperaturas de 10°C a 30°C deberá ser de $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Las caras de medida de los bloques de acero deberán tener una dureza Vickers no inferior a 800 HV 0,5. Cada bloque patrón deberá llevar grabada, de forma permanente su longitud nominal en milímetros y su identificación individual con caracteres específicos y ubicación adecuados (según Norma).

Se establecen requisitos generales para la planitud y paralelismo de las caras laterales de los BPL (caras de no medida), así como para la perpendicularidad entre caras de medida y laterales. Todos estos requisitos son función de la longitud nominal del bloque.

3.3. REQUISITOS EN FUNCIÓN DEL GRADO

Cada bloque patrón debe cumplir con los requisitos de su grado. Éstos pueden resumirse del siguiente modo:

- Estabilidad dimensional (tabla I). Se limita la máxima variación o deriva de los bloques en un período de tiempo de un año. Lógicamente la deriva permitida es función de la longitud nominal del bloque l_n y es menor en los bloques con mayor calidad metroológica (grado K).

Grado	Máximas variaciones de longitud permitidas por año (l_n se expresa en mm)
K 0	$\pm(0,02 \mu\text{m} + 0,25 \times 10^{-6} \times l_n)$
1 2	$\pm(0,05 \mu\text{m} + 0,5 \times 10^{-6} \times l_n)$

Tabla I. Estabilidad dimensional (deriva).

- Planitud de las caras de medida. Para las caras de medida la planitud depende también de la longitud del bloque y del grado (tabla II). La tolerancia de planitud t_f se establece como la distancia entre dos planos paralelos que contienen a todos los puntos de la cara de medida.

Longitud nominal, l_n (mm)	Grado K	Grado 0	Grado 1	Grado 2
$0,5 \leq l_n \leq 150$	0,05	0,1	0,15	0,25
$150 < l_n \leq 500$	0,1	0,15	0,18	0,25
$500 < l_n \leq 1000$	0,15	0,18	0,2	0,25

Tabla II. Tolerancia de planitud t_f (μm)

- Máxima desviación de la longitud del bloque en cualquier punto de sus caras de medida respecto a la longitud nominal del mismo. Los valores máximos considerados en función de la longitud del bloque y del grado del mismo pueden consultarse en la Norma.
- Máxima tolerancia de la variación de longitud (figura 5). La variación de longitud v se define como la diferencia entre las longitudes máxima y mínima del bloque. Los valores de tolerancia de la variación de la longitud t_v en función de la longitud del bloque y del grado del mismo pueden consultarse en la Norma.

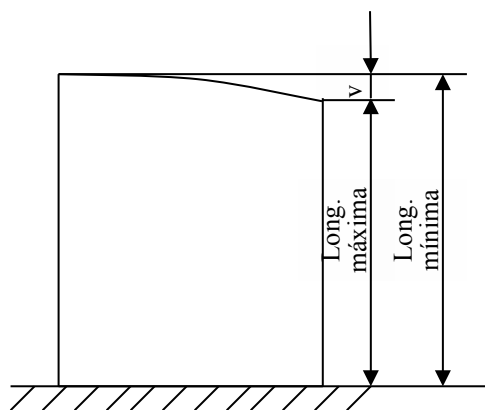


Figura 5. Definiciones de longitudes en un BPL.

3.4. OTRAS CONSIDERACIONES

La longitud nominal y las longitudes medidas de un bloque patrón han de entenderse a la temperatura de referencia de 20 °C y la presión normal de 101 325 Pa=1,013 25 bar.

Las caras de medida de todos los bloques patrón deberán adherirse fácilmente. Pueden admitirse algunas rayas estrechas sin rebabas siempre y cuando no afecten a la adherencia.

El certificado de calibración deberá incluir los resultados de medida, en particular la longitud central l_c (figura 6) o la desviación de la longitud central respecto a la nominal l_c-l_n , las incertidumbres estimadas, y una declaración de trazabilidad que haga referencia a los patrones de longitud de onda utilizados. El certificado deberá especificar la cara de medida del bloque patrón adherida durante la medición y si fue adherido sucesivamente sobre la base auxiliar por las dos caras de medida. El certificado también deberá especificar el coeficiente de dilatación térmica tomado para ajustar los resultados a 20 °C.

Generalmente, y dado que el empleo de los bloques se realiza como pertenecientes a un juego, la calibración afecta al conjunto de los bloques, esto es, si algún bloque no cumple las especificaciones descritas para el grado en el que estaba clasificado, debe ser sustituido por otro de igual valor nominal o bien, degradar todo el juego al grado en el que sea válido el bloque afectado.

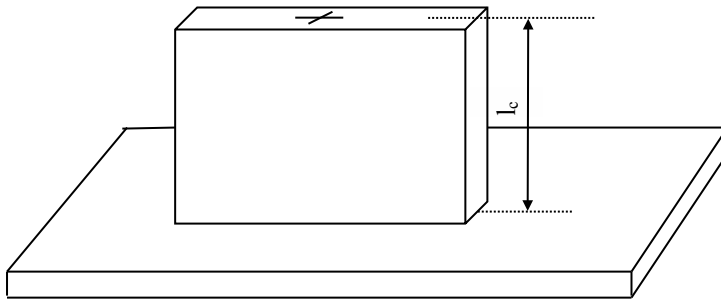


Figura 6. Definición de longitud central de un BPL.

3.5. JUEGOS Y CALIDADES COMERCIALES DE BPL

Generalmente, los BPL se suministran en juegos (figura 7), de modo que las variables a considerar a la hora de adquirir un juego son:

- El número de bloques que compone el juego.

- El material de los bloques.
- El grado (calidad metrológica).



Figura 7. Distintos juegos de bloques patrón longitudinales de 47 piezas.

En relación al material, en función del fabricante, se suelen comercializar bloques fabricados en:

- Acero templado con las caras de medida lapeadas de durezas en torno a los 800 HV (64HRC). Es la calidad de material comúnmente solicitada ya que tienen una alta resistencia al desgaste y una buena adherencia a otros bloques. El principal problema de este material radica en que el acero debe protegerse contra la corrosión con algún tipo de grasa o aceite neutro. El coeficiente de dilatación térmica para estos bloques es $(11,5 \pm 1,0) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.
- Carburo de tungsteno, de dureza 1400 HV y un coeficiente de dilatación térmica de $(4,23 \pm 0,1) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Su empleo está pensado para aplicaciones en las que se requiera una mayor calidad de adherencia.
- Cerámica, extremadamente resistentes al desgaste y a los arañazos. Debido a las características de fragilidad de los bloques cualquier daño superficial en las caras de medida perjudica su adherencia. Son resistentes a la corrosión e insensibles a la sudoración transmitida en su manipulación. Suelen fabricarse en zirconio estabilizada. Son no magnetizables, de dureza no inferior a 1400HV y poseen un coeficiente de dilatación térmica de valor $(9,7 \pm 0,8) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

En cualquier caso, la manipulación de los bloques patrón debe hacerse de forma muy cuidadosa evitando en lo posible el contacto manual (sin guantes) que pueda generar focos de corrosión debido a la suciedad y la sudoración. Deben guardarse convenientemente estuchados con grasa neutra. La limpieza de los bloques debe hacerse con paños suaves para evitar arañazos.

3.6. COMPOSICIÓN DE LOS JUEGOS DE BLOQUES PATRÓN LONGITUDINALES

Los BPL se emplean para componer cualquier longitud mediante el pegado de varios bloques. Así, es práctica corriente adquirir juegos de bloques. La premisa fundamental en la composición de una longitud es realizar ésta empleando el menor número de bloques para evitar la incertidumbre que pudiera generar el pegado de los mismos. Por tanto, en función del número de valores nominales disponibles el montaje de bloques se hará con mayor o menor número de éstos. La composición de algunos juegos comerciales se indica en la tabla III.

Así, por ejemplo, si se decide materializar una longitud de 32,17mm y se dispone de un juego de 112 bloques o de uno de 47, se pueden plantear las siguientes posibilidades:

- Juego de 112 piezas: 1 bloque de 1,17 mm + 1 bloque de 25mm +1 bloque de 6mm (total 3 bloques).
- Juego de 47 piezas: 1 bloque de 1,07mm + 1 bloque de 1,1 mm + 1 bloque de 25mm + 1 bloque de 5 mm (total 4 bloques) (figura 8).

Como se observa, los juegos con mayor número de bloques suelen permitir componer longitudes con menor número de éstos. Además, permiten componer hasta el micrómetro en tanto que los otros no.

También pueden adquirirse bloques sueltos para sustituir bloques deteriorados o perdidos en los juegos o bien, porque se persigue algún valor nominal concretamente.

Total bloques/juego	Nº bloques	Medidas (mm)	Intervalo (mm)
112	1	1,0005	-
	9	1,001~1,009	0,001
	49	1,01~1,49	0,01
	49	0,5~24,5	0,5
	4	25~100	25
87	9	1,001~1,009	0,001
	49	1,01~1,49	0,01
	19	0,5~9,5	0,5
	10	10~100	10
47	1	1,005	-
	9	1,01~1,09	0,01
	9	1,1~1,9	0,1
	24	1~24	1
	4	25~100	10
32	1	1,005	-
	9	1,01~1,09	0,01
	9	1,1~1,9	0,1
	9	1~9	1
	3	10~30	10
	1	60	-

Tabla III. Composiciones de juegos de bloques patrón longitudinales.

En la figura 8 también se observa que la formación de bloques se realiza con adherencia de unos con otros (los bloques más pequeños no se caen, aunque no están apoyados).

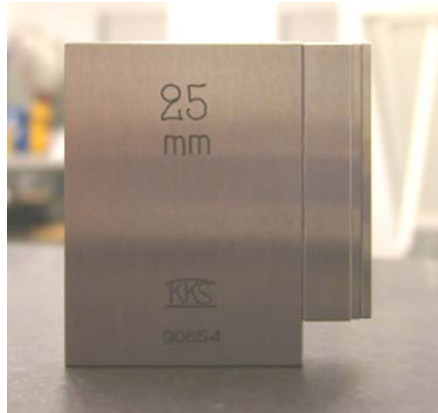


Figura 8. Formación de una longitud nominal de 32,17 mm mediante bloques de un juego de 47 piezas (25 + 5 + 1,1 + 1,07).

4. MEDICIÓN DE LONGITUDES MEDIANTE PIE DE REY

4.1. DESCRIPCIÓN DE UN PIE DE REY

En la figura 9 se representa un pie de rey con las diferentes partes que lo componen y en la figura 10 se indican las diferentes mediciones de longitud que pueden realizarse (interiores, exteriores y alturas).

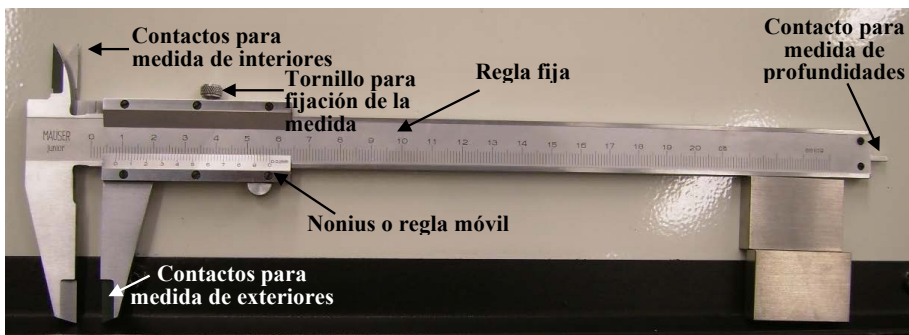


Figura 9. Descripción de un pie de rey.

4.2. TIPOS DE PIE DE REY

En función del sistema de lectura existen diferentes tipos de pies de rey: digitales, con reloj comparador y de nonius (figura 11). En función de los usos específicos para los que están previstos, existe una gran variedad en el diseño de las bocas, pero el principio de funcionamiento de todos ellos es similar.

Aunque en la actualidad, el uso del pie de rey con sistema de medición digital se ha generalizado, debido fundamentalmente a la sencillez en la interpretación de la lectura realizada, el pie de rey de nonius está especialmente indicado para la medición en ambientes en los que se requiera robustez en el instrumento. Además, el sistema de nonius se aplica a una gran variedad de instrumentación (no sólo a pies de rey). Los sistemas de medición digital no requieren ninguna explicación y el sistema de reloj será descrito en el epígrafe dedicado a los comparadores de reloj. Por este motivo, a continuación, se describe el sistema de nonius.

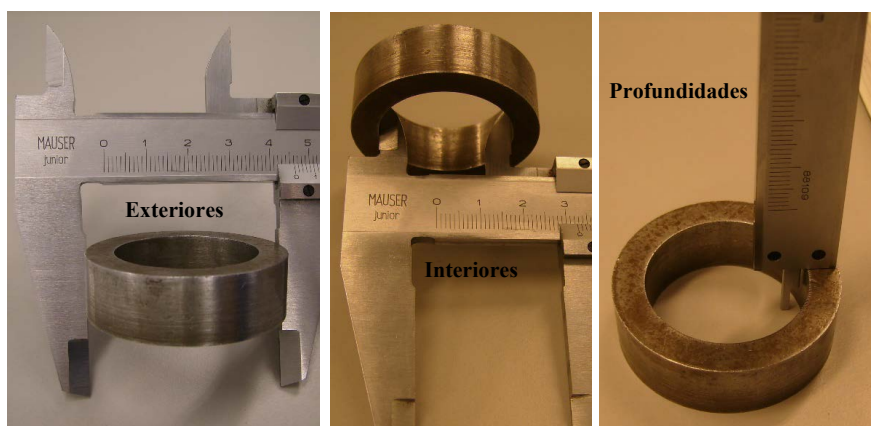


Figura 10. Mediciones de longitudes mediante pie de rey.

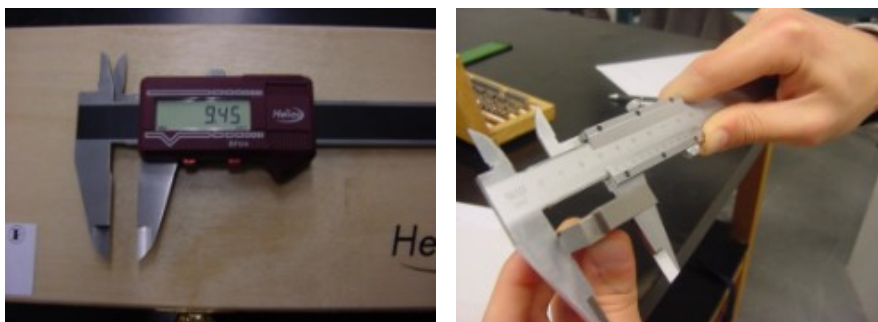


Figura 11. Pies de rey con distintos sistemas de lectura.

4.3. DESCRIPCIÓN DEL NONIUS COMO SISTEMA DE LECTURA

El origen del nonius se debe a Vernier que fue quien lo inventó. Es un modo sencillo de amplificar la indicación de un instrumento de medición. El sistema consiste en una regla fija grabada sobre la base del instrumento y en una regla móvil, nonius, solidaria al palpador móvil.

La regla fija está dividida en las unidades correspondientes, U, generalmente milímetros. El nonius está dividido en un número de partes iguales, n, de modo que se cumple que las n divisiones del nonius corresponden a N-1 divisiones de la regla fija. Así, la apreciación, R, del sistema de medida se obtiene conforme a la expresión (1).

$$R = \frac{1}{N} U \quad (1)$$

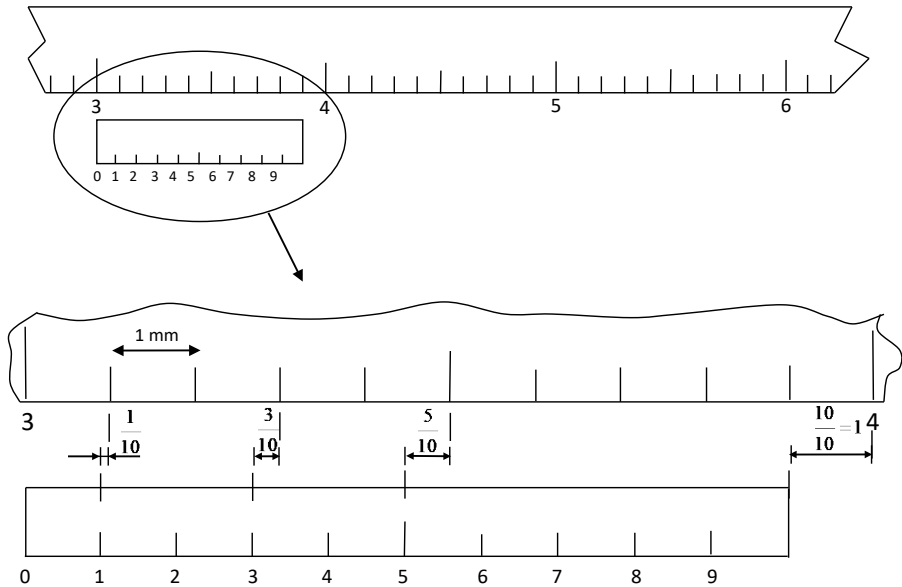


Figura 12. Principio de funcionamiento del nonius. Aplicación a un nonius de apreciación 0,1 mm.

Así, por ejemplo, si n=10 divisiones en el nonius corresponden a 9 divisiones de la regla fija (N=10), la apreciación para el pie de rey es 0,1 mm. Según esto el principio de medida es sencillo; las unidades se corresponden con el valor indicado por el 0 del nonius y los decimales, por el primer trazo del nonius enrasado con algún trazo de la regla fija (figura 12). Como puede observarse en la figura, si

se enrasa el 0 del nonius con un trazo de la regla fija, el 1 se encuentra adelantado $1/10$ unidades del siguiente y así sucesivamente. Por tanto, si el cero se encuentra, por ejemplo, entre la unidad 33 y 34 de la regla fija, el decimal se determina con el trazo del nonius que coincida con alguno de la regla; como el que coincide es el 3, significa que el nonius está desplazado $3/10$ de la unidad, esto es, del 33, dando lugar al correspondiente valor decimal.

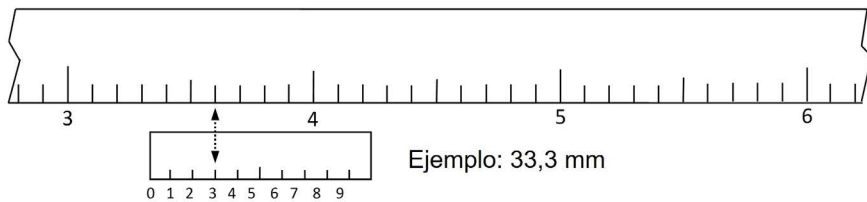


Figura 13. Ejemplo de una indicación de valor 33,3 mm en un nonius de apreciación 0,01 mm.

Uno de los nonius más generalizados es el de apreciación 0,02mm obtenido dividiendo en 50 partes, 49 de la regla fija (figura 14).

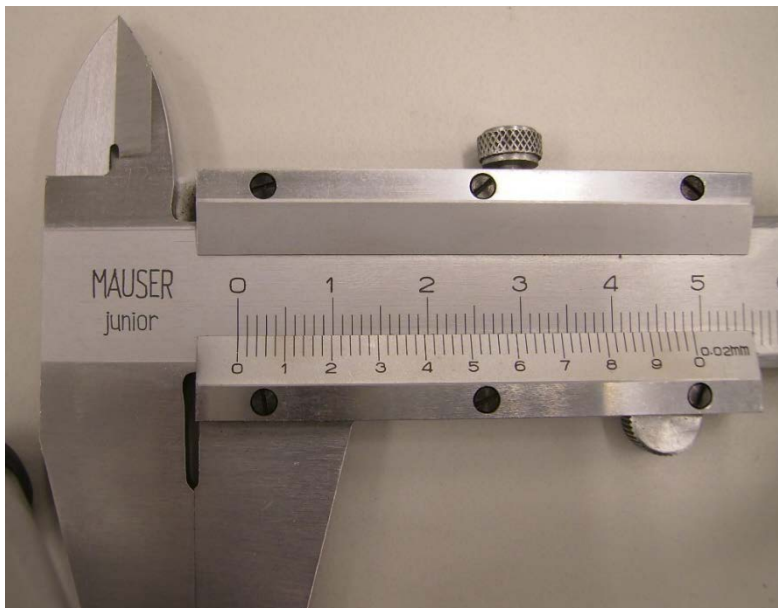


Figura 14. Nonius con apreciación 0,02 mm.

Existen otros instrumentos de medición de longitudes basados en el nonius como sistema de lectura, como los medidores de altura (figura 15) y las sondas de profundidad (figura 16).

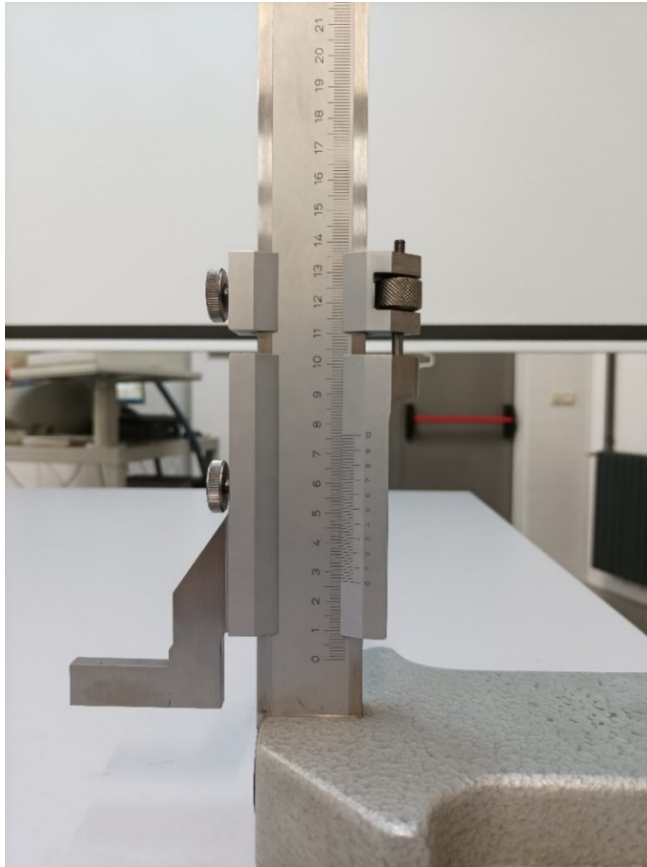


Figura 15 Medidor de alturas con empleo de nonius como sistema de lectura.



Figura 16. Sonatas de profundidad que emplean el nonius como sistema de lectura.
Detalle de la escala de medición.

5. MEDICIÓN DE LONGITUDES MEDIANTE MICRÓMETRO

5.1. DESCRIPCIÓN DE UN MICRÓMETRO Y TIPOS

La versatilidad del micrómetro como instrumento es menor que la del pie de rey, precisándose distintos instrumentos para la medición de exteriores, interiores y profundidades. No obstante, desde el punto de vista de la precisión, un micrómetro es más robusto que un pie de rey y mantiene en el mismo eje la escala de medición y el contacto con la pieza a medir (principio de Abbey), lo que en general le convierte en un instrumento de mayor precisión.

Como se ha indicado para los pies de rey, existen también diferentes tipos de micrómetros en función del uso, número y forma de los contactos y del sistema de lectura (analógicos y digitales). En las figuras 17 a 19 se muestran diferentes tipos de micrómetros analógicos de dos contactos: micrómetros de exteriores, de interiores y de profundidades.



Figura 17. Micrómetros de exteriores de dos contactos.



Figura 18. Micrómetros de interiores de dos contactos.



Figura 19. Micrómetro de profundidades.

5.2. PARTES DE UN MICRÓMETRO

En la figura 20 se puede observar las diversas partes de un micrómetro de exteriores:

- El cuerpo del micrómetro construido en forma de arco que debe asegurar una gran resistencia a la deformación por flexión para la fuerza aplicada en la medida.
- El tope fijo, que constituye uno de los contactos del micrómetro sobre la pieza a medir.
- El tope o contacto móvil, que constituye el otro contacto sobre la pieza a medir. Es solidario a un tornillo calibrado de alta precisión.
- El cilindro, sobre el que va dibujada una escala fija dividida en 0.5 mm. Es solidario a la tuerca fija sobre la que gira el tornillo de alta precisión.
- El tambor, solidario a un tornillo de alta precisión, que gira desplazándose axialmente el mismo trayecto que el contacto móvil. Cada vuelta de giro del tornillo, el contacto móvil se desplaza 0.5 mm, así como el tambor. El

tambor lleva una escala dibujada dividiendo su perímetro en partes iguales. En este caso el tambor lleva dibujados 50 trazos que constituyen la unidad centesimal (0,01 mm) del micrómetro.

- Limitador del par de aplicación sobre el tambor, que sirve para limitar la fuerza de medición sobre la pieza.

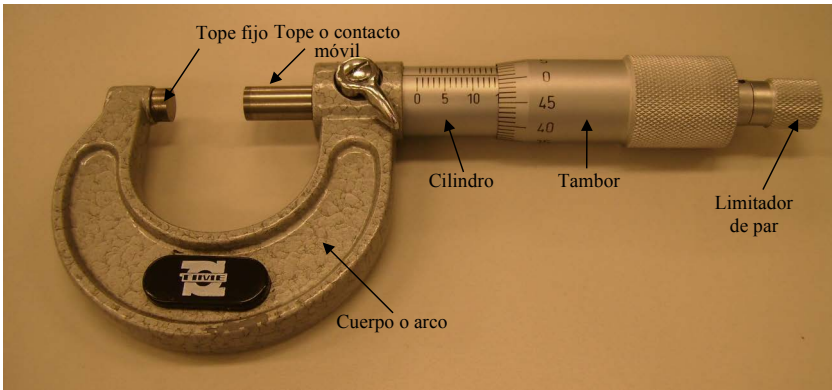


Figura 20. Partes de un micrómetro.

5.3. SISTEMA DE LECTURA ANALÓGICO

El sistema de medida de un micrómetro analógico permite obtener la magnitud a medir a partir de los milímetros leídos en la escala longitudinal del cilindro graduado, más el valor del número de divisiones del tambor que coincida con el trazo longitudinal de la escala del cilindro (figura 21).

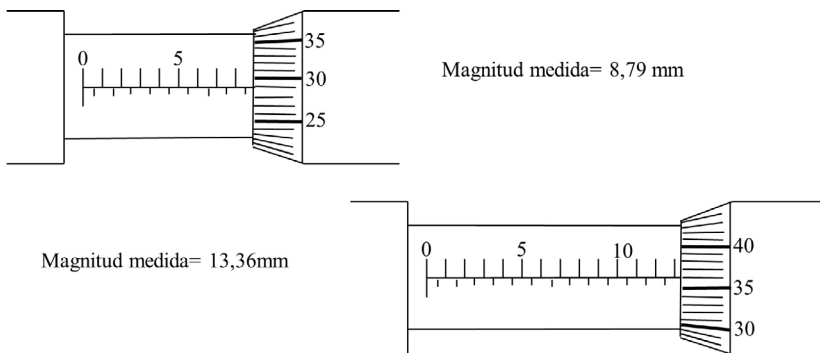


Figura 21. Esquema del sistema de medición de un micrómetro analógico de división de escala, $E = 0,01\text{mm}$.

mucha precisión. Consta de un lado principal (A), un sistema de lectura y una regla deslizante (C). La medida se realiza situando uno de los lados del ángulo a medir coincidente con la regla deslizante y el otro lado con el principal A.

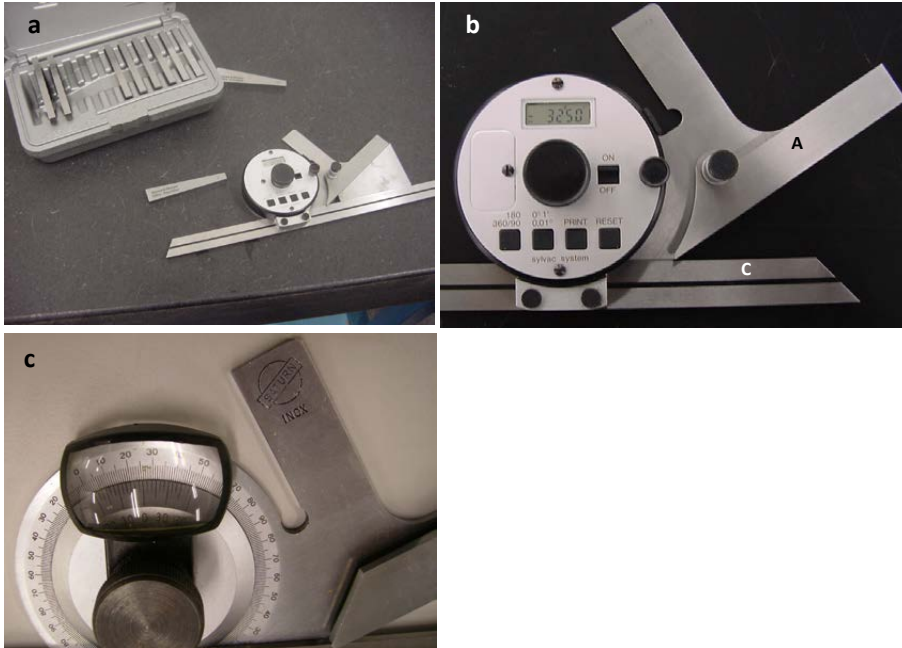


Figura 23. a). Medición directa mediante un transportador de ángulos; b). Transportador de ángulos con sistema de lectura digital y partes del instrumento: A-lado principal; C-regla deslizante; c). Transportador de ángulos con sistema de medida por nonius.

7.2. NIVEL DE BURBUJA

Se utiliza para comprobar la horizontalidad de una superficie o para medir las desviaciones angulares de planos o rectas con respecto a la horizontal. Para considerar en mayor detalle las características de este instrumento puede consultarse la norma UNE 82308. Esencialmente consta de un tubo de vidrio curvado cerrado a la llama que contiene en su interior alcohol o éter, llenándolo por completo salvo una burbuja que, por su menor densidad, queda siempre en la parte superior. Las desviaciones que experimenta la burbuja se leen en la escala graduada del tubo de vidrio. En la figura 24 se puede observar dos niveles de precisión de burbuja con diferentes divisiones de escala.

Una de las características más interesantes de un nivel es su sensibilidad. La sensibilidad se define como el cociente entre el incremento de la escala de lectura y el correspondiente incremento del ángulo que se mide (UNE 82308), que es coherente con la definición dada previamente de sensibilidad. No obstante, resulta de gran utilidad definir, en el caso de niveles, la sensibilidad aparente.

La sensibilidad aparente de un nivel es la variación de pendiente por metro al dar a la burbuja un desplazamiento correspondiente a una división de la graduación del tubo (figura 25).

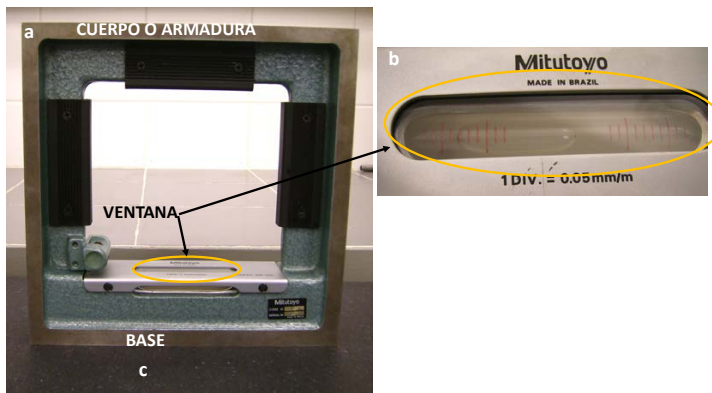


Figura 24. Niveles de burbuja de precisión; a). Nivel de armadura cuadrada; b).Detalle de la ventana de lectura; división de escala 0,05 mm/m; c).Nivel lineal con división de escala 0,02 mm/m.

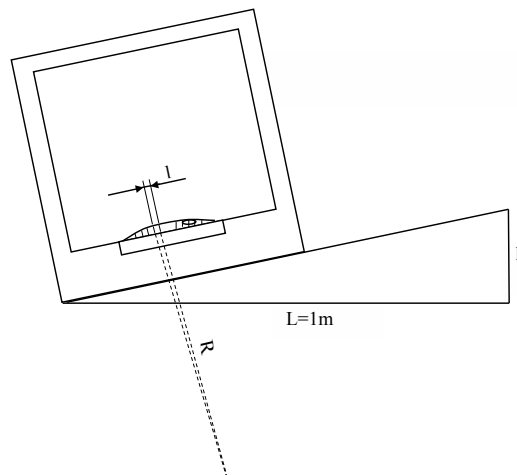


Figura 25. Definición de sensibilidad aparente de un nivel de burbuja.

Los niveles de mayor precisión suelen tener sensibilidades de 0,01 ó 0,02 mm/m, estando distantes los trazos del tubo 1 o 2mm.; con estos datos (figura 24) podemos calcular el radio de curvatura del nivel (2).

$$\frac{R}{L} = \frac{1}{h} \quad (2)$$

La relación R/L es la relación de amplificación del nivel.

7.3. REGLA DE SENOS

Son instrumentos que permiten materializar un ángulo, de forma indirecta, con gran precisión. Está formada por una regla de sección rectangular rectificada y lapeada, sobre la que se fijan dos cilindros de igual diámetro a una distancia L, de manera que sus ejes están en un plano paralelo a la superficie de referencia (figuras 26 y 27). Se pueden encontrar reglas de senos con valores de L comprendidos entre 100 y 400 mm. Un ángulo se materializa a partir del seno mediante bloques patrón longitudinales, conforme a la ecuación (3).

$$\text{sen}\alpha = \frac{H - h}{L} \quad (3)$$

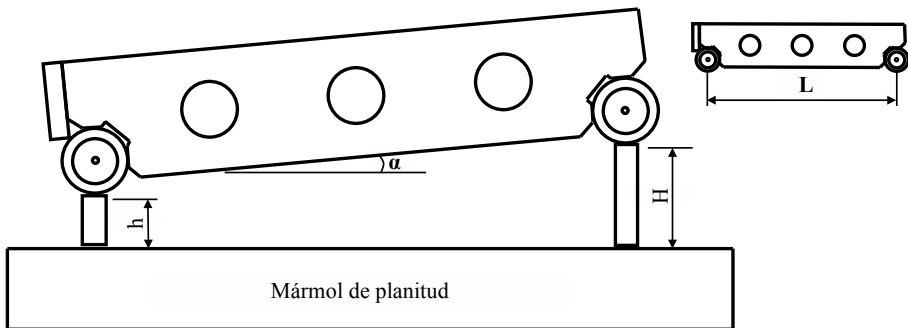


Figura 26. Materialización de un ángulo mediante regla de senos y bloques patrón longitudinales.

Aunque materializa ángulos con gran precisión no debe utilizarse para formar ángulos superiores a 45° porque se aumenta considerablemente la incertidumbre asociada a partir de ese ángulo.

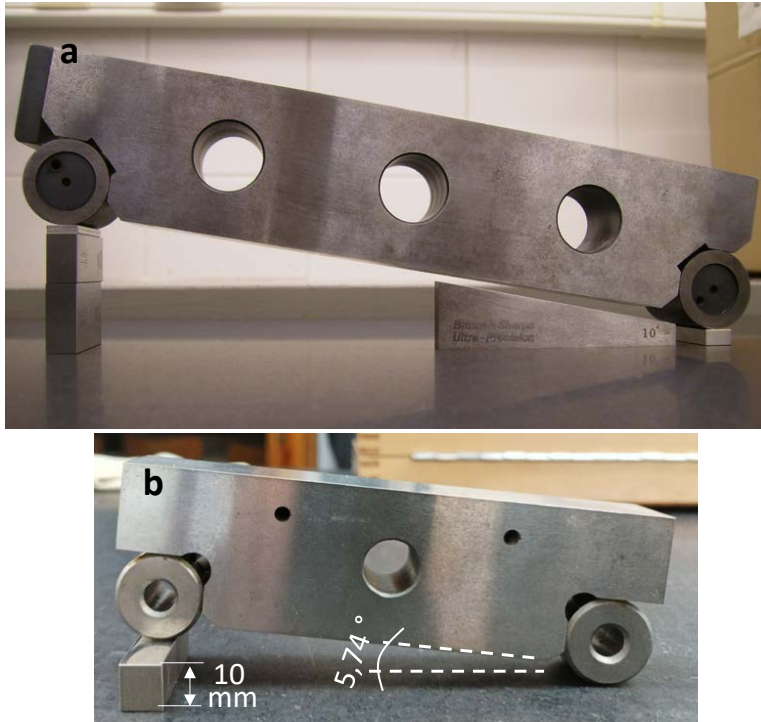


Figura 27. a), Formación de un ángulo de 10° mediante una regla de senos de 200 mm de longitud y bloques patrón; b). Regla de senos de 100 mm de longitud.

8. BLOQUES PATRÓN DE ÁNGULOS

Materializan un ángulo entre dos de sus caras planas. Se suministran comercialmente de acero con diferentes calidades metrológicas y en juegos con diferente número de bloques. Un juego típico se compone de 17 bloques (tabla IV).

Nº Bloques	Valor nominal (grados)	Nº Bloques	Valor nominal (minutos)	Nº Bloques	Valor nominal (segundos)
1	90	1	30	1	30
1	45	1	20	1	20
1	30	1	5	1	5
1	15	1	3	1	3
1	5	1	1	1	1
1	3				
1	1				

Tabla IV. Composición de un juego de bloques patrón angulares de 17 piezas.

Con estos juegos se puede materializar cualquier ángulo, mediante sumas o restas de bloques, con un intervalo de 1 segundo de arco (figura 28).

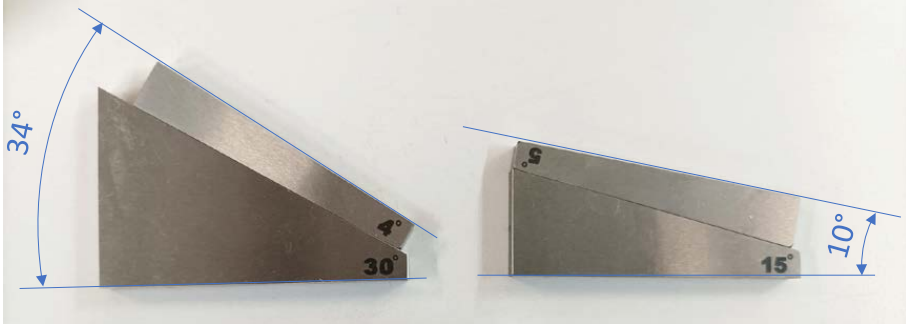


Figura 28. Formación de ángulos mediante suma y resta de bloques patrón.

Así, por ejemplo, un ángulo de 23 grados, 19 minutos y 32 segundos se haría con el siguiente montaje:

- Bloques colocados en sentido creciente: 1 bloque de 15°, 1 bloque de 5°, 1 bloque de 3°, 1 bloque de 20', 1 bloque de 30" y 1 bloque de 3".
- Bloques colocados en sentido decreciente: 1 bloque de 1' y 1 bloque de 1".

Se aconseja utilizar el menor número de bloques para que el error de montaje y el debido al de los bloques sea mínimo.

9. MESAS DE PLANITUD

Se utilizan como superficie de referencia en muchas aplicaciones prácticas. Pueden ser de acero o de mármol y su normalización se realiza en UNE 82309 en la que se especifican cuatro grados metrológicos en función de su planitud. En la figura 29a se establece una mesa de planitud de granito de grado 0, esto es, de alta precisión. Además de la planitud, la superficie de referencia debe estar nivelada en muchas aplicaciones, por lo que las mesas de granito deben apoyarse en un soporte equipado con tornillos de reglaje. Los tornillos A, B y C son los denominados tornillos de reglaje, que se emplean para la nivelación del mármol o granito de planitud. Los tornillos D y D' se emplean para garantizar el apoyo del granito sobre el soporte, evitando el alabeo del mismo en dichos extremos.

El empleo de un nivel, entre otros procedimientos, sirve para comprobar la planitud de una superficie apoyada sobre la mesa, o la de la propia mesa. Al mismo tiempo sirve para comprobar la nivelación de la mesa de planitud.

La nivelación se realiza primero en una dirección, por ejemplo, la AB y posteriormente según la dirección perpendicular CE (figura 29b). Para ello puede emplearse una regla apoyada en BPL sobre la mesa si no se quiere apoyar el nivel directamente (figura 29c). En este caso hay que tomar la precaución de centrar el nivel para evitar errores debido a la flexión de la regla.

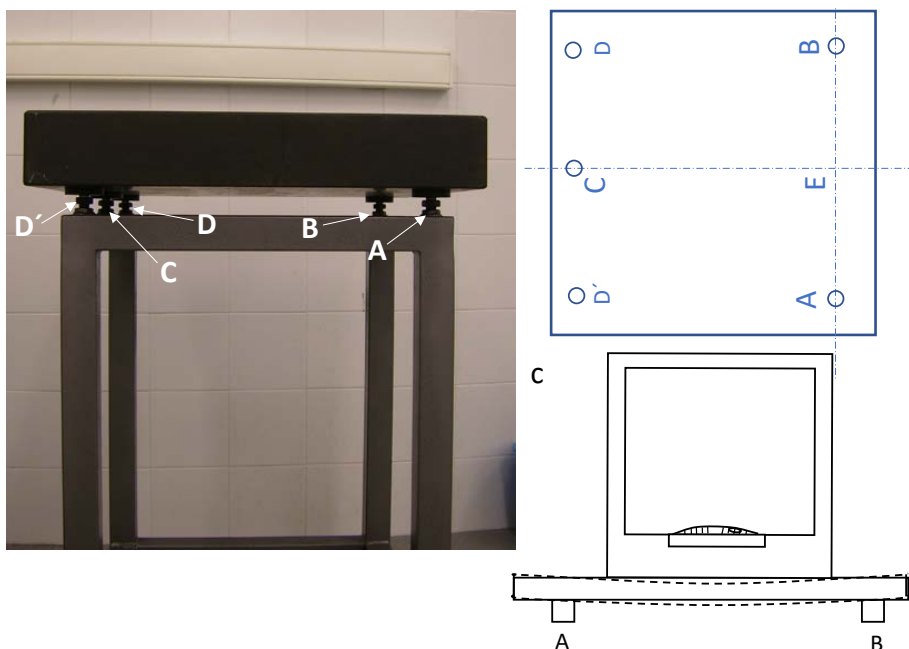


Figura 29. a). Mesa de planitud compuesta por un granito de calidad 0 y un soporte con tornillos para nivelación (A, B y C) y para evitar el alabeo (D y D'); b). Esquema de las direcciones de nivelación; c). Nivelación mediante empleo de regla y bloques patrón longitudinales.

10. APLICACIÓN PRÁCTICA: PROPUESTA DE CALIBRACIÓN DE UN MICRÓMETRO DE EXTERIORES DE DOS CONTACTOS

10.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este epígrafe se pretende reforzar algunos aspectos prácticos relativos a la práctica de la calibración de un instrumento de medida. La aplicación va dirigida a la calibración de un micrómetro de exteriores de dos contactos de división de

escala E= 0,01mm. Para ello se considera el procedimiento de calibración publicado por el CEM: “Procedimiento DI-005 para la calibración de micrómetros exteriores de dos contactos”.

Desde este punto de vista conviene indicar que existen procedimientos de calibración para diversos instrumentos de medición de magnitudes diferentes (dimensional, radiofrecuencia, eléctricas...) publicados por el CEM. Este tipo de procedimientos consisten en una serie de indicaciones dirigidas a la calibración del instrumento correspondiente. Aunque no son de obligado cumplimiento, resultan de gran utilidad para la elaboración de procedimientos de calibración en los manuales de calidad en el entorno de la certificación. En relación a la acreditación, el cumplimiento de los procedimientos en la calibración es prácticamente obligado.

Pero no existen procedimientos publicados para todos los instrumentos de medición por lo que es necesaria otro tipo de documentación en estos casos. En particular, en lo relativo a la calibración de máquinas de ensayos de tracción, dureza, resiliencia, etc., existen normas UNE-EN ISO que abarcan este tema.

En ausencia de los procedimientos CEM y de las normas UNE-EN ISO, se debe recurrir a cuanta información exista disponible: información del fabricante, procedimientos publicados en bibliografía diversa, etc. Otra posibilidad es consultar los antiguos procedimientos SCI (Sistema de Calibración Industrial) publicados por el Ministerio de Fomento, aunque la disponibilidad de estos es prácticamente inexistente.

Además del conocimiento de la existencia de los procedimientos de calibración citados, en este epígrafe se persiguen otros objetivos de aplicación práctica:

- El empleo de bloques patrón longitudinales (BPL) y realización de montajes de bloques, reforzando los conceptos relacionados.
- El manejo y empleo de un micrómetro de exteriores de dos contactos planoparalelos con sistema de medición tipo Palmer, reforzando la comprensión sobre el fundamento de medida con este tipo de instrumentos.
- Conocimiento de los requisitos en la calibración de este tipo de instrumentos (extrapolables a otros instrumentos de medida) recomendados por los procedimientos de calibración editados por el CEM.
- Establecer el grado de concordancia existente entre la metodología general del cálculo de incertidumbres en la calibración y la metodología específica indicada en el procedimiento de calibración editado por el CEM (simplificación del procedimiento).

10.2. REQUISITOS ESTABLECIDOS PARA LA CALIBRACIÓN

El DI-005 establece los siguientes requisitos como deseables:

- Empleo de BPL de calidad 2 o superior.
- Mantenimiento de la temperatura del local en un rango de (20 ± 5) °C, cuyo valor debe anotarse, al menos, al comienzo y al final de la calibración.
- Los BPL a emplear en la calibración se situarán en la zona de calibración y preferentemente sobre una chapa metálica, dejándolos estabilizar térmicamente durante 30 minutos.

10.3. OPERACIONES Y COMPROBACIONES PREVIAS

Antes de proceder a la materialización de puntos de calibración con los BPL y a su medición con el instrumento de medida para obtener las correcciones de calibración correspondientes, se deben realizar una serie de operaciones previas:

- Debe efectuarse una inspección visual del instrumento del micrómetro, comprobando la correcta legibilidad de su escala, suavidad del movimiento de giro de la cabeza micrométrica y el funcionamiento adecuado del limitador de par.
- Se debe efectuar la comprobación de la planitud y del paralelismo de cada una de las dos caras de medida mediante el empleo de patrones plano-paralelos de vidrio (PP). Si no se dispone de PP puede suprimirse dicha comprobación con la consiguiente pérdida de calidad en la calibración del instrumento.
- Comprobar si existe un desajuste importante del micrómetro. Para ello se reiteran 10 medidas en el punto de contacto del instrumento (contacto entre ambos topes o contactos). Si la desviación media es mayor que la división de escala, debería realizarse una operación de ajuste en el instrumento mediante el desmontado y montaje del mismo.

No es frecuente disponer de los patrones planoparalelos de vidrio en los laboratorios o secciones de calibración de las pequeñas empresas o laboratorios. Pero es posible realizar algunas comprobaciones visuales que permiten de manera razonable descartar el mal estado de los palpadores. Por ejemplo, puede establecerse una inspección visual del contacto de los palpadores con el micrómetro cerrado y con patrones longitudinales entre los contactos.

10.4. PROCESO DE CALIBRACIÓN

Se adoptarán diferentes puntos j de calibración (DI-005 sugiere 6 puntos) de forma que resulten aproximadamente equidistantes dentro del campo de medida del instrumento (0-25mm). Es conveniente tener en cuenta en la elección de los puntos evitar posiciones homólogas de la rosca de precisión del instrumento. Para ello deben tomarse decimales en alguno de los puntos. Así, por ejemplo, si se decide calibrar en 6 puntos, se sugieren los siguientes (mm):

0 5 10,01 15,68 20 24,90

Basta con estudiar la repetibilidad en un punto, elegido libremente, tomando en los restantes puntos una sola medida. Se aconseja que el número de mediciones (i) en dicho punto sea al menos de 10.

Conviene variar la posición del BPL respecto del micrómetro tras cada medida alternando las caras en contacto con el micrómetro de entre las dos posibles (figura 30).

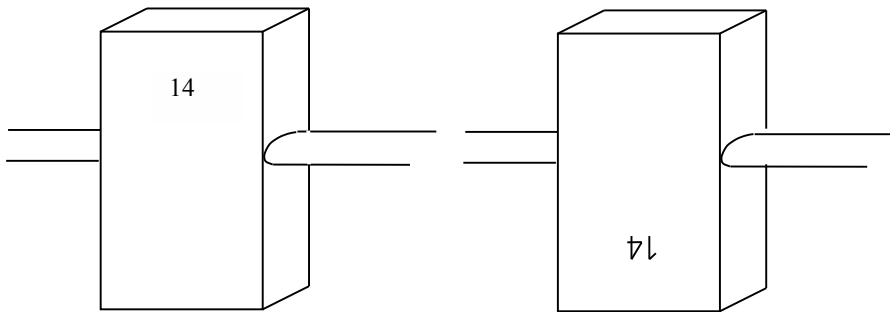


Figura 30. Alternado de las caras del bloque o montaje de bloques en contacto con el micrómetro en cada medida en la determinación de la repetibilidad del instrumento en el proceso de calibración.

10.5. CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN DE CALIBRACIÓN EN CADA PUNTO DE CALIBRACIÓN

La corrección de calibración en el punto j , C_j en el que se reiteran al menos 10 medidas, se calcula a partir del valor nominal del BPL o del montaje efectuado X_{0nj} y de la media aritmética de las lecturas efectuadas sobre el patrón \bar{X}_{cj} como:

$$C_j = X_{0nj} - \bar{X}_{cj} \quad (4)$$

En los puntos en los que sólo se mide una vez, la corrección C_j se calcula a partir del valor nominal del BPL o del montaje efectuado X_{0j} y de la lectura obtenida X_{cj} , según:

$$C_j = X_{0j} - X_{cj} \quad (5)$$

En cualquier caso, también puede considerarse el valor certificado del patrón X_{0j} o del montaje empleado en vez del valor nominal, para el cálculo de la corrección de calibración en cada uno de los puntos.

10.6. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

La varianza S_c^2 en el punto de calibración en el que se reiteran $n_{cj} \geq 10$ medidas, se obtiene a partir de la conocida expresión:

$$S_c^2 = \frac{1}{n_{cj}} \sum_{i=1}^{n_{cj}} (X_i - \bar{X}_{cj})^2 \quad (6)$$

El cálculo de la incertidumbre de calibración en el punto en el que se realizan $n_{cj} \geq 10$ se hace a partir de la expresión:

$$U_{cj} = k_c \sqrt{u_{0j}^2 + \frac{S_c^2}{n_{cj}} + \frac{E^2}{12}} \quad (7)$$

En dicha expresión u_{0j}^2 representa la varianza asociada al bloque patrón utilizado. Cuando se emplea un montaje de bloques, la varianza para el montaje puede obtenerse a partir de la suma de las varianzas para cada uno de ellos (figura 31).

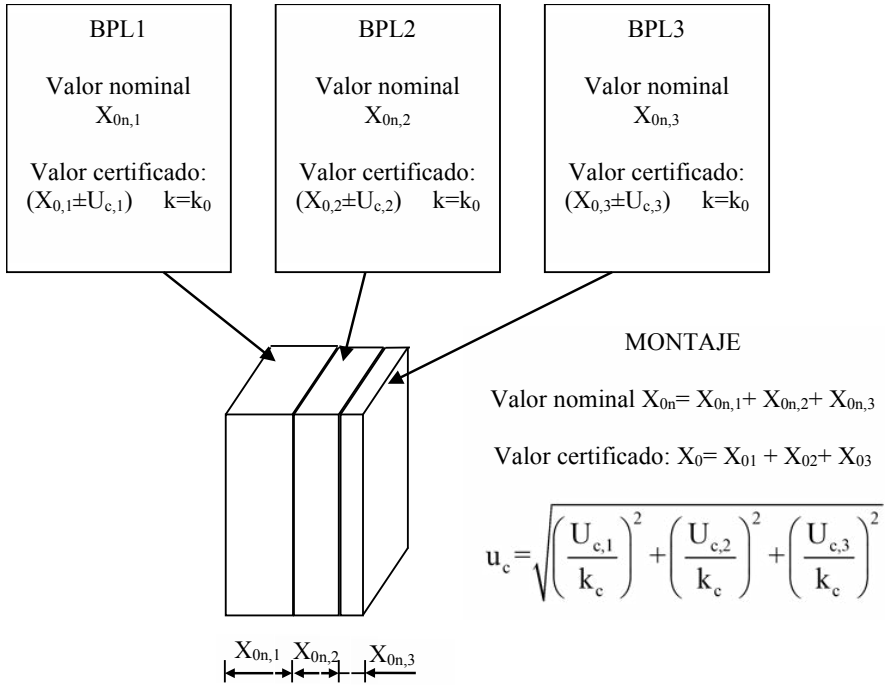


Figura 31. Obtención de los valores de calibración para un montaje de BPL.

La incertidumbre de calibración para el resto de puntos se obtiene de forma análoga sin más que considerar $n_{c_j}=1$, es decir:

$$U_{c_j} = k_c \sqrt{u_{0j}^2 + S_c^2 + \frac{E^2}{12}} \quad (8)$$

10.7. HOJA DE TOMA DE DATOS

Se recomienda el formato indicado en la Tabla V, que permite anotar los valores obtenidos en el procedimiento experimental de calibración. Si se realiza en alguna aplicación informática, como Excel de Microsoft®, se puede extender para la realización de los cálculos oportunos conforme a lo indicado en las ecuaciones 4 a 9.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Lectura 1						
Lectura 2						
Lectura 3						
Lectura 4						
Lectura 5						
Lectura 6						
Lectura 7						
Lectura 8						
Lectura 9						
Lectura 10						
Valor nominal patrón X_{0n}						
Incert. típica patrón u_0						
Valor medio lecturas \bar{X}_c						
Varianza muestral S_c^2						
Incertid. Calibración u_c						

Tabla V. Formato recomendado para la toma de datos en el proceso de calibración de un micrómetro.

10.8. INTERPRETACIÓN Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Tras el proceso de calibración indicado, se obtienen la corrección y la incertidumbre de calibración en cada punto. La utilidad del procedimiento se basa, generalmente, en poder establecer una corrección de calibración y una incertidumbre globales para todo su campo de medida. Para ello son aplicables las

posibilidades estudiadas en la metodología general del cálculo de incertidumbres en el capítulo 4.

Generalmente suele ser recomendable, y así lo establece el DI-005, expresar la incertidumbre redondeada a la división de escala del instrumento. Esto contrasta con la recomendación de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida-JCGM 100:2008, si bien los resultados con decimales pueden trasladarse luego a la incertidumbre de uso del instrumento.

CAPÍTULO 7

MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN DE ROSCAS

1. Introducción.
 - 1.1. Definición de la rosca Métrica ISO.
 - 1.2. Errores de un elemento roscado.
 - 1.3. Definición de tolerancias en roscas.
2. Procedimientos para la comprobación de roscas.
3. Verificación de un tornillo por medición separada de cada elemento.
 - 3.1. Medición del diámetro de flancos mediante un micrómetro de puntas intercambiables.
 - 3.2. Medición del diámetro de flancos mediante el método de las tres varillas o de los tres alambres.
 - 3.3. Medición del ángulo del perfil de rosca mediante el método de las tres varillas.
 - 3.4. Selección del paso de rosca mediante patrones de perfil.
4. Consideraciones para la práctica de medición de roscas.

1. INTRODUCCIÓN

En una unión roscada, las superficies de contacto son helicoidales engendradas por un perfil determinado, cuyo plano contiene al eje y describe una trayectoria helicoidal cilíndrica alrededor de este eje.

En función del perfil generador se pueden definir diferentes tipos de roscas: rosca métrica ISO, rosca Whitworth, rosca redonda, rosca trapecial y rosca en dientes de sierra. Generalmente, las roscas ISO métrica y Whitworth suelen emplearse como elementos de unión mientras que el resto son habitualmente utilizadas como elementos para transmitir movimiento. Existe algún tipo más de rosca en función del empleo al que van destinada como, por ejemplo, la rosca gas.

En lo sucesivo se considerará únicamente la rosca Métrica ISO o rosca Métrica, aunque con alusiones a la rosca Whitworth.

1.1. DEFINICIÓN DE LA ROSCA MÉTRICA ISO

En la rosca ISO el perfil generador (figura 1) es un triángulo equilátero de altura h , truncado por dos paralelas a la base trazadas respectivamente a $1/8$ y $1/4$ de la altura a partir del vértice y del valle respectivamente (UNE 17701). Los elementos geométricos que la definen son:

p = paso de la hélice directriz o paso de la rosca.

d = diámetro exterior.

d₁ = diámetro del núcleo.

d₂ = diámetro de los flancos del filete o diámetro medio ($d_2 = d - 0'6495 \cdot p$).

d₃ = diámetro del núcleo en el perfil obtenido de fabricación, que difiere del perfil teórico por un radio de descarga en el diámetro d_1 ; el valor de este radio suele fijarse en $h/6 = 0'144 \cdot p$.

α = ángulo en el vértice del perfil generador.

ϕ = ángulo de inclinación de la tangente o la hélice media con respecto a un plano normal al eje.

La nomenclatura indicada para los diámetros corresponde a una rosca exterior (tornillo); para rosca interior (tuerca) se emplea la misma nomenclatura, pero con letras mayúsculas.

El ángulo de inclinación de la hélice media teóricamente se puede obtener a partir de la ecuación (1), teniendo en cuenta que la hélice tiene un desarrollo correspondiente a la circunferencia media con un paso, p , que corresponde al de la rosca (figura 2). También puede obtenerse como el ángulo comprendido entre la perpendicular al filete de rosca en la circunferencia media y el eje del tornillo.

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{p}{\pi \cdot d_2} \quad (1)$$

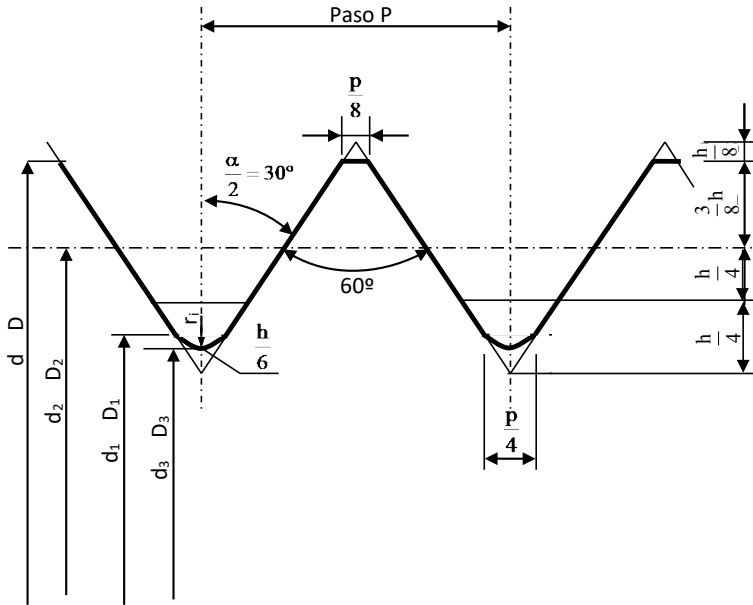


Figura 1. Definición del perfil de una rosca Métrica ISO conforme a UNE 17701 (adaptado de la norma).

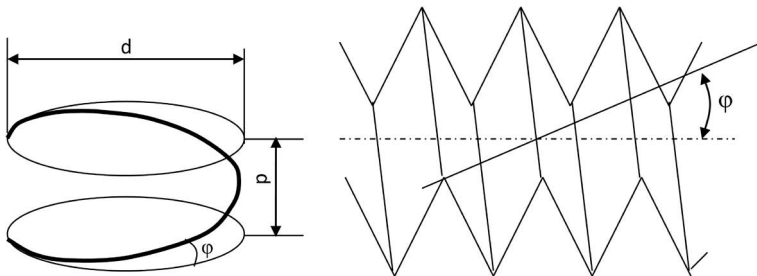


Figura 2. Definición del ángulo de hélice de una rosca.

Existen diferentes series de rosca normalizadas de forma que los diámetros y los pasos están relacionados. En la tabla I se indican los pasos normalizados para roscas de paso normal y de paso fino. La diferencia entre ambos es que, para un mismo diámetro de rosca, la serie de paso fino presenta un valor inferior para el paso que la serie de paso normal.

Diámetro nominal (mm)	Paso (mm)	
	Grueso	Fino
1	0,25	
1,2	0,25	
1,6	0,35	
2	0,4	
2,5	0,45	
3	0,5	
4	0,7	
5	0,8	
6	1	
8	1,25	1
10	1,5	1
12	1,75	1,25
16	2	1,5
20	2,5	1,5
24	3	2
30	3,5	2
36	4	3

Tabla I. Pasos y diámetros normalizados de rosca métrica ISO (UNE 17702) para la primera serie normalizada (existen más series).

1.2. ERRORES EN UN ELEMENTO ROSCADO

En un conjunto roscado el asiento ha de ser perfecto sobre toda la extensión de un flanco y sobre toda la longitud de los filetes, mientras que el juego debe encontrarse íntegramente sobre el otro flanco.

En la figura 3 se muestra una unión correcta y uniones no correctas derivadas de los errores posibles en la fabricación de roscas.

Cuando existe un error de paso el contacto entre los elementos roscados sólo se realiza con algunos filetes de la rosca y no con todos los comprendidos en la longitud de rosca involucrada. El error de ángulo de simetría de perfil conduce al contacto entre filetes en una línea a lo largo de la hélice y no en el plano previsto. Por último la suma de ambos errores, paso y ángulo de simetría conduce a un contacto lineal en algunos filetes y no en todos.

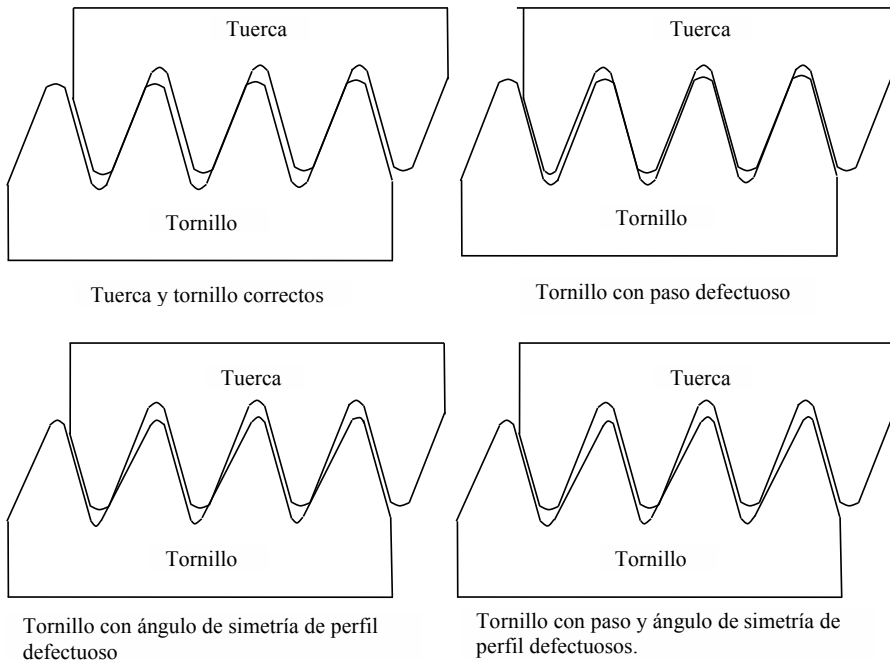


Figura 3. Definición de una unión roscada correcta y la incidencia de diferentes errores de fabricación (adaptado de Estévez, S., Sanz, P., La Medición en el taller mecánico, CEAC, España, 1977).

Este tipo de errores da lugar a montajes defectuosos con posibilidades de deformaciones y roturas en los elementos de unión bajo cargas de trabajo admisibles en el caso de uniones correctas.

1.3. DEFINICIÓN DE TOLERANCIAS EN ROSCAS

Es condición fundamental que el montaje de la tuerca en el tornillo sea siempre posible. Los flancos de la rosca deben apoyarse sobre toda la superficie del flanco y para ello, el paso y el semiángulo del flanco deben corresponderse en el mayor grado posible en la tuerca y el tornillo.

Se puede demostrar que si se desea acoplar con una tuerca ejecutada según un perfil teórico, un tornillo con el ángulo del filete o el paso defectuosos, hay que disminuir el diámetro en los flancos o diámetro medio de este tornillo para permitir el acoplamiento. Para una tuerca es análogo, esto es, si el paso y/o el ángulo son defectuosos es preciso aumentar el diámetro medio. Esto supone efectuar correcciones que, junto con la ejecución propia del diámetro de la rosca supone un valor de tolerancia total aplicado al diámetro medio de la misma.

El sistema de tolerancias de roscas está normalizado en UNE 17707 en el que dicho sistema proporciona tolerancias definidas por calidades y posiciones para cada uno de los siguientes diámetros: diámetro interior de roscas de tuercas (D_1), diámetro exterior de roscas de tornillos (d_1), diámetro de flancos de roscas de tuercas (D_2) y diámetro de flancos de roscas de tornillos (d_2).

La selección de combinaciones de calidades y posiciones de las tolerancias recomendadas se establece para tres clases de calidades: fina, media y basta, para tres grupos de longitud de acoplamiento: corto (S), normal (N) y largo (L). La longitud de acoplamiento se clasifica en uno de los tres grupos en función del diámetro y del paso de la rosca (consultar la norma UNE 17707).

Para reducir el número de calibres y útiles se consideran preferentemente las clases de tolerancias indicadas en la tabla II para tuercas y para tornillos. El valor correspondiente de calidad para los diferentes diámetros se establece en la norma UNE 17707, así como las diferencias fundamentales que definen las distintas posiciones.

TUERCAS						
Clase de calidad	Posición de tolerancia G			Posición de tolerancia H		
	S	N	L	S	N	L
Fina				<i>4H</i>	<i>5H</i>	<i>6H</i>
Media	<u>5G</u>	<u>6G</u>	<u>7G</u>	5H	6H	7H
Basta		<u>7G</u>	<u>8G</u>		<i>7H</i>	<i>8H</i>

TORNILLOS									
Clase de calidad	Posición de tolerancia e			Posición de tolerancia g			Posición de tolerancia h		
	S	N	L	S	N	L	S	N	L
Fina							3h 4h	4h	5h 4h
Media		6e	7e 6e	5g 6g	6g	7g 6h	5h 6h	6h	7h 6h
Basta				8g	9g 8g				

Tolerancias recomendadas (1ª elección)

Tolerancias recomendadas (2ª elección)

Tolerancias a evitar

Tabla II. Clases de tolerancias recomendadas para tuercas y tornillos (UNE 17707).

Las tolerancias con □ son las clases a emplear preferentemente (tolerancia para tornillería comercial)

Así, la clase de tolerancia para tornillos comerciales es 6g. Para esta clase de tolerancia el valor de ésta, en micrómetros, se obtiene a partir del paso de la rosca p mediante la expresión (2) para el diámetro exterior y, mediante la expresión (3) para el diámetro de flancos.

$$T_d = 180\sqrt[3]{p^2} - \frac{3,15}{\sqrt{p}} \quad (2)$$

$$T(d_2) = 90p^{0,4}d^{0,1} \quad (3)$$

En las expresiones (2) y (3) d y p se introducen en mm. En la expresión (3) d corresponde a la media geométrica del grupo de diámetros en los que se clasifican dimensionalmente según la tabla VI de la norma citada. El valor de d a introducir en la expresión (3), en función del diámetro exterior básico del tornillo se establece en la tabla III.

Diámetro exterior tornillo (mm)		d considerada en (3) (mm)
más de	hasta	
2,8	5,6	3,96
5,6	11,2	7,92
11,2	22,4	15,84
22,4	45	31,75

Tabla III. Media geométrica de los diámetros de los distintos grupos de clasificación dimensional según la norma UNE 17707.

La posición de la tolerancia g (en micrómetros) se define por la diferencia fundamental (desviación superior) calculada con la expresión (4).

$$d_s = -(15 + 1lp) \quad (4)$$

Los valores máximos y mínimos establecidos para tornillería comercial están calculados y expresados en forma de tablas en la Norma UNE 17708.

Para el diámetro interior del tornillo y exterior de la tuerca no se establecen tolerancias estrictas siendo suficiente que las dimensiones garanticen el montaje de la unión tuerca-tornillo. El perfil real del fondo de la rosca no sobrepasará en ningún punto el perfil básico. Para tornillos el perfil del redondeado no debe tener un radio de curvatura inferior a $0,1p$.

2. PROCEDIMIENTOS PARA LA COMPROBACIÓN DE ROSCAS

Los procedimientos pueden ser clasificados en dos grupos:

- Verificación por medición separada de cada elemento: consiste en la medición de los diferentes elementos que definen la rosca. Para ello se establecen diferentes procedimientos que se considerarán posteriormente aplicados a tornillos.
- Verificación con calibres de tolerancia: esta verificación se lleva a cabo mediante calibres que materializan las dimensiones máxima y mínima de la rosca para los diámetros a verificar (diámetro de flancos y diámetro exterior en tornillos y diámetro de flancos y diámetro interior en tuercas). El procedimiento consiste en la típica comprobación pasa-no pasa generalizada para otros usos con otros tipos de calibres (figura 4).



Figura 4. Calibres ISO para la verificación de rosca métrica de calidad comercial.

Así, por ejemplo, el calibre M8 x 1,25-6H sirve para comprobar esta calidad de rosca en tuercas. La tuerca a verificar debe roscar en el lado “pasa” y no roscar en el lado rojo o “no pasa”. El lado rojo materializa la máxima dimensión de los diámetros interior y de flancos, en tanto que el lado “pasa” materializa las dimensiones mínimas. Por tanto, si una tuerca no rosca en el lado “pasa” o rosca en el lado “no pasa” no será válida.

El calibre para tornillos M8 x 1,25-6g materializa las dimensiones máximas de los diámetros interior y de flancos del tornillo a verificar. Se precisa otro calibre que materialice las dimensiones mínimas constituyendo un calibre “no pasa”.

3. VERIFICACIÓN DE UN TORNILLO POR MEDICIÓN SEPARADA DE CADA ATRIBUTO

La medición del diámetro exterior de un tornillo no entraña ninguna dificultad, pudiendo efectuarse con pie de rey, micrómetro de exteriores, etc. La medición del diámetro interior no es importante y, en cualquier caso se requiere algún instrumento de medición de exteriores con palpadores especiales (no suelen encontrarse este tipo de instrumentos en el mercado). Para la medición del paso existe alguna instrumentación específica, pero de uso no frecuente y difícilmente disponible en el mercado.

Mediante el empleo de un proyector de perfiles (figura 5) es posible medir todos los elementos de la rosca de un tornillo (diámetro exterior, diámetro interior, radio de fondo, ángulo del perfil generador, simetría del perfil de rosca y paso. El cálculo del diámetro medio o de flancos podría obtenerse de forma indirecta ya que no se encuentra materializado en el perfil de rosca.

No obstante, existen métodos alternativos para la medición del diámetro de flancos, que junto con la verificación del diámetro exterior podría establecer el cumplimiento o no de las tolerancias establecidas para las diversas calidades de tornillos en la Norma UNE 17707 (con la salvedad del radio de fondo del filete).

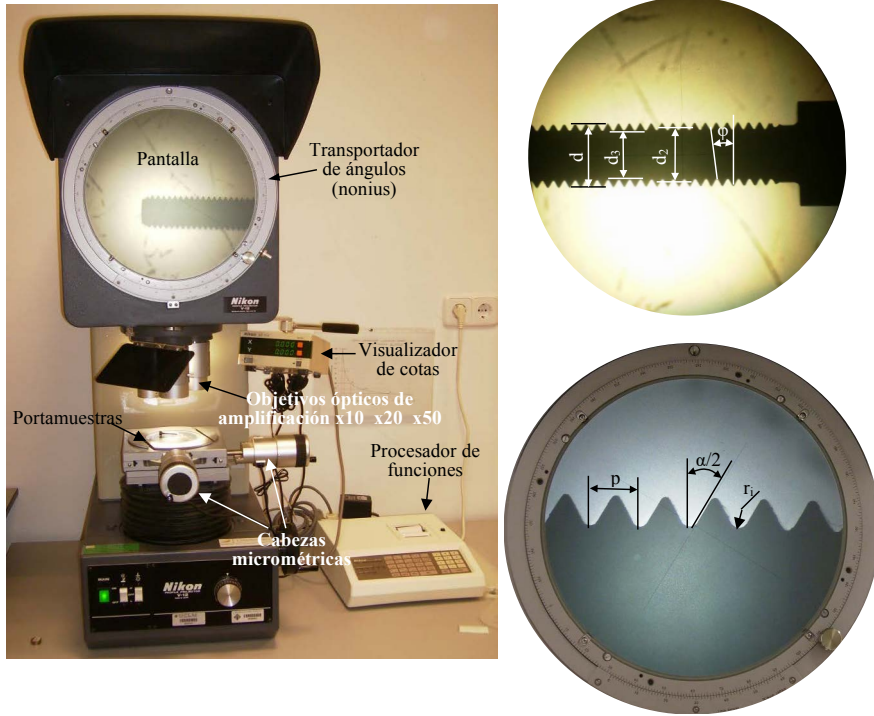


Figura 5. Medición de los diferentes elementos que definen una rosca mediante un proyector de perfiles.

3.1. MEDICIÓN DEL DIÁMETRO DE FLANCOS MEDIANTE UN MICRÓMETRO DE PUNTAS INTERCAMBIABLES

La medición se efectúa de forma directa mediante un micrómetro con palpadores especiales que contactan con el filete en el diámetro medio o de flancos (figura 6).

Ahora bien, como existen diferentes pasos para diferentes diámetros del tornillo, se necesita una pareja de palpadores o de puntas por cada paso. En realidad, comercialmente, una misma pareja de puntas suele emplearse para más de un paso. Así generalmente, para rosca métrica existe una pareja de puntas para los siguientes pasos de rosca métrica (mm) (orientativo puesto que depende del fabricante):

0,4-0,5 0,5-0,6 0,7-0,8 1-1,25 1,5-1,75 2-2,5 3-3,5 4-5 5,5-6

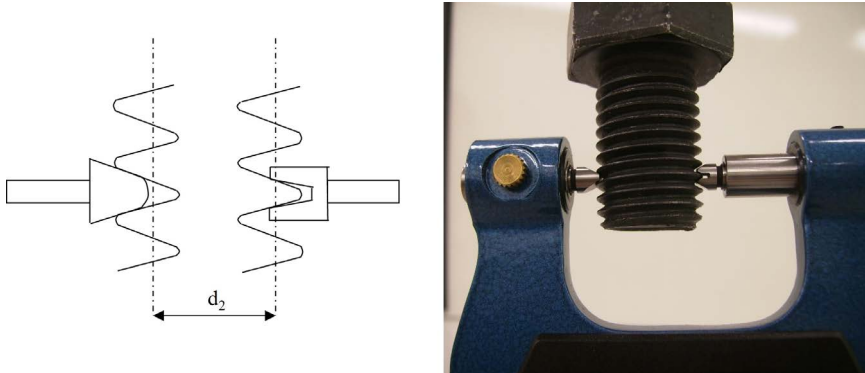


Figura 6. Medición del diámetro de flancos mediante un micrómetro de puntas intercambiables (“micrómetro de puntas”).

Existen juegos de puntas también para otros tipos de rosca (Whitworth 55° y trapecial 30°).

Los palpadores suponen una prolongación de los del micrómetro en los que se alojan por lo que con las puntas puestas deben de ajustarse a cero antes de efectuar la medición correspondiente (figura 7). Dado que en función del diámetro de la rosca a medir es necesario utilizar diversos juegos de puntas, es práctica habitual el ajuste a cero del instrumento. Por ello, este tipo de micrómetros presenta la posibilidad de mover fácilmente el palpador fijo (figura 7).

Este procedimiento puede ser afectado por errores muy importantes: da un error de medición que puede llegar a ser de 0'0025mm en piezas y 0'0015mm en la medición de calibres.

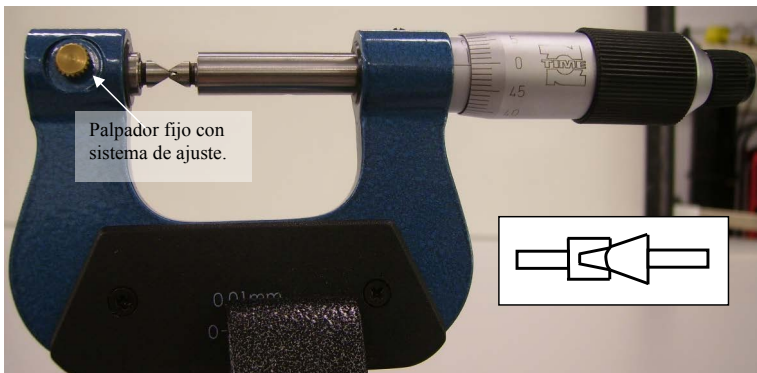


Figura 7. Ajuste previo del instrumento tras la selección de puntas y montaje de las mismas.

3.2. MEDICIÓN DEL DIÁMETRO DE FLANCOS MEDIANTE EL MÉTODO DE LAS TRES VARILLAS O DE LOS TRES ALAMBRES

Es uno de los procedimientos más recomendables y de los más fáciles de aplicar. Se utilizan para ello varillas en juegos de 3 del mismo diámetro y se colocan como indica la figura 8.

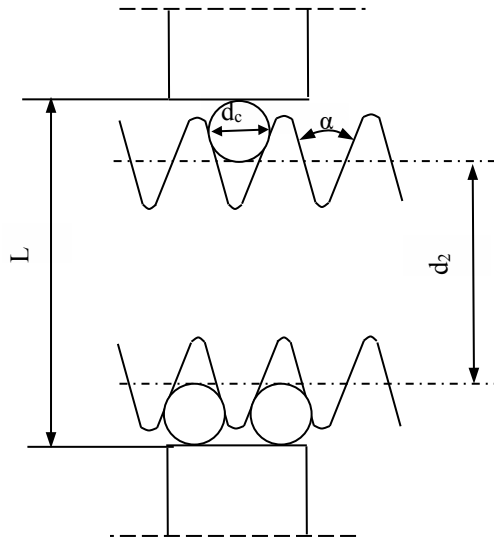


Figura 8. Medición del diámetro de flancos mediante el método de las tres varillas.

La medición de la cota L permite deducir el valor del diámetro a partir de la expresión (5).

$$d_2 = L - d_c \left(1 + \frac{1}{\operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}} \right) + \frac{P}{2} \cdot \operatorname{cotg} \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

Pero en la medición real las varillas se inclinan según la tangente a la hélice en el apoyo de aquéllas en la rosca. Por ello, las circunferencias teóricas de diámetro d_c son en realidad elipses (figura 9).

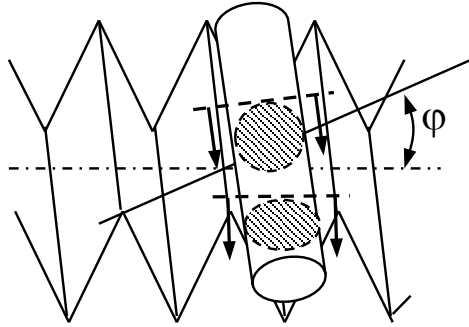


Figura 9. Corrección del diámetro de las varillas de medición como consecuencia de la inclinación por el ángulo de hélice.

La corrección a aplicar a la expresión (5) es C_1 , de valor obtenido a partir de la ecuación (6).

$$C_1 = -\left(\frac{d_c}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \operatorname{cotg} \frac{\alpha}{2}\right) \quad (6)$$

Para minimizar esta corrección se suele tomar un diámetro de varillas d_c de diámetro lo más próximas posibles al del círculo inscrito en el triángulo equilátero generador, ecuación (7). Esto supone emplear un juego de varillas para cada paso.

$$d_c = \frac{p}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{p}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

En la práctica, los diámetros de varillas comerciales no coinciden, en general con el obtenido en la expresión (7) sino que son ligeramente mayores para compensar un posible error de ángulo de la rosca que condujese a que la varilla se introduzca excesivamente sin posibilidad de apoyar en ésta el palpador del instrumento de medición (pie de rey o micrómetro). Una ventaja que presenta este método es que también puede determinarse el diámetro de flancos de otros tipos de rosca, como por ejemplo Whitworth. Los diámetros de varillas comerciales existentes en el mercado se indican en la tabla IV.

Debido al tamaño de las varillas y al método de medición resultaría impracticable su uso si no se facilita el montaje de las mismas. Por ello, las varillas vienen montadas en un soporte que puede alojarse fácilmente en el palpador de un micrómetro de exteriores de dos contactos (figuras 10 y 11).

Diámetro varillas (mm)	Paso rosca ISO (mm)	Whitworth (hilos/pulgada)	Diámetro varillas (mm)	Paso rosca ISO (mm)	Whitworth (hilos/pulgada)
0,17	0,25-0,30	-	1,1	1,75	14
0,22	0,35	-	1,35	2,00	12-11
0,25	0,40	60	1,65	2,50	10-9
0,29	0,45-0,50	-	2,05	3,00-3,50	8-7
0,335	0,60	48-40	2,55	4,00-4,50	6
0,455	0,70-0,75-0,80	-	3,20	5,00-5,50	5-4 ^{1/2}
0,53	0,90	32-28	4	6,00	4-3 ^{1/2}
0,62	1	26-24	5,05	-	3 ^{1/4} -3
0,725	1,25	22-20	6,35	-	2 ^{5/8} -2 ^{1/2}
0,895	1,50	18-16			

Tabla IV. Diámetros disponibles de varillas montadas en soporte para medición del diámetro de flancos.



Figura 10. Diversos tipos de varillas comerciales montadas en soportes para facilitar el montaje en micrómetros.

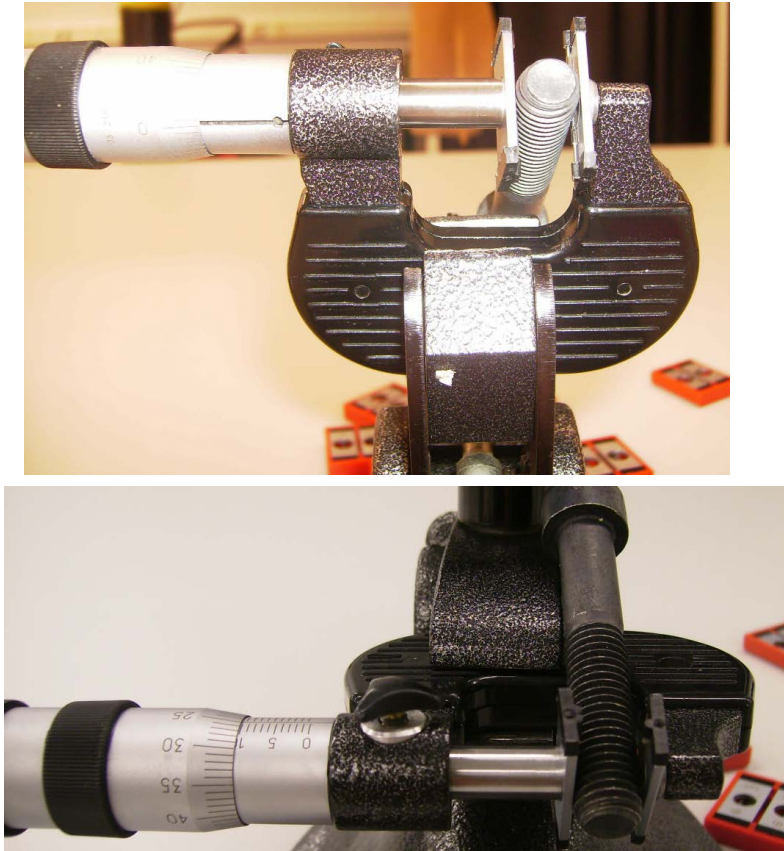


Figura 11. Montaje de varillas en un micrómetro de exteriores para la medición del diámetro de flancos

Es importante destacar que no se requieren operaciones de ajuste previas del instrumento con las varillas montadas. Se trata sólo de determinar L mediante el montaje indicado en la figura 8. A modo de ejemplo, y para intentar aclarar este punto, en la figura 12 se ilustra la medición mediante este procedimiento de un tornillo de métrica 36 con varillas de 2,5 mm de diámetro. Para la medición de L se emplea un pie de rey.

Debido a las deformaciones elásticas de las clavijas, de la pieza y de los palpadores en los puntos de contacto bajo la presión de medida, suele efectuarse la corrección C_2 . Algunos autores consideran los siguientes valores para C_2 :

$C_2 = 2,5$ a $0,6 \mu\text{m}$ para un diámetro de rosca de 4 a 150 mm.

$C_2 = 4$ a $2,5 \mu\text{m}$ para un diámetro de rosca de 1 a 4 mm.

Así, finalmente puede establecerse para d_2 la expresión (5) modificada con C_1 y C_2 , ecuación (8).

$$d_2 = L - d_c \left(1 + \frac{1}{\operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}} \right) + \frac{P}{2} \cot g \frac{\alpha}{2} + C_1 + C_2 \quad (8)$$



Figura 12. Medición del diámetro de flancos de un tornillo M36 mediante varillas y pie de rey.

3.3. MEDICIÓN DEL ÁNGULO DEL PERFIL DE ROSCA MEDIANTE EL MÉTODO DE LAS TRES VARILLAS

La metodología de medición de las tres varillas permite determinar el ángulo α del perfil generador de la rosca. La medición del ángulo de los flancos es insuficiente en sí misma debiendo ir siempre acompañada de la verificación de la simetría del perfil, lo cual permite determinar los errores sobre $\alpha / 2$ (el método no descubre una asimetría de perfil).

La medición del ángulo mediante el procedimiento de las varillas utiliza dos juegos de varillas de diámetros diferentes d_{c1} y d_{c2} y permite deducir el valor de $\alpha/2$ según la ecuación 9.

$$\operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} = \frac{d_{c2} - d_{c1}}{(L_2 - L_1) - (d_{c2} - d_{c1})} \quad (9)$$

Para roscas ISO se recomienda tomar juegos de varillas comprendidas entre los diámetros $d_{c1} = 0'57735P$ y $d_{c2} = 0'9P$. De este modo se garantiza que las varillas se alojen correctamente en el interior del perfil de rosca.

3.4. SELECCIÓN DEL PASO DE ROSCA MEDIANTE PATRONES DE PERFIL

Como se ha visto anteriormente, resulta imprescindible identificar el tipo de rosca y el paso para poder realizar la medición del diámetro de flancos correctamente. Para ello se pueden emplear patrones de perfil como los representados en la figura 13. El uso de estos patrones solo permite identificar la rosca, no medir ni verificar la misma. El método consiste en ir seleccionando el perfil del juego que se adapte mejor a la rosca, observando a contraluz la concordancia entre ambos (figura 14). En el ejemplo se observa una rosca M36 en la que la “galga” de paso ISO 4,5 mm no encaja en el perfil de rosca. En cambio, la correspondiente a un paso de 4,0 mm encaja perfectamente.



Figura 13. Patrones de perfil de rosca.

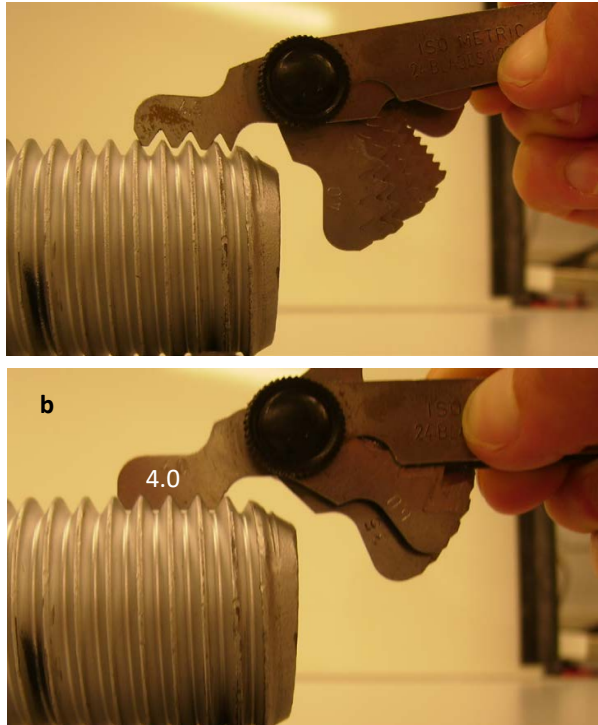


Figura 14. Identificación de una rosca mediante patrones de perfil; a. Patrón de rosca métrica de paso 4,5 mm, que no encaja en la rosca; b. Patrón de rosca métrica de 4,0 mm de paso que encaja y que identifica la rosca como M36.

4. ALGUNAS RECOMENDACIONES PARA AFIANZAR DESTREZAS PRÁCTICAS EN LA MEDICIÓN DE ROSCAS

Se pueden clasificar tornillos en función del tipo de rosca y del paso correspondiente. Fundamentalmente se puede trabajar con rosca Whitworth y Métrica de las series de paso grueso y paso fino. Para ello deben emplear los patrones de perfil para ambos tipos de rosca. Para clasificar los tornillos en Métrica de paso fino o de paso grueso se debe tener en cuenta la concordancia entre pasos y diámetros establecidos según la Norma UNE 17702.

Una vez seleccionado un tornillo de rosca Métrica se debe medir:

- El diámetro exterior: mediante pie de rey, micrómetro, etc...
- El diámetro de flancos mediante micrómetro de puntas intercambiables. Deben realizarse varias mediciones que afecten a distintos filetes de la rosca comparando los resultados obtenidos.

- El paso de la rosca, que puede medirse de forma aproximada considerando la distancia L_p entre un determinado número de filetes (n) obteniendo el paso como $p=L_p/n$ (figura 15).
- El diámetro de flancos mediante el método de las tres varillas. Puede considerarse, en principio, la expresión (5) para la determinación de d_2 , esto es, sin considerar correcciones. Con el valor d_2 y el paso p puede obtenerse el ángulo de hélice ϕ mediante la expresión (1) y la corrección C_1 mediante la expresión (6). La corrección C_2 puede calcularse interpolando linealmente entre los valores indicados en función del diámetro de rosca. Con los valores de C_1 y C_2 puede calcularse de nuevo d_2 conforme a la expresión (7). Se puede volver a calcular C_1 con el nuevo valor de d_2 y calcular éste de nuevo, comprobando que el valor obtenido ya no varía.

La medición mediante este método puede llevarse a cabo considerando diferentes filetes de rosca, comparando los resultados obtenidos (igual que por el método de puntas).

- El ángulo del perfil α mediante el método de las tres varillas. Para ello se recomienda elegir tres juegos de varillas con diámetros d_{c1} , d_{c2} y d_{c3} comprendidos entre $0,57 p$ y $0,9 p$. El cálculo de α se puede efectuar con los pares (d_{c1}, d_{c2}) , (d_{c1}, d_{c3}) y (d_{c2}, d_{c3}) , comparando los resultados obtenidos.
- Finalmente, es conveniente realizar todas las mediciones en un proyector de perfiles y comparar los resultados obtenidos por los diferentes métodos.

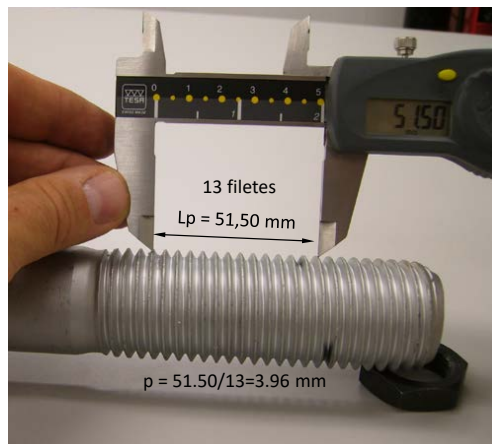


Figura 15. Medición de forma aproximada del paso de la rosca mediante la distancia L_p comprendida entre un número de filetes n .

CAPÍTULO 8

VERIFICACIÓN DE ENGRANAJES

1. Introducción.
 - 1.1. Perfil de evolvente.
 - 1.2. Conceptos fundamentales.
 - 1.3. Relaciones dimensionales.
2. Verificación de engranajes cilíndricos rectos.
 - 2.1. Verificación del perfil del diente.
 - 2.2. Verificación del paso. Verificación de la división angular.
 - 2.3. Verificación de la distorsión de los dientes. Verificación de la rugosidad superficial de los flancos.
 - 2.4. Verificación de la excentricidad.
3. Verificación del espesor del diente.
 - 3.1. Verificación del espesor del diente mediante el pie de rey de dentados.
 - 3.2. Verificación del espesor del diente mediante la medición de la separación entre un número predeterminado de dientes.
 - 3.3. Consideraciones relacionadas con la práctica de la comprobación del espesor del diente.

1. INTRODUCCIÓN

Los engranajes (ruedas dentadas) son elementos mecánicos muy utilizados en la construcción de máquinas para la transmisión de esfuerzos y velocidades entre distintos ejes o entre eje y corredera (cremallera). Si atendemos a la situación relativa de los ejes donde van montados los engranajes se pueden considerar los siguientes tipos (figura 1):

- Ejes paralelos situados en un mismo plano: engranajes cilíndricos; la cremallera es un caso particular de engranaje de radio infinito.
- Ejes que se cortan situados en un mismo plano: engranajes cónicos.
- Ejes que se cruzan perpendicularmente: engranajes de tornillo sin fin.

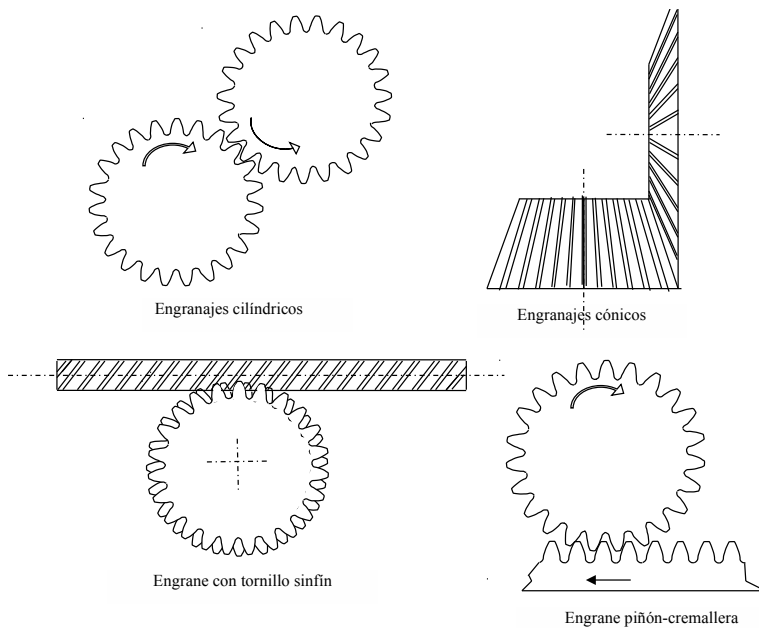


Figura 1. Tipos de engranajes en función de la situación relativa de los ejes de transmisión.

A su vez, en función de la forma de los dientes, se pueden clasificar en engranajes de dientes rectos y de dientes helicoidales (figura 2).

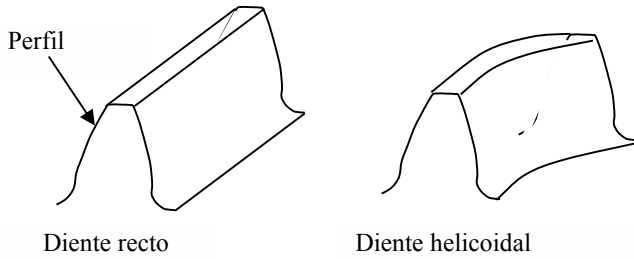


Figura 2. Tipos de dientes en función de la posición relativa de las sucesivas secciones en espesor.

Aunque el perfil de los dientes puede ser generado por diversas curvas como la cicloide, epicicloide, etc., en la práctica sólo se emplean engranajes cuyo perfil es generado por una curva evolvente.

1.1. PERFIL DE EVOLVENTE

El perfil de evolvente puede ser definido como la curva generada por un punto de una recta tangente al círculo base en su movimiento de desarrollo sin deslizamiento (figura 3).

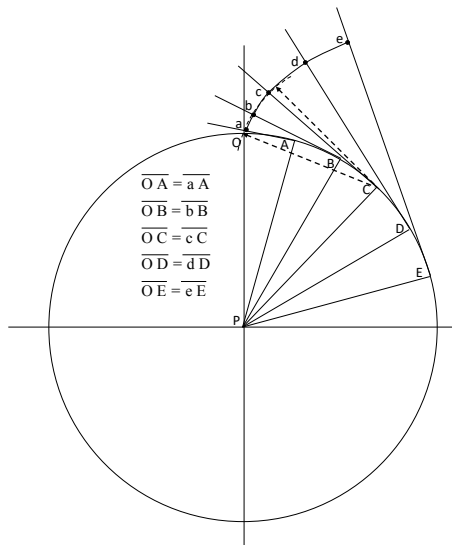


Figura 3. Generación del perfil de evolvente.

1.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Cuando se produce la transmisión entre engranajes, existe siempre contacto entre dos dientes (uno por cada engranaje). El punto de contacto en todo momento se sitúa en una circunferencia, para cada uno de los engranajes, denominada circunferencia primitiva o de paso (figura 4). De este modo, cuando se realizan análisis cinemáticos se modeliza cada engranaje como un disco girando y cuyo diámetro se corresponde con el de paso.

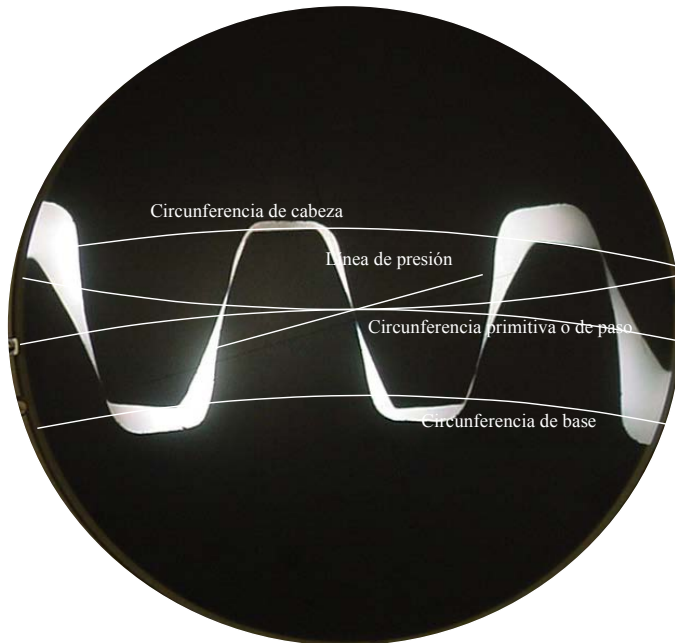


Figura 4. Definición de la circunferencia primitiva y de otros elementos fundamentales.

Otras circunferencias importantes son la circunferencia de cabeza, que viene establecida por la cara truncada de los dos perfiles de evolvente en la parte exterior del engranaje, y la circunferencia de base, desde la que se inicia el perfil de evolvente de los dientes. Dichas circunferencias limitan la altura de cabeza de un diente y el pie del diente (figura 5).

Para facilitar la transmisión, evitando que se produzcan colisiones entre la cabeza del diente de un engranaje con el otro, se mecaniza una cierta holgura dando lugar a la denominada circunferencia de holgura. Por tanto, la circunferencia de base no se encuentra materializada en un engranaje.

La transmisión de fuerzas entre los dientes se realiza en la dirección de la denominada línea de presión. La dirección de la línea de presión viene determinada por el ángulo de presión, que es un parámetro constructivo del engranaje (figura 6). Generalmente dicho ángulo es 20° , aunque en el pasado se ha utilizado algún otro ángulo.

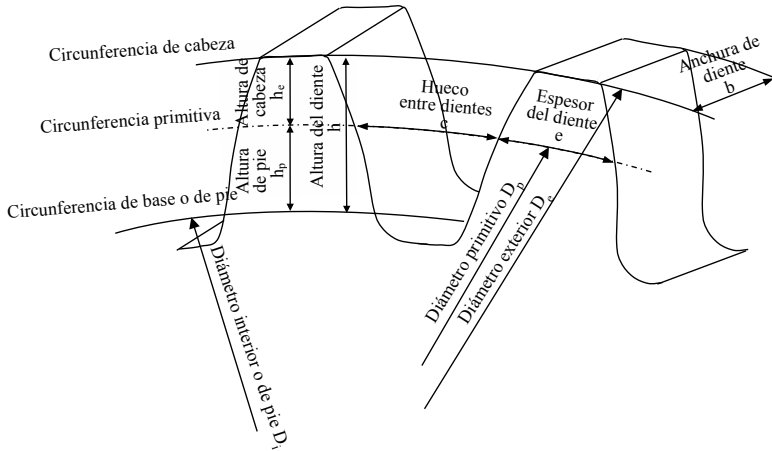


Figura 5. Definición de un elemento dentado.

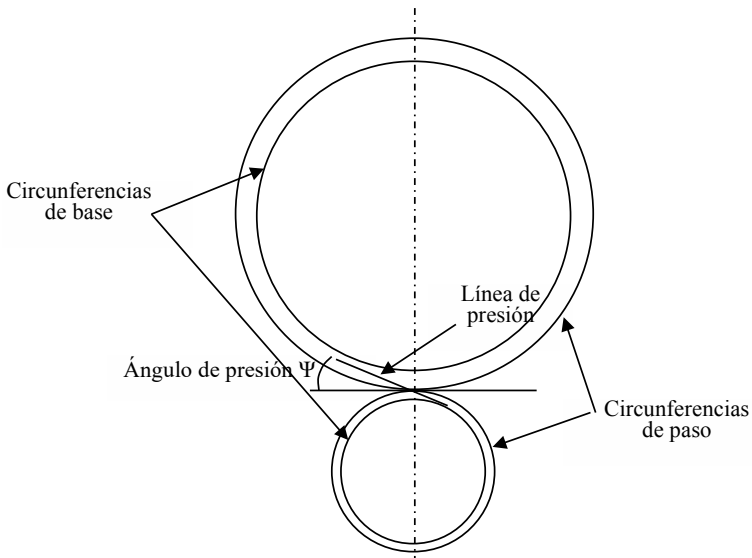


Figura 6. Definición del ángulo de presión de un elemento dentado.

1.3. RELACIONES DIMENSIONALES

El alcance de estos apuntes está limitado a la verificación de engranajes cilíndricos rectos, por lo que sólo se hará mención en lo sucesivo a conceptos propios relacionados con este tipo de engranajes, esto es, no se considera parámetros típicos de los otros tipos tales como ángulo de hélice, por ejemplo.

En los engranajes normalizados se establecen relaciones dimensionales entre los diferentes parámetros definidos en los mismos (figura 5). Dichas relaciones se establecen a continuación. Para facilitar la lectura de las mismas se ha establecido la tabla I con la nomenclatura correspondiente.

Concepto o parámetro dimensional	Notación	Unidades	Relación dimensional
Módulo del engranaje	M	mm	$M = p/\pi = D_e/(Z+2) = D_p/Z$
Número de dientes	Z		
Diámetro interior o de pie	D_i	mm	
Diámetro exterior o de cabeza	D_e	mm	$M = D_e/(Z+2)$
Diámetro primitivo	D_p	mm	$M = D_p/Z$
Altura del diente	h	mm	$h = 2,2 \cdot M$
Altura del pie del diente	h_p	mm	$h_p = 1,2 \cdot M$
Altura de cabeza del diente	h_e	mm	$h_e = M$
Anchura del diente	b	mm	
Paso	p	mm	$M = p/\pi; p = e + c$
Espesor del diente	e	mm	$e = c$
Hueco entre dientes	c	mm	
Ángulo de presión	ψ		20°

Tabla I. Nomenclatura de los parámetros dimensionales de un engranaje y relaciones dimensionales existentes.

La anchura del diente no es un parámetro crítico. Su elección depende del uso que se vaya a dar al engranaje considerándose los valores de referencia establecidos en la tabla II.

b = k M	
Valor de k	Aplicaciones
k = 3 a 5	En espacios reducidos
k = 10 a 12	Empleo normal
k = 12 a 24	Transmisiones de gran precisión

Tabla II. Elección de la anchura del diente en función de la aplicación del engranaje. Adaptada de Asociación Española para el Control de la Calidad. “Consejos para la práctica metrológica 10; engranajes”, Madrid, 1983.

2. VERIFICACIÓN DE ENGRANAJES CILÍNDRICOS RECTOS

Las verificaciones de un engranaje cilíndrico recto más corrientemente practicadas pueden reducirse a las siguientes:

- Verificación del perfil del diente.
- Verificación del espesor del diente.
- Verificación del intervalo entre dientes (paso).
- Verificación de la división angular.
- Verificación de la excentricidad.
- Verificación de la distorsión de los dientes.
- Verificación de la rugosidad superficial de los flancos.

Aunque el objetivo de las prácticas a realizar por los alumnos consiste en la verificación del espesor del diente de diversos elementos dentados (cuyos procedimientos serán indicados en el epígrafe 3), a continuación, se hace una breve referencia a las otras verificaciones enumeradas.

2.1. VERIFICACIÓN DEL PERFIL DEL DIENTE

La verificación del perfil del diente consiste en la determinación de la desviación de éste respecto del perfil teórico deseado (error del perfil). El error se considera positivo cuando hay un exceso de material y negativo cuando hay fallo del material. Desde el punto de vista de funcionamiento es más perjudicial el error positivo ya que éste implica la existencia de perturbaciones, ruidos, desgastes e incluso roturas prematuras en el funcionamiento de los engranajes.

La comprobación de los errores de perfil se efectúa con aparatos basados en el principio de existencia de la evolvente (figura 7). En la figura 7 se muestra esquemáticamente un dispositivo de comprobación de perfiles evolventes: sobre el disco rueda sin desplazamiento la regla tangente TG. Si la punta del palpador se mantuviese fija, al rodar la regla describiría una trayectoria evolvente. Si se apoya

la punta del palpador, libre ahora, sobre la superficie evolvente del flanco de un diente y se hace rodar la regla, el palpador seguirá inmóvil siempre y cuando el perfil del diente coincida con aquella; si, por el contrario, la línea del perfil del diente se separa de la evolvente teórica, el palpador se moverá a lo largo de la línea TG señalando la desviación del perfil.

Es evidente que se obtendría el mismo resultado si se desplazara la regla según la línea TG y simultáneamente girara el dentado sin que existiera deslizamiento entre ambos. Los instrumentos de verificación se basan en este hecho.

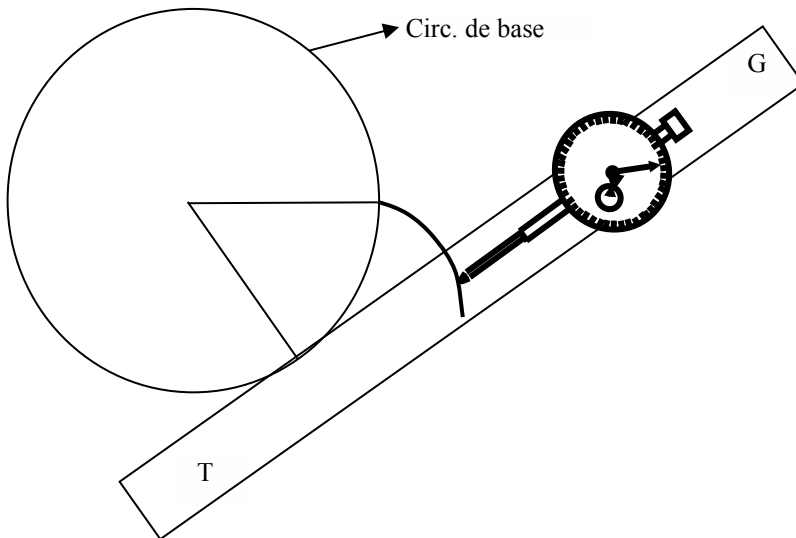


Figura 7. Fundamento de la instrumentación empleada para la verificación del perfil de los dientes de un engranaje (adaptado de Estévez, S.; Sanz, P., *La medición en el taller mecánico*; Ediciones CEAC, Barcelona, 1977).

2.2. VERIFICACIÓN DEL PASO. VERIFICACIÓN DE LA DIVISIÓN ANGULAR

Para que el funcionamiento de un elemento dentado sea correcto, los perfiles activos de los dientes deben hallarse equidistantemente repartidos sobre circunferencia y recta primitiva, por ello resulta interesante la verificación del paso diente a diente.

La medición o comprobación del paso puede efectuarse por diversos procedimientos, bien sea midiendo el paso circular, el paso base o el ángulo de giro correspondiente al paso. Para ello existen diversos dispositivos.

2.3. VERIFICACIÓN DE LA DISTORSIÓN DE LOS DIENTES. VERIFICACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE LOS FLANCOS

Se dice que existe distorsión en un dentado cuando las generatrices de los flancos no siguen la dirección correcta. La medición de la distorsión del diente es un defecto grave en los engranajes de contacto lineal, ya que da lugar a que el contacto no se efectúe en toda la longitud del diente, sino en unos puntos determinados dando lugar a concentración de esfuerzos con posibilidad de desgaste y rotura prematuros. La medición de la distorsión puede efectuarse en un banco “entre puntos” con la rueda a verificar montada en el eje del aparato y un comparador dispuesto de forma que palpe los dientes normalmente al flanco y en las proximidades de la generatriz primitiva.

La rugosidad superficial se ha de realizar mediante un rugosímetro, dispuestos el flanco del diente y el aparato de medición de manera adecuada.

2.4. VERIFICACIÓN DE LA EXCENTRICIDAD

La excentricidad de un engranaje es la desviación entre el eje de rotación y el eje del círculo primitivo de su dentado. Los sistemas de verificación de la excentricidad son varios, y dado que sus resultados están influenciados simultáneamente por las condiciones del paso, espesor del diente y del perfil, son con frecuencia empleados como medios de verificación globales de la calidad del dentado en las fabricaciones en que no se exigen condiciones muy elevadas de precisión.

Un método de verificación corrientemente utilizado consiste en utilizar un cilindro palpador y comparador, este procedimiento se muestra en la figura 8. Un rodillo cilíndrico rectificado apoyándose en los flancos de los dientes en la proximidad del radio primitivo, se introduce sucesivamente en los intervalos del engranaje, girando la rueda a controlar alrededor de un eje fijo, sobre el que está perfectamente centrada. La evaluación de las desviaciones detectadas se debe hacer conforme a la metodología correspondiente a la verificación de formas cilíndricas de revolución.

3. VERIFICACIÓN DEL ESPESOR DEL DIENTE

En una transmisión por engranajes, los dientes de una rueda deben encajar en los huecos de la que engrana con ella. De ahí que el espesor del diente y el hueco entre dientes deban hallarse en una relación determinada. Para engranajes normales el espesor y el hueco coinciden teóricamente. En la práctica, se prevé cierto juego en el engranaje, por lo que el espesor se fija en un valor ligeramente menor que el del hueco, pero en cualquier caso se cumple (1):

$$e + c = \pi \cdot M \quad (1)$$

La medición del espesor del diente (o del hueco) presenta la dificultad de que la circunferencia primitiva (en la que está definido) no está materializada en el engranaje, por lo que hay que recurrir a relaciones geométricas teóricas. Corrientemente se emplean dos procedimientos para la verificación del espesor del diente que se establecen a continuación.

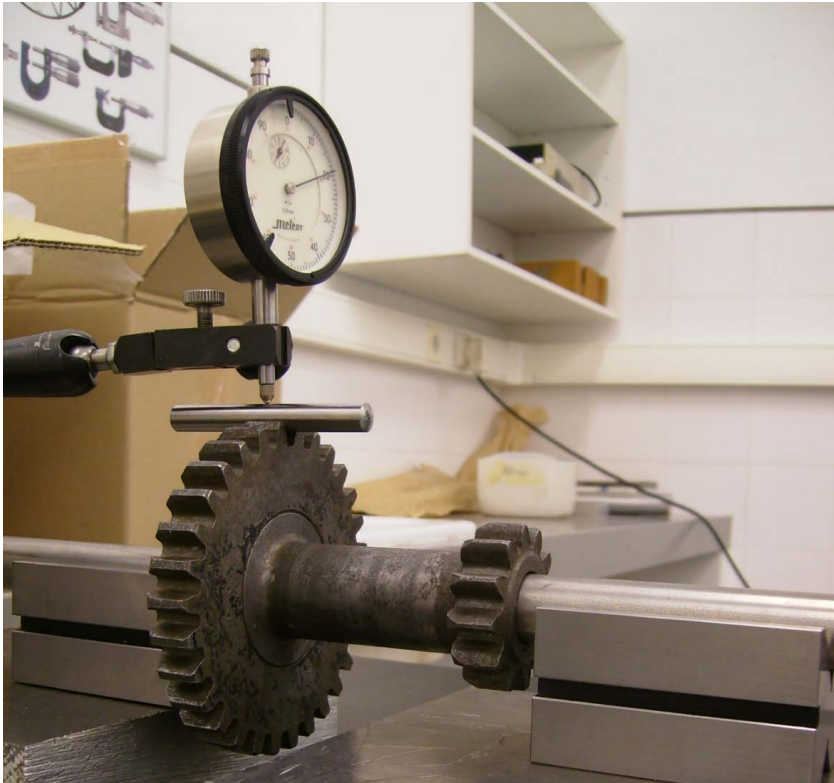


Figura 8. Verificación de la excentricidad de un engranaje.

3.1. VERIFICACIÓN DEL ESPESOR DEL DIENTE MEDIANTE EL PIE DE REY DE DENTADOS

El procedimiento de verificación considera la medición de la cuerda o espesor cordal en la circunferencia primitiva. Se calcula la flecha existente desde la cabeza o parte exterior del diente hasta la sección en la que se mide la cuerda (figura 9).

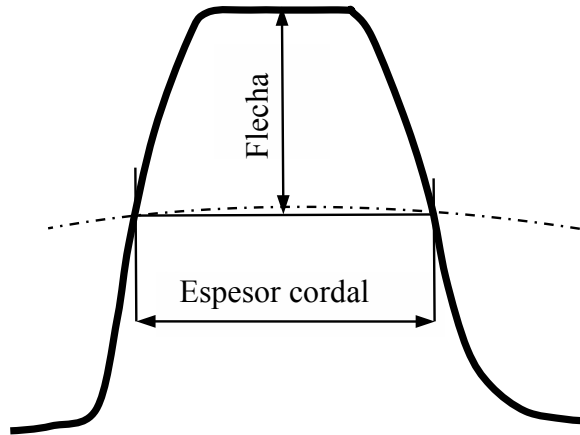


Figura 9. Definición del espesor cordal y de la flecha de un diente referidos a la circunferencia primitiva.

Para la verificación se emplea el pie de rey de dentados que, en realidad, es un instrumento que permite medir simultáneamente dos longitudes perpendiculares (figura 10). Las mediciones se hacen a partir del cilindro de cabeza y, en consecuencia, están afectadas por las irregularidades o desgaste que presente. Este procedimiento está lleno de errores sistemáticos de tal magnitud que sólo puede emplearse para engranajes que forman parte de mecanismos bastos.

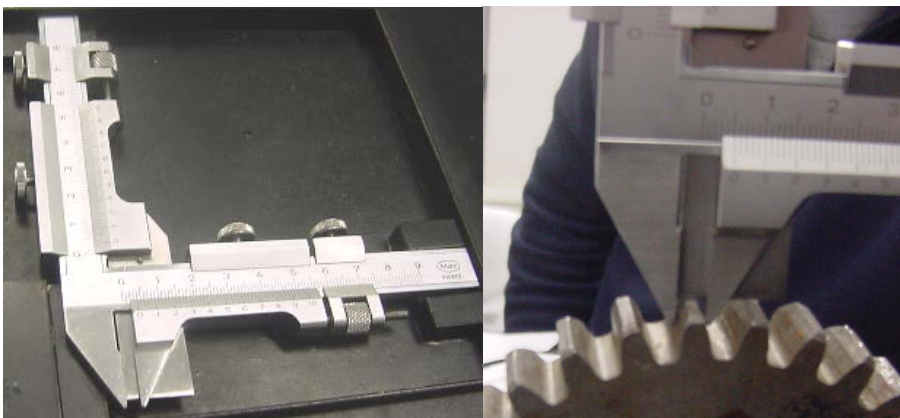


Figura 10. Pie de rey de dentados. Verificación del espesor cordal.

Para realizar la medición, fijamos con una de las reglas del pie de rey el valor de la flecha y con la otra regla medimos el valor correspondiente al espesor cordal.

Los valores de cuerda y flecha teóricos correspondientes se obtienen mediante las expresiones (2) y (3).

$$\text{flecha} = M \cdot \left[1 + \frac{Z}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{2Z} \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{cuerda} = M \cdot Z \cdot \sin \frac{\pi}{2Z} \quad (3)$$

Para la obtención de los valores de flecha y cuerda se ha de considerar que el ángulo ha de procesarse en radianes, por lo que se ha de tener en cuenta este extremo en la selección del modo de cálculo presente en el empleo de la calculadora o del ordenador.

3.2. VERIFICACIÓN DEL ESPESOR DEL DIENTE MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LA SEPARACIÓN ENTRE UN NÚMERO PREDETERMINADO DE DIENTES

El procedimiento descrito anteriormente presenta el inconveniente de que no es recomendable para verificar engranajes con dientes de pequeño tamaño en los que la aplicación del método resulta complicada de ejecutar. En estos casos resulta más indicado medir la separación W existente entre un cierto número de dientes. Para ello se puede emplear cualquier tipo de pie de rey o de micrómetro de exteriores. No obstante, frecuentemente se utiliza un micrómetro con contactos en forma de disco o platillos (micrómetro de platillos) ya que este tipo de palpadores favorecen el apoyo del instrumento sobre los flancos de los dientes del engranaje (figura 11).

El valor teórico de la separación W existente entre J dientes viene dado por la expresión (4).

$$W = M \cdot \cos \psi \cdot \left[(J-1) \pi + \frac{e}{M} + Z \cdot \text{Ev } \psi \right] \quad (4)$$

En dicha expresión $\text{Ev } \psi$ representa la función evolvente aplicada al ángulo de presión, esto es 20° . La evolvente de un determinado ángulo ψ expresado en radianes, se obtiene a partir de la expresión (5).

$$\text{Ev } \psi = \text{tg } \psi - \psi \quad (5)$$

Recordamos que para engranajes normales se cumple que el espesor del diente, e , tiene un valor aproximado de 1,57 veces el módulo, conforme a la expresión (6).

$$e = \frac{\pi \cdot M}{2} \quad (6)$$

Finalmente, la expresión (4) se puede expresar tal como se indica en la expresión (7).

$$W = M \cdot \cos\psi \left[\left(J - \frac{1}{2} \right) \cdot \pi + Z \cdot \text{Ev} \psi \right] \quad (7)$$

El número de dientes J que deben ser abarcados para considerar W varía en función del número de dientes Z del engranaje (tabla III). En la tabla III se expresa el número de dientes J que racionalizan mejor el procedimiento de verificación en función de Z . En la tabla también se indica el valor de W evaluado conforme a la expresión (7), considerando un módulo de valor unidad. Para otros módulos basta multiplicar los valores de la tabla III por el valor M correspondiente.

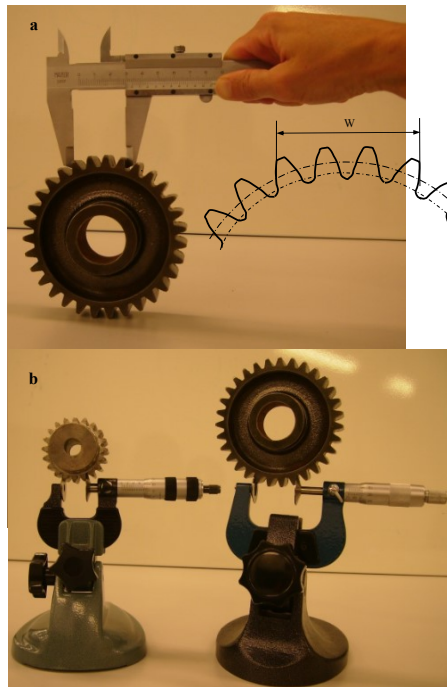


Figura 11. Medición de la distancia, W , que incluye a un determinado número de dientes, J . a.- Mediante pie de rey. b.- Mediante micrómetros de platillos.

Z	J	W (mm)	Z	J	W (mm)	Z	J	W (mm)
5	2	4,498224849	19	3	7,646433836	33	4	10,79464282
6	2	4,512230388	20	3	7,660439376	34	4	10,80864836
7	2	4,526235928	21	3	7,674444916	35	4	10,8226539
8	2	4,540241467	22	3	7,688450455	36	4	10,83665944
9	2	4,554247007	23	3	7,702455995	37	5	13,80279642
10	2	4,568252547	24	3	7,716461534	38	5	13,81680196
11	2	4,582258086	25	3	7,730467074	39	5	13,8308075
12	2	4,596263626	26	3	7,744472613	40	5	13,84481304
13	2	4,610269165	27	3	7,758478153	41	5	13,85881857
14	2	4,624274705	28	4	10,72461513	42	5	13,87282411
15	2	4,638280244	29	4	10,73862067	43	5	13,88682965
6	2	4,652285784	30	4	10,75262621	44	5	13,90083519
17	2	4,666291323	31	4	10,76663175	45	5	13,91484073
18	2	4,680296863	32	4	10,78063728	46	6	16,88097771

Tabla III. Valor W (mm) correspondiente a la separación entre J dientes para engranajes con un número total de dientes Z (ángulo de presión $\Psi = 20^\circ$).

3.3. CONSIDERACIONES RELACIONADAS CON LA PRÁCTICA DE LA COMPROBACIÓN DEL ESPESOR DEL DIENTE

Para lograr un adecuado conocimiento de las dos metodologías aquí indicadas, conviene que se realice la verificación del espesor del diente de un mismo engranaje con los dos métodos comparando los resultados obtenidos. De manera previa a ambas verificaciones deben obtenerse todos los valores teóricos de los parámetros geométricos que definen al dentado, fundamentalmente el diámetro primitivo y el módulo del engranaje. Se parte del dato constructivo de que el ángulo de presión es 20° y que se trata de engranajes normales o normalizados.

Debe tenerse en cuenta que los módulos de los engranajes suelen tener valores establecidos en intervalos de 0,25, de modo que es habitual encontrar en el mercado series con esa cadencia de módulo: 1 1,25 1,50 1,75 2 2,25 2,50 2,75 3...

Cuando se verifica un engranaje usado, normalmente presenta cierto desgaste (por rozamiento, pérdida de material por corrosión...) y como consecuencia de ello el módulo obtenido puede estar comprendido entre dos valores normalizados. Efectivamente esto es así porque la obtención del módulo la estamos basando en la medición del diámetro exterior o de cabeza del dentado, que puede haber cambiado respecto a su estado inicial (nuevo). Esta circunstancia debe tenerse

en cuenta al obtener el espesor cordal o la separación entre dientes valorando su influencia en el parámetro determinado.

La medición del espesor cordal mediante el pie de rey de dentados debe llevarse a cabo en diferentes dientes comparando los resultados obtenidos. Como la medición se basa en la flecha tomada desde la cabeza del diente, el contraste de las diferentes medidas obtenidas puede poner de manifiesto la presencia o no de un desgaste no uniforme en el engranaje.

La medición de la separación entre J dientes debe hacerse tomando diferentes grupos de dientes (figura 12), comparando los resultados obtenidos. Así mismo, se debe obtener W considerando diferente número de dientes (no solo el J recomendado) tal y como se indica en la figura 13. De este modo se tendrá una mejor concepción de que el número de dientes recomendado para esta verificación (función del total Z) suele ser el que permite un mejor apoyo en los flancos del dentado para la medición de la separación.

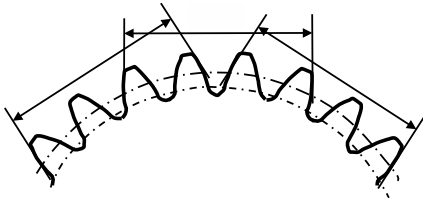


Figura 12. Medición de la separación de J dientes variando los dientes involucrados.

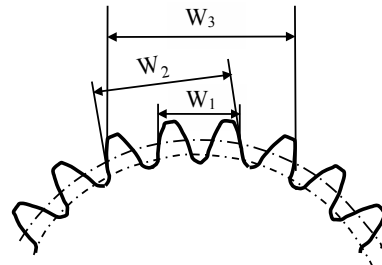


Figura 13. Medición de la separación entre dientes variando el número J de dientes considerados.

CAPÍTULO 9

METROLOGÍA DE ÁNGULOS: INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN DIRECTA E INDIRECTA DE ÁNGULOS

1. Introducción.
2. Comprobación de la sensibilidad aparente de un nivel.
3. Medición directa de ángulos.
4. Medición de ángulos de forma indirecta.
 - 4.1. Medición de un cono exterior.
 - 4.2. Medición de un cono interior.
 - 4.3. Materialización de ángulos.
 - 4.4. Consideraciones acerca de la evaluación de la incertidumbre en la medición de un ángulo de forma indirecta.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de ángulos se puede realizar de forma directa y de forma indirecta. En el presente capítulo se describen algunos de los montajes y mediciones que suelen ser habituales en la práctica de laboratorio y/o que permiten comprender determinados conceptos metrológicos.

2. COMPROBACIÓN DE LA SENSIBILIDAD APARENTE DE UN NIVEL

Para esta comprobación se requiere de una superficie de referencia. Para ello se debe utilizar una mesa de planitud nivelada. Por tanto, debe comprobarse que la mesa está nivelada colocando un nivel en diferentes direcciones de la misma. Si la mesa no se encuentra nivelada se procederá a la nivelación de la misma conforme a lo descrito en el capítulo 6.

El procedimiento que se propone para comprobar la sensibilidad de un nivel consiste en crear un desnivel mediante regla de senos de modo que permita contrastar el desnivel creado con el desplazamiento correspondiente de la burbuja de aire en el indicador (figura 1).

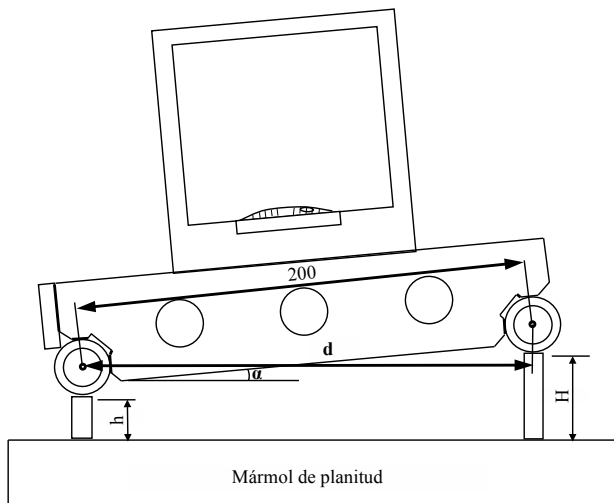


Figura 1. Medición del desnivel mediante una regla de senos.

Por ejemplo, si la sensibilidad aparente de un nivel es 0,05mm/m, significa que en 200mm, que es la longitud de la regla de senos, el desplazamiento de la burbuja de una división corresponde a un desnivel H-h de 0,01mm. Realmente el desnivel debe ser considerado para la distancia horizontal d entre los apoyos de la regla de senos (figura 1), pero estamos considerando una aproximación con la hipotenusa del triángulo al ser el ángulo formado α correspondiente muy pequeño.

Hay que observar que la diferencia entre los bloques patrón necesarios es muy pequeña (0,01mm). Si se aumenta la diferencia a 0,03 mm por ejemplo, debe observarse que el número de divisiones que se desplaza la burbuja es proporcional a esta distancia, esto es, 3 divisiones.

3. MEDICIÓN DIRECTA DE ÁNGULOS

Se propone el manejo de los transportadores de ángulos como instrumentos de medición directa. Para ello, se deben realizar diversos montajes con bloques patrón de ángulo comprobando los ángulos formados. Se deben alternar mediciones con transportadores de lectura digital y con nonius con el fin de afianzar el conocimiento de este último sistema de lectura.

4. MEDICIÓN DE ÁNGULOS DE FORMA INDIRECTA

La medición indirecta de ángulos es muy utilizada en metrología dimensional por el hecho de que aquéllos pueden ser determinados a partir de medidas de longitud. En este sentido es muy frecuente el empleo de varillas y bolas de diámetros conocidos. A continuación, se proponen diversos montajes para ser realizados en el laboratorio o taller. Se recomienda en todos los casos comprobar los ángulos medidos de forma indirecta mediante medición directa (empleo de transportador de ángulos o materialización del mismo ángulo mediante regla de senos).

4.1. MEDICIÓN DE UN CONO EXTERIOR

Se propone realizar dos montajes como los representados en la figura 2, empleando varillas calibradas de diámetro d, apoyadas en bloques patrón longitudinales de longitudes h_1 y h_2 respectivamente. Mediante un instrumento de medición de longitudes (pie de rey, por ejemplo) se realizan las mediciones de L_1 y L_2 . El valor del ángulo α del cono se obtiene a partir de la expresión (1).

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \frac{L_2 - L_1}{(h_2 - h_1)} \quad (1)$$

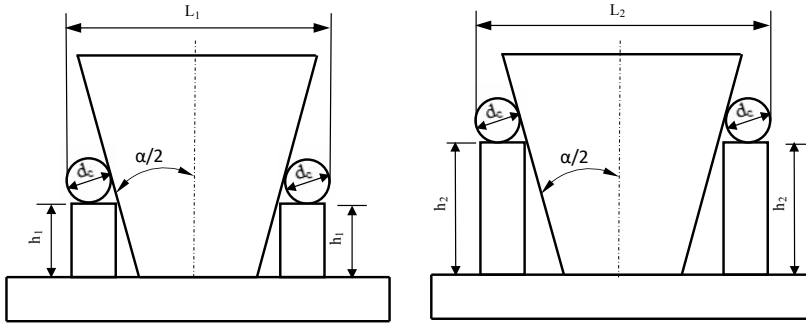


Figura 2. Medición del ángulo de un cono exterior mediante el empleo de varillas calibradas y bloques patrón longitudinales.

Para mejorar la destreza en este tipo de mediciones se recomienda realizar tres montajes diferentes (figura 3), obteniendo a partir de la ecuación (1) el valor correspondiente a α combinando los valores de L_i medidos dos a dos. De este modo se obtienen tres valores para α que pueden promediarse para expresar el resultado.

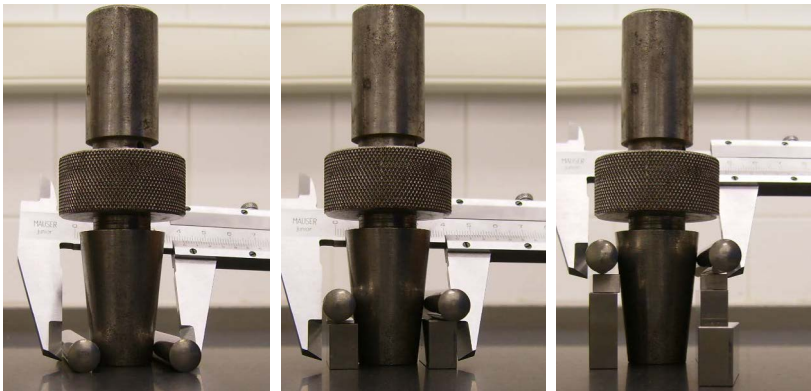


Figura 3. Montajes diferentes para la medición del ángulo de un cono exterior.

Otra posibilidad de obtener α es mediante montajes con varillas de distintos diámetros, tal y como se indica en la figura 4, y según la expresión (2).

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\frac{1}{2}(L_2 - L_1)^2 - (L_2 - L_1)(d_2 - d_1)}{(L_2 - L_1)(d_2 - d_1) - (d_2 - d_1)^2} \quad (2)$$

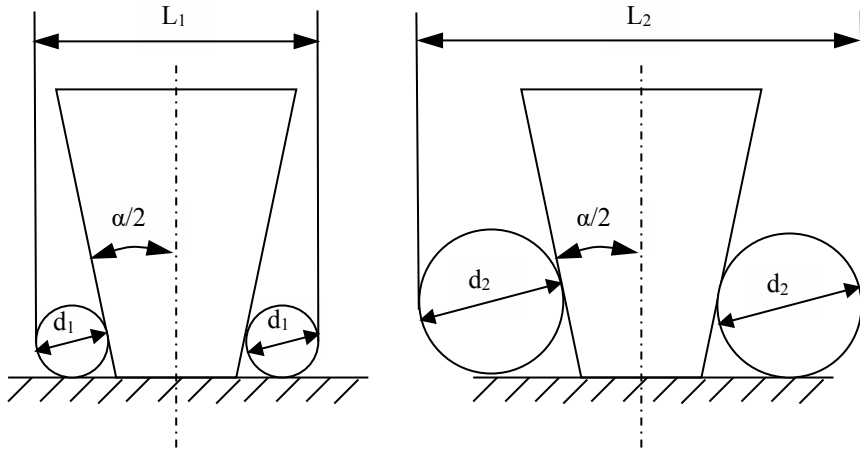


Figura 4. Medición de un cono exterior mediante varillas de diámetros diferentes.

4.2. MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE UN CONO INTERIOR

De modo similar a lo indicado anteriormente para un cono exterior, se puede obtener de forma indirecta el ángulo de un cono interior a partir de la expresión (3) mediante sendos montajes con bolas introducidas en el interior del cono (figura 5).

$$\operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{d_1 - d_2}{2(L_2 - L_1) - (d_1 - d_2)} \quad (3)$$

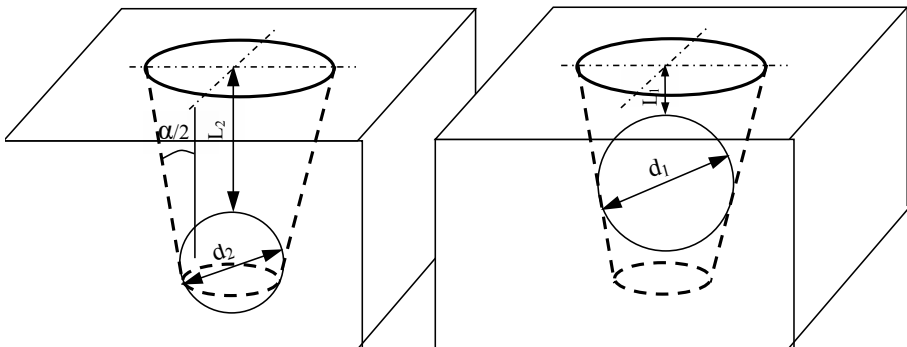


Figura 5. Medición indirecta de un cono interior mediante empleo de bolas calibradas.

Un ejemplo de aplicación en el laboratorio puede consistir en la medición del ángulo de soportes en V disponibles mediante el empleo de varillas calibradas conforme a lo establecido en la figura 6 y en la expresión 4.

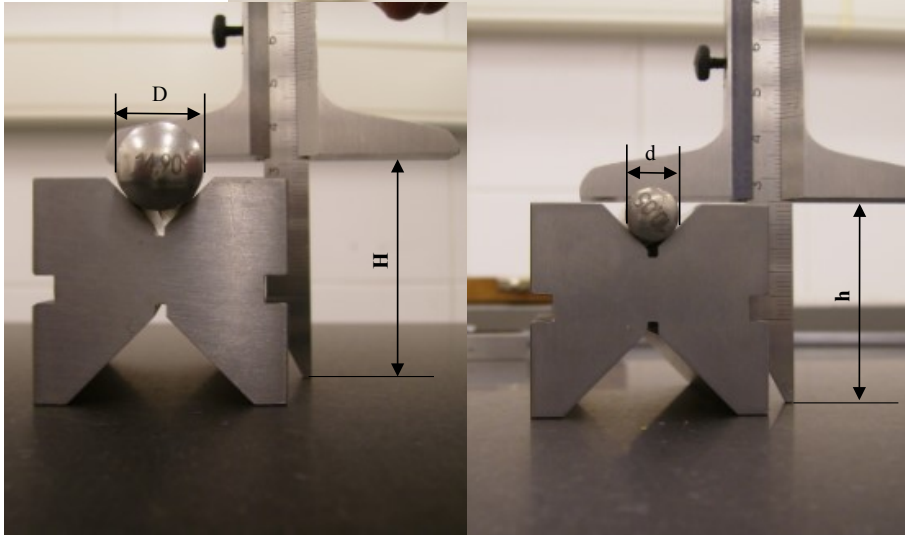


Figura 6. Medición indirecta del ángulo de un soporte en V.

$$\operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{D - d}{2(H - h) - (D - d)} \quad (4)$$

4.3. MATERIALIZACIÓN DE ÁNGULOS

Ya se ha explicado el uso de la regla de senos para la materialización de ángulos. Existen otros modos de materializar ángulos mediante el empleo de bloques patrón y varillas calibradas, que pueden ser comprobados mediante bloques patrón de ángulo, transportador de ángulos, etc. En la figura 7 se puede observar la formación de un ángulo, cuyo valor puede obtenerse a partir de la expresión (5).

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{d_1 - d_2}{2L + d_1 + d_2} \quad (5)$$

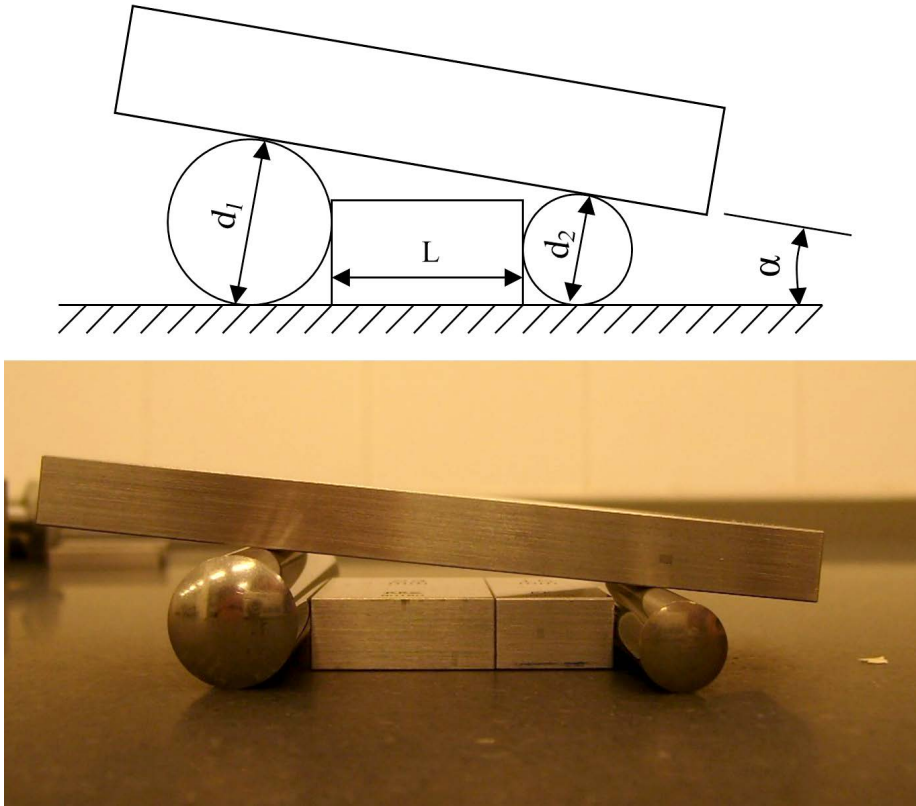


Figura 7. Materialización de un ángulo mediante varillas calibradas y bloques patrón.

4.4. CONSIDERACIONES ACERCA DE LA EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE UN ÁNGULO DE FORMA INDIRECTA

Para la evaluación de la incertidumbre asociada a un ángulo medido de forma indirecta se debe aplicar la ley de propagación de varianzas a la expresión en la que se obtiene el valor del ángulo y en la que intervendrán las incertidumbres correspondientes a los diferentes elementos metrológicos empleados (varillas, bolas, bloques patrón...). No obstante, se puede dar la circunstancia, tal y como ocurre en la expresión (1), que no aparezca en la definición del ángulo ninguna dimensión relativa a alguno de los elementos que intervienen en su medición; en particular, la expresión (1) no depende del diámetro de las varillas empleadas.

No obstante, parece lógico pensar que una mejor o peor ejecución en el diámetro de las varillas, su redondez, cilindricidad, etc., deben influir en la incertidumbre

del ángulo medido. En efecto, la definición de las varillas influye en la repetibilidad de las mediciones efectuadas sobre L_1 y L_2 . La mayor o menor inestabilidad en el montaje efectuado puede influir también sobre estas mediciones. Por todo ello, se propone que cuando se realice alguno de estos montajes se haga la siguiente comprobación: medir 10 veces una determinada dimensión (por ejemplo L_1 en el montaje de la figura 2) calculando la repetibilidad en dicha medición mediante la desviación típica correspondiente a las lecturas efectuadas. A continuación, con el mismo instrumento se debe medir un bloque patrón longitudinal de un valor nominal similar a la dimensión citada (L_1 , en su caso) otras 10 veces comprobando que la repetibilidad de la medición en este caso debe ser menor. De este modo, se puede establecer cualitativamente el grado de influencia de las varillas empleadas en la construcción de la dimensión considerada; también permite obtener comparativamente la influencia de distintas varillas en el montaje.

CAPÍTULO 10

VERIFICACIÓN DE FORMAS EN PIEZAS CILÍNDRICAS

1. Introducción.
2. Método general de verificación de formas cilíndricas.
3. Definición de tolerancias de formas cilíndricas.
4. Verificación de la redondez.
5. Verificación de la cilindridad.

1. INTRODUCCIÓN

La verificación de dimensiones no siempre es suficiente para garantizar la funcionalidad de una pieza o parte dentro de un conjunto. Por ejemplo una pieza cilíndrica puede tener el diámetro establecido, pero su eje de giro presentar una desviación respecto del que teóricamente debe girar la pieza. Por ese motivo se definen tolerancias de formas, si así se requiere. En el caso de piezas cilíndricas, los defectos de formas que suelen presentarse son:

- Ovalización, o falta de redondez en una sección (figura 1). Existen ovalizaciones que no pueden detectarse siquiera por la medición de distintos diámetros ya que en ocasiones, aunque no se mantenga el radio sí lo hacen los diámetros.
- Excentricidad, o eje de giro diferente al eje de los centros (figura 2). Aparecen como consecuencia de operaciones de torneado en las que el torno posee un punto excéntrico.
- Falta de coaxialidad, cuando diferentes cilindros mecanizados en un mismo montaje poseen ejes de giro diferentes (figura 3).
- Falta de rectitud de las generatrices, debido a problemas diferentes en el mecanizado (figura 4).
- Falta de perpendicularidad de una cara, supuesta plana, con relación al eje de giro (figura 5). A veces la cara no perpendicular tiene simetría axial.

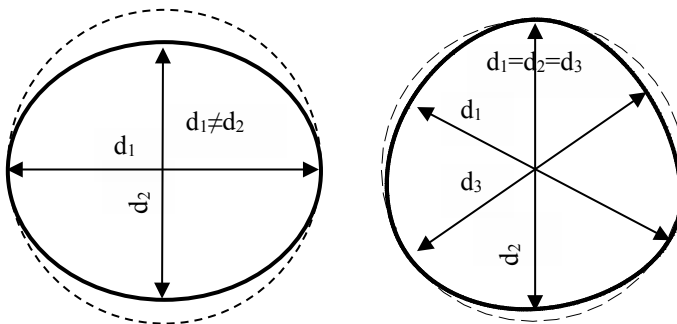


Figura 1. Defecto de redondez; en ocasiones el defecto no se detecta por medición de distintos diámetros

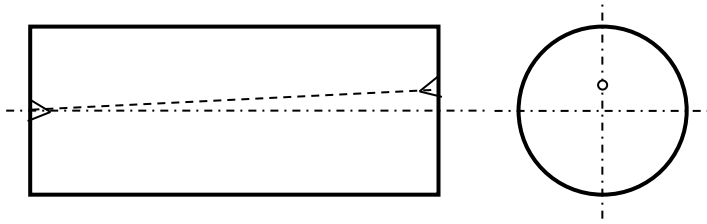


Figura 2. Defecto de excentricidad

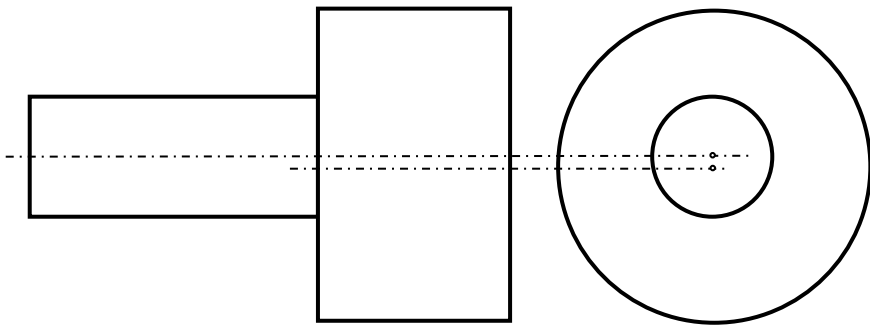


Figura 3. Falta de coaxialidad entre cilindros mecanizados en la misma piezas o dispuestos en un mismo montaje.

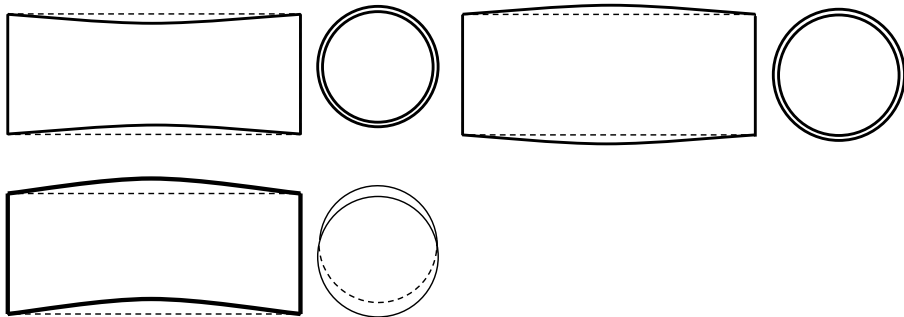


Figura 4. Defectos típicos de falta de rectitud de las generatrices en piezas cilíndricas de revolución (falta de cilindridad).

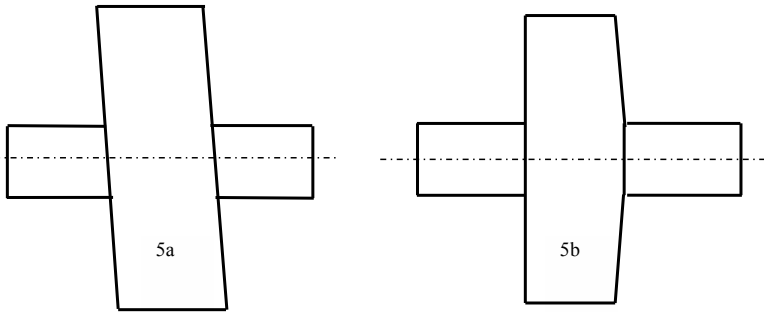


Figura 5. Falta de perpendicularidad de una cara respecto del eje de giro de la pieza.

2. MÉTODO GENERAL DE VERIFICACIÓN DE FORMAS CILÍNDRICAS

La verificación de formas cilíndricas se realiza mediante la comparación de cotas relativas al tipo de verificación que se quiera realizar de acuerdo con la defectología indicada en el epígrafe anterior.

Existen modernos bancos de verificación (figura 6) que disponen de un elemento de un amarre para el alojamiento de la pieza, así como de un palpador que se comunica con una unidad de control. El palpador dispone de movimiento en el sentido del eje de revolución para poder recorrer la pieza. También se puede disponer el palpador de forma que puedan verificarse caras perpendiculares al eje de giro.

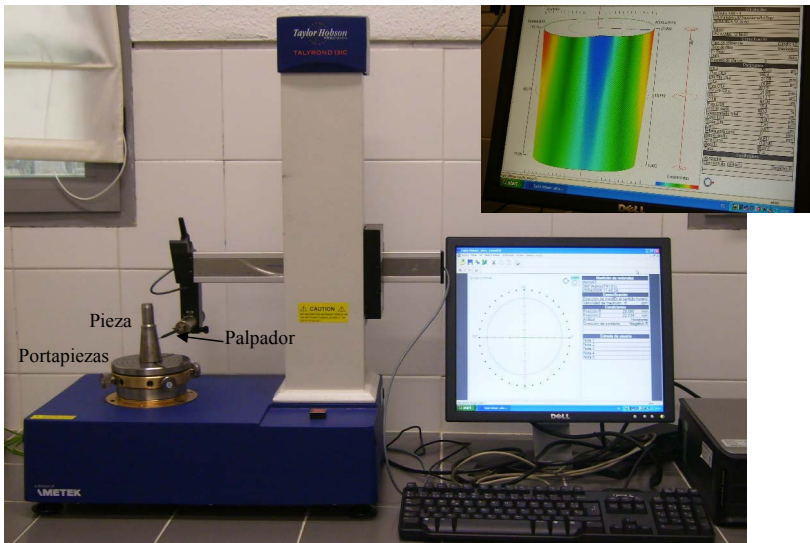


Figura 6. Banco para la verificación de formas de revolución.

En una versión más sencilla, existen bancos que permiten sólo el giro de las piezas, cuya verificación requiere, además, del empleo de comparadores dispuestos en soportes articulados que facilitan la correcta posición del comparador en el espacio. También es posible realizar el apoyo de las piezas a verificar mediante soportes en V con la suficiente calidad metrológica (figura 7).

El esquema general para las distintas verificaciones a efectuar responde a lo indicado en la figura 7. La falta de redondez se mide mediante el giro de la pieza en los soportes o banco, obteniendo la diferencia de cotas en radios diferentes de una determinada sección. En este sentido, conforme menor sea el ángulo de los soportes en V más sensible es el procedimiento ya que la falta de redondez se manifiesta mejor en ángulos pequeños. El empleo de soportes en V requiere que las secciones de apoyo de la pieza en ellos no presenten defectos de redondez con el fin de no variar la posición del eje de giro de la misma, en operaciones de verificación en las que se necesite girar la pieza. Por ello, se suele preferir la verificación sujetando en un banco en el que el eje de giro permanezca invariable en su posición.

La verificación de perpendicularidad responde al esquema indicado en la figura 8. Se suele requerir un desplazamiento radial del comparador con el fin de detectar falta de perpendicularidad en una cara, aunque las circunferencias sobre dicha cara tengan la mismas cotas horizontales (figura 5b).

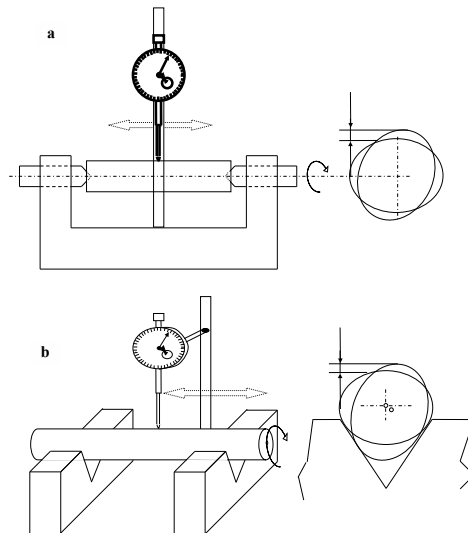


Figura 7. Sistemas de verificación de formas cilíndricas. a.- Mediante empleo de banco de centrado y reloj comparador. b.- Mediante soportes de apoyo en V y reloj comparador.

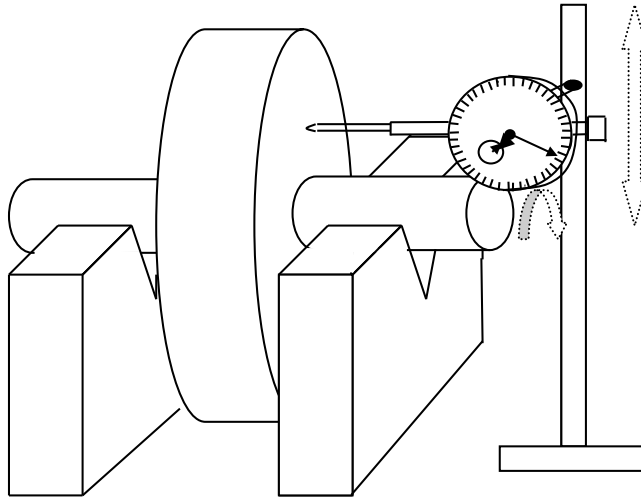


Figura 8. Verificación de la perpendicularidad.

3. DEFINICIÓN DE TOLERANCIAS DE FORMAS CILÍNDRICAS

La definición de tolerancias de forma relativas a piezas de revolución puede consultarse en la Norma UNE 1-121-75. La definición de tolerancia t se resume del siguiente modo (figura 9):

- Tolerancia de redondez: la zona de tolerancia en el plano considerado está limitada por dos círculos concéntricos separados entre sí una distancia t .
- Tolerancia de cilindricidad: la zona de tolerancia está limitada por dos cilindros coaxiales cuya diferencia entre los dos radios es t .
- Tolerancia de coaxialidad: la zona de tolerancia está limitada por un cilindro de diámetro t cuyo eje coincide con el eje de referencia.
- Tolerancia de perpendicularidad: la zona de tolerancia está limitada por dos planos paralelos separados entre sí una distancia t y perpendiculares al eje de referencia.

A continuación, se expone de manera detallada el procedimiento de verificación de la redondez y de la cilindricidad.

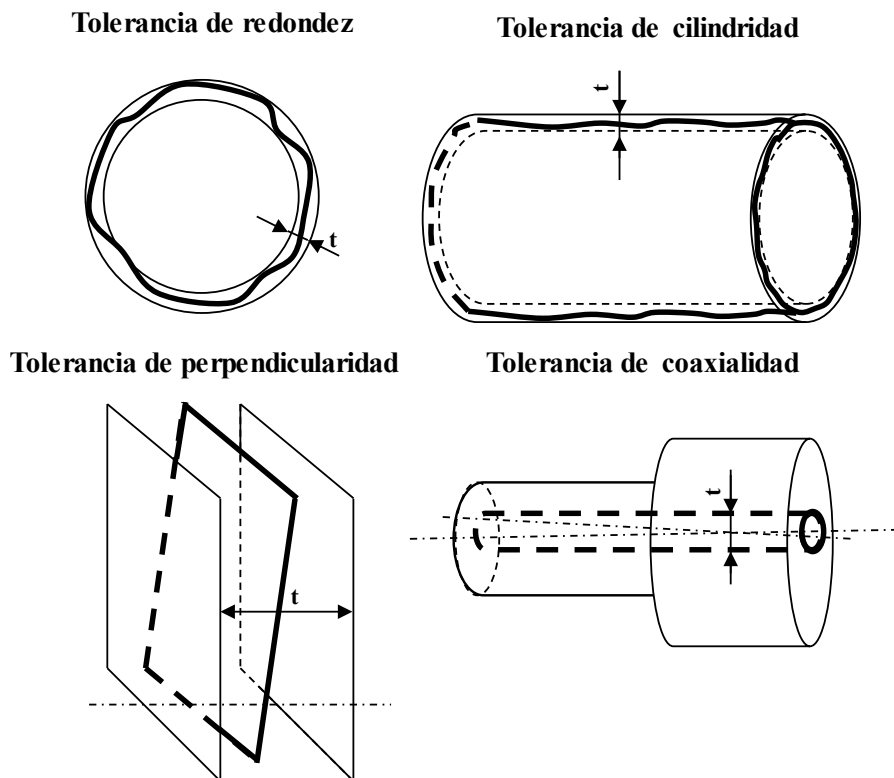


Figura 9. Definición de tolerancias de formas en piezas cilíndricas.

4. VERIFICACIÓN DE LA REDONDEZ

Existen diversos métodos para la verificación de la redondez (UNE-82307); el que se expone a continuación es el sistema de perfilado mediante el círculo de mínimos cuadrados al que también hace referencia la Norma UNE 82320.

Como se ha indicado anteriormente, el procedimiento consiste en girar la pieza a medir en un soporte adecuado (banco entre centros, soportes en V con los apoyos de la pieza bien ejecutados...), de modo que gire sobre un eje arbitrario cercano a su eje geométrico. Sobre una sección de la pieza se realizan medidas con un comparador en el contorno.

El procedimiento de verificación se resume en los siguientes pasos:

- Ajuste a cero del reloj comparador: para ello se toma un mandrino de verificación de radio R lo más próximo posible al radio de la pieza a verificar. Sobre una generatriz del mandrino se ajusta a cero el comparador.

- Una vez sustituido el mandrino por la pieza a verificar, se sitúa el reloj comparador en una generatriz de referencia del cilindro a verificar y se toma la lectura correspondiente. Se gira el cilindro en incrementos angulares $\Delta\theta$ (incrementos iguales) tomando las lecturas del reloj comparador Δr_i para cada ángulo θ_i . Las coordenadas radiales r_i para los puntos P_i (n puntos) correspondientes se obtienen como suma del radio R del mandrino de referencia y el Δr_i medido con el comparador (figura 10).

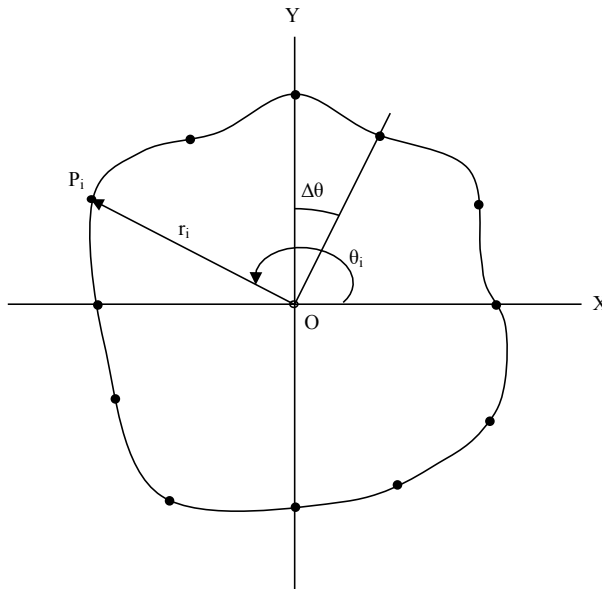


Figura 10. Obtención de puntos del perfil efectivo de una pieza en la verificación de formas cilíndricas.

- Eligiendo como centro de ejes coordenados XY el centro O , se calculan las coordenadas rectangulares (X_i, Y_i) de cada punto P_i .
- Se calcula la abcisa (a) y la ordenada (b) del centro (MC) del círculo de mínimos cuadrados con respecto al centro O , así como el radio R_{MC} mediante las expresiones siguientes (1) a (3):

$$a = \frac{2 \sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

$$b = \frac{2 \sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (2)$$

$$R_{MC} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (3)$$

- Se calcula la diferencia entre los radios de las circunferencias que con centro en la de mínimos cuadrados (MC) inscriben y circunscriben al perfil del cilindro δ_{MC} (figura 11).

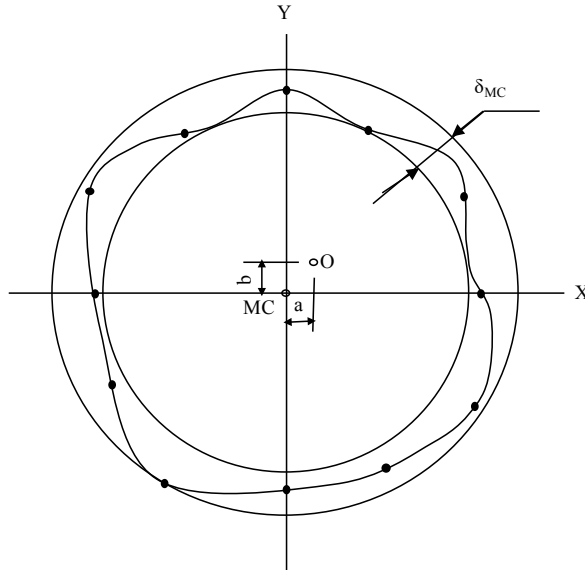


Figura 11. Parámetros del círculo de mínimos cuadrados y circunferencias que determinan la tolerancia de redondez.

5. VERIFICACIÓN DE LA CILINDRICIDAD

Para verificar la cilindridad, se ha de verificar la redondez, tal y como se ha indicado en el epígrafe anterior, en tres secciones transversales equidistantes S_k . Como consecuencia de ello, se obtienen los centros MC_k del círculo de mínimos cuadrados en cada sección.

Se obtiene el eje de referencia mediante regresión lineal a partir de las coordenadas (X_k, Y_k, Z_k) de los centros MC_k .

Se calculan las distancias $D_{i,k}$ que hay desde los puntos $P_{i,k}$ de las tres secciones al eje de referencia. La tolerancia de cilindricidad se obtiene como la diferencia entre la mayor y la menor de las distancias (4).

$$t_C = D_{\text{máx}} - D_{\text{mín}} \quad (4)$$

**BIBLIOGRAFÍA Y
OTROS RECURSOS**

- Bernabé Sánchez, J.M., La metrología legal. Madrid, Actas del 1^{er} Congreso Nacional de Metrología: Medir para competir, pp. 115-123, mayo 1996.
- Bucher, J.L., The Metrology Handbook, ASQ Quality Press, 2004.
- Carro de Vicente-Portela, J., Aspecto técnico fundamental del manual de calidad en un laboratorio de calibración o ensayos”. Cartagena, Ciclo de Conferencias/Curso Metrología y Calibración en Sistemas de Calidad Industrial, EPS de Cartagena, febrero 1994.
- Carro de Vicente-Portela, J. Curso de Metrología Dimensional, Sección de Publicaciones de la ETSII de Madrid, 1984.
- Carro de Vicente-Portela, J.; Sánchez Pérez, A.M., Trazabilidad de un laboratorio de metrología dimensional (1ª parte)”, Novamáquina 129, pp. 92-98 (1987).
- CEM, Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida, CEM, 2008.
- CEM, El Sistema Internacional de Unidades, 9ª ed., CEM, 2019.
- CEM, El Sistema Internacional de Unidades, 9ª Ed; Anexo II: Realización práctica de las definiciones de las unidades básicas, Centro Español de Metrología, 2019.
- CEM, Anexo II. Realización práctica de las definiciones de las unidades básicas, 9ª ed., CEM, 2019.
- CEM, DI-005. Procedimiento para la calibración de micrómetros de exteriores de dos contactos”, CEM, 2021.
- CEM, Procedimiento DI-008 para la calibración de pies de rey, CEM, 2021.
- CEM, DI-015 Procedimiento para la calibración de mesas de planitud, CEM, 2021.
- Coca, P., Rosique, J., Tecnología Mecánica y Metrotecnica; 8ª ed., Ed. Pirámide, 2002.
- Compain. L., Metrología de Taller, Ed. Urmo, 1976.
- Devries, W. R., Analysis of Material Removal Processes, Springer-Verlag, 1992.
- Dotson, C.L., Fundamentals of Dimensional Metrology, 6th ed., Cengage Learning, 2016.
- Estévez, S., Sanz, P., La medición en el taller mecánico, Ed. CEAC, 1977.
- Galyer, J.F.W., Shotbolt, C.R., Metrology for engineers, 5th ed. Ed. Cengage Learning EMEA, 1990.
- García de la Chica, A., Los requisitos del sistema de confirmación metrológica y la empresa, Actas del 1^{er} Congreso Nacional de Metrología: Medir para competir, pp. 131-136, Madrid, mayo, 1996.
- García-Mateos, A., Tolerancias, ajustes y calibres, 2ª ed., Ed. Urmo, 1987.

- Griffith, G.K., *Measuring and Gaging Geometric Tolerances*, Ed. Prentice-Hall, 1994.
- Hudson, S., *The Metrology Handbook*, States Academic Press, 2022.
- Groover, M.P., *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, Ed. Pearson, 2019.
- ISO 10012 (EN-UNE-30 012-1): 2003. *Sistemas de gestión de las mediciones. Requisitos para los procesos de medición y equipos de medición.*
- JCGM, *Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre*, JCGM, 2008.
- Madrona, J.A. "Organizaciones nacionales e internacionales de calibración y ensayos". Cartagena, Ciclo de Conferencias/Curso "Metrología y Calibración en Sistemas de Calidad Industrial, EPS de Cartagena, 1994.
- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Dirección General de Política Tecnológica. *Sistema de Calibración Industrial. Clasificación de instrumentos de metrología dimensional. 2ª ed., 1992.*
- Orden de 21 de junio de 1982 sobre la creación y funcionamiento del sistema de calibración industrial (BOE de 5 de julio de 1982).
- Raghavendra, N.V., Krishnamurthy, L., *Engineering Metrology and Measurement*, Oxford University Press, 2013.
- Real Decreto Legislativo 1296/1986, de 28 de junio, por el que se modifica la Ley 3/1985, de 18 de marzo, de Metrología, y se establece el control metrológico CEE. (BOE de 30 de junio de 1986).
- Real Decreto 1715/2010, de 17 de diciembre por el que se designa a la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) como organismo nacional de acreditación de acuerdo con lo establecido en el Reglamento (CE) nº 765/2008 del Parlamento Europeo y el Consejo, de 9 de julio de 2008, por el que se establecen los requisitos de acreditación y vigilancia del mercado relativos a la comercialización de los productos y por el que se deroga el Reglamento (CEE) nº 339/93.
- Real Decreto 493/2020, de 28 de abril, por el que se modifica el Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las Unidades Legales de Medida (BOE de 29 de abril de 2020).
- Resolución de 10 de marzo de 1993, de la Dirección General de Política Tecnológica por la que se reconoce a la Red Española de Laboratorios de Ensayo (RELE) la capacidad para cumplir funciones de acreditación de Entidades de Certificación, Entidades de Inspección o Auditoras de la Calidad, de Laboratorios de Ensayo y Laboratorios de Calibración Industrial" (BOE de 16 de abril de 1993).

- Sánchez-Pérez, A.M., Elementos básicos para la evaluación de incertidumbres, Ciclo de Conferencias/Curso Metrología y Calibración en Sistemas de Calidad Industrial, E.P.S. de Cartagena, febrero, 1994.
- Sánchez-Pérez, A.M., La necesidad de la metrología en la industria, Ciclo de Conferencias/Curso Metrología y Calibración en Sistemas de Calidad Industrial, EPS de Cartagena, febrero, 1994.
- Sánchez-Pérez, A. M., Complementos de Tecnología Mecánica y Metrología Dimensional, Servicio de publicaciones de la ETSII de Madrid, 1980.
- Sebastián Pérez, M.A., Organización y gestión de la calidad: Sistema de calidad, Ciclo de Conferencias/Curso Metrología y Calibración en Sistemas de Calidad Industrial, EPS de Cartagena, febrero, 1994.
- Shigley, J., Mischke, C., Diseño en Ingeniería Mecánica, 6ª ed., Ed. McGraw-Hill, 2002.
- Silva, G.M.S., Basic Metrology for ISO 9000 Certification, Newest Books, 2002.
- Smith, G.T., Industrial Metrology, Surfaces and Roundness, Springer, 2001.
- UNE 17701: 2002 (equivalente ISO 68-1:1998), Rosca métrica para usos generales, AENOR.
- UNE-EN ISO 286-2:2011, Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 2: Tablas de las clases de tolerancia normalizadas y de las desviaciones límite para agujeros y ejes. (ISO 286-2:2010), AENOR.
- UNE EN ISO 3650:2000, Especificación geométrica de productos (GPS), Patrones de longitud. Bloques patrón. (ISO 3650:1998). AENOR.
- Villena-Pardo, L., La metrología y las PYMES, Actas del 1º Congreso Nacional de Metrología: Medir para competir, pp. 3-21, mayo, 1996.

RECURSOS

- Asociación Española de Normalización, UNE: <https://www.une.org/>
- Asociación Española de Normalización y Certificación: <http://www.aenor.es>
- Bureau Internacional de Pesas y Medidas, BIPM: <https://www.bipm.org/en/about-us/>
- Centro Español de Metrología, CEM: <http://www.cem.es>
- Entidad Nacional de Acreditación, ENAC: <http://www.enac.es>
- Helios Preisser: <https://www.helios-preisser.com/de/>

Hexagon-Tesa: <https://tesatechnology.com/en-gb/home/>

International Organization for Standardization: <http://www.iso.org>

Mahr Instruments: <https://www.mahr.com>

Metrology, the Science of Measurement: <http://www.metrologycareers.com>

Mitutoyo <http://www.mitutoyo.com/>

Taylor-Hobson: <https://www.taylor-hobson.com/>

The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty: <https://physics.nist.gov/cuu/index.html>

National Institute of Standards and Technology, NIST: <https://www.nist.gov/>

El texto presenta una actualización de la metrología, que ha sufrido una importante evolución en los últimos años, en sus tres facetas fundamentales: científica, legal y aplicada. Fundamentalmente, el libro va enfocado a la metrología dimensional en el ámbito de la fabricación, si bien la parte inicial, hasta el capítulo 4, puede generalizarse a otros ámbitos de la metrología. En el primer capítulo se posiciona la metrología dentro de los sistemas de calidad industrial, estableciendo la normativa aplicable. Este aspecto se complementa con las herramientas técnicas expuestas en el capítulo 4. En los capítulos 2 y 3 se describen conceptos metrológicos básicos y se describen e interpretan las pautas para el cálculo y expresión de las incertidumbres involucradas en los procesos de calibración y medición siguiendo las directrices GUM 2008. En el capítulo 5 se abordan las operaciones con tolerancias y ajustes y, por último, los capítulos 6 al 10 contienen la aplicación práctica de la metrología dimensional, longitud, ángulos y formas, particularizadas también a diferentes elementos mecánicos y a su interpretación en el laboratorio.

Aunque el texto está dirigido a un público que se interesa por la metrología en general, puede ser especialmente útil para los estudiantes de Grado y Máster en asignaturas del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación.



Ediciones de la Universidad
de Castilla-La Mancha

ISBN 978-84-9044-539-6



9 788490 445396

publicaciones.uclm.es