

1. Introducción y conceptos

1.1. Introducción y objetivos

La fabricación mecánica requiere de una serie de controles metrológicos que garanticen la adecuada precisión y el estricto cumplimiento de las condiciones expresadas en el plano y de las normativas a las que cada fabricación pueda estar sometida.

Todo esto requiere poseer un conjunto de conocimientos relativos a las unidades, a los diferentes tipos de instrumentos y equipos de medición y control disponibles y a los posibles métodos aplicables en cada caso. Y conlleva la necesidad de contar con una capacitación que proporcione criterios técnicos y metrológicos de elección y selección.

De un técnico que trabaje en diseño, fabricación o control de calidad, cabe esperar que sea capaz de diseñar los sistemas de medida y verificación necesarios y suficientes durante la fase de diseño si le compete, y a lo largo del proceso de fabricación tanto para el cumplimiento de los requisitos especificados en una determinada producción, como para garantizar la calidad de los productos terminados, o para valorarla posteriormente.

Siendo el plano el elemento de partida para la fabricación, se hace necesario dominar su lenguaje y simbología por completo y saber juzgar el tipo de acotación adecuado en función de los métodos de control a emplear y del propio proceso de fabricación, a los que la pieza, elemento o conjunto deba ser sometido. Por ello, y dada su importancia, estos aspectos se han resaltado en el texto. Tradicionalmente la metrología dimensional se asociaba con verificaciones de tamaño, pero con la creciente utilización de las tolerancias geométricas lo cierto es que la denominada metrología geométrica incluye principios de verificación relacionados, propiedades superficiales e incertidumbre de medición dimensional y geométrica. Los conceptos de Matriz (GPS: *Geometrical Product Specification*) y el de Verificación Geométrica de Producto (VGP) se están abriendo paso por su importante aportación en cuanto al aseguramiento de la calidad, por ello se han tratado, aunque dominarlos por completo exige una formación específica.

Pero la metrología geométrica no solo se refiere a los controles a realizar sobre las piezas que se construyen, sino que los propios equipos de medida, instrumentos, patrones y accesorios con los que se realizan las diferentes operaciones metrológicas han de estar debidamente gestionados, lo que implica la organización y planeamiento de un Plan de Mantenimiento y un Plan de Calibración, que han de ser establecidos por los técnicos de la empresa o taller con el fin de cumplir con las normas vigentes, con los sistemas de calidad existentes, tanto en la propia empresa como con exigibles por parte de sus clientes, y en última instancia poder garantizar la trazabilidad de sus instrumentos y equipos, de los resultados obtenidos y de sus productos.

Todas estas cuestiones deben ir acompañadas de unos conocimientos y una cultura metrológica que permitan desenvolverse en este campo, dominar los conceptos metrológicos, conocer los organismos las instituciones y las normativas de aplicación, en suma el funcionamiento y la organización metrológica tanto en el ámbito nacional como internacional.

El mundo de la metrología avanza a gran velocidad, y afronta nuevos retos, con un mercado que demanda soluciones y tecnologías capaces de lograr los resultados que precisa, no ya en el laboratorio y con personal altamente especializado, sino en el lugar en el que se está produciendo y con el personal disponible. Los sistemas de control metrológico portátiles y los de visión artificial son los facilitadores de ese cambio, consistente en llevar la metrología a las líneas de producción. La demanda de medios de control más inteligentes y rápidos debe conjugarse con las garantías de fiabilidad y trazabilidad exigibles, en un entorno muy competitivo, que demanda flexibilidad y economía.

1.1.1. Metrología

El término metrología procede del griego *μέτρον* que significa 'medida', unido al sufijo *logia*, que significa 'estudio' o 'tratado'. La metrología es, por tanto, la ciencia que se dedica al estudio de las medidas y sus aplicaciones, incluyendo tanto los aspectos teóricos como los prácticos.

Por definición, medir una cantidad de una determinada magnitud es compararla con otra cantidad conocida de esa misma magnitud que se toma como referencia y se denomina unidad, expresando cuantas veces la cantidad desconocida contiene a la conocida o unidad. La medición es una operación que debe producir como resultado un valor numérico. Hay que tener en cuenta que en

realidad la elección de la unidad que se va a utilizar en una medición es en principio una cuestión arbitraria, si bien interesa elegirla de tal modo que su escala, o tamaño, resulte adecuado a la magnitud a medir. Así, por ejemplo, no sería lógico elegir la unidad cm si lo que deseamos medir es una distancia entre dos ciudades, sino que habremos de utilizar una unidad mucho mayor y más adecuada como el km, para que el resultado obtenido sea una cantidad manejable.

1.1.1.1. Antecedentes

Los primitivos sistemas de unidades cubrían las necesidades existentes tanto en lo referente a las magnitudes a medir como en cuanto a la precisión con la que las mediciones se abordaban, cuestión esta última que no planteaba excesivas exigencias si la comparamos con la situación de nuestro siglo.

En la actualidad, los sistemas de unidades cubren todas las magnitudes conocidas, tales como temperatura, presión, intensidad luminosa, etc. Antiguamente, las medidas se limitaban a las cuatro magnitudes básicas que servían para resolver las necesidades metroológicas derivadas de las operaciones comerciales; sobre cereales, bebidas, tejidos, tierras, construcciones etc. La metrología no existía como ciencia y los conocimientos y técnicas relativos a las medidas estaban englobados dentro de la denominación general de «pesas y medidas».

Pero aun dentro de un sistema de «pesas y medidas» es básico conseguir el mayor grado de uniformidad posible, tanto en lo que se refiere a la denominación de las unidades como al valor que estas representan. Por ello, los primitivos sistemas de medición resolvieron este problema interpretando las unidades de medida entendidas como cantidades de referencia y materializadas como prototipos o patrones que se conservaban en un determinado lugar y a través de los cuales se producía la diseminación que permitiera disponer de las mismas en donde fuera preciso. Las culturas sumeria, mesopotámica y babilónica utilizaron sistemas de unidades sexagesimales. Uno de los ejemplos más antiguos de patrón de longitud que se conservan está en el Louvre sobre la estatua sedente del rey-dios Gudea, también conocida como «el arquitecto de la regla», y sobre cuyas rodillas descansa una regla graduada de 26,45 cm «el pie caldeo», dividido en 16 partes, «dedos», y que era el patrón de medida de la ciudad de Lagash con una antigüedad estimada de 2575 años a. de C.

Muchas de las unidades o patrones antiguos poseían orígenes antropomórficos y estaban ligados a dimensiones o a capacidades de personas de la realeza, como el «pie de rey», por ejemplo, cuya longitud variaba de un país a otro. En el antiguo Egipto, 3000 años a. de C., empleaban ya un sistema de numeración decimal y utilizaban unidades autocráticas como el «Auna», que representaba la longitud del antebrazo del faraón desde el codo hasta el extremo del dedo medio con la mano extendida, «el codo grande» (0,525 m) y el «codo pequeño» (0,450 m). En el museo egipcio de Turín se conserva el codo de Amenenope, una unidad de medida de longitud con divisiones a trazos. En el mundo griego se empleaba otra medida antropomórfica el «estadio», equivalente a 600 pasos, unidad basada en las dimensiones del estadio de Olimpia. Una de las aportaciones más relevantes de la cultura griega en el aspecto metrológico fue la determinación de la longitud del meridiano terrestre por parte de Eratóstenes en el año 240 a. de C.

El medievo supuso un periodo de parálisis en el aspecto metrológico en Europa de la que esta no se recuperaría hasta el Renacimiento. Carlomagno intentó imponer un sistema de unidades en su reino, pero no lo logró, las unidades de uso local o regional continuaron en uso. En Gran Bretaña, las unidades de longitud proceden del antiguo «codo nórdico», las invasiones sajonas impusieron nuevas unidades, así como la conquista normanda. Los diferentes reyes propusieron sucesivas definiciones de la yarda.

En Francia en 1688 surgió el uso de la *toise*, en español «toesa», del latín *tensa*, un patrón de longitud materializado en una barra de hierro empotrada en la fachada del Grand Chatelet de París, y como unidad de masa se empleaba desde el siglo XV la llamada «pila de Carlomagno» consistente en una columna formada por 13 pesas de cobre apiladas unas sobre otras. La toesa fue importada a España por los Borbones en el siglo XVIII.

En cuanto a las medidas agrarias, algunas se basaban en la capacidad de trabajo de los animales, así, por ejemplo, se medían las fincas utilizando como unidad «el día de bueyes», es decir, la extensión que dos bueyes eran capaces de arar en una jornada, dicha medida era utilizada en el norte de España y también en Italia. En Castilla, la extensión de los campos se medía en fanegas. La «fanega» era en algunas regiones una unidad de capacidad materializada en una caja de madera de un cierto tamaño con la que se medía un volumen cereal y equivalía a unos 50 litros, mientras que en otros lugares el término era una unidad de masa, y finalmente el concepto «fanega», trasladado a una extensión de terreno, representaba y aún representa la superficie de tierra necesaria para poder

sembrar la cantidad concreta de una «fanega» de grano. Mientras que la distancia entre dos poblaciones se cuantificaba en función de las jornadas necesarias para llegar de una a otra con los medios habituales empleados en la época. Los antecedentes del sistema métrico decimal se remontan al abad Gabriel Mouton (1618- 1694), que en su obra *Observaciones de los diámetros aparentes del Sol y de la Luna* propugnó la idea de una medida universal, un sistema de base 10, que tardaría aún 120 años en hacerse realidad. La Revolución francesa, en su afán modernizador, consideró las viejas unidades de pesas y medidas como símbolos del mundo medieval al que deseaba dejar atrás, y se lanzó con entusiasmo a implantar y difundir el sistema métrico, racional, moderno y universal.

A partir de la revolución industrial, con los cambios que se produjeron en los procesos de fabricación, que pasaron de ser artesanales y realizados a pequeña escala, a organizarse en tareas separadas y a gran escala, las unidades, los patrones y las mediciones hubieron de evolucionar para poder adaptarse a las nuevas necesidades. La naciente industria demandaba mejores y más exactos métodos de medida y ello estimuló el desarrollo relativamente reciente de la metrología, lo que propició que los viejos sistemas de «pesas y medidas», que en ocasiones eran de ámbito regional, hubieran de unificarse hasta convertirse en auténticos sistemas de unidades. Sin embargo, el Sistema Internacional (SI), sistema planificado de uso general por la mayor parte de las naciones, convive con el Sistema Imperial Británico que fue expandiéndose a través del uso, pero sin planificación previa. Además, la propia evolución científica y tecnológica ha venido imponiendo la creación de nuevas unidades para satisfacer los cada vez más exigentes requisitos de medición de las tecnologías que han ido surgiendo desde entonces.

1.1.1.2. Sistema Internacional y Sistema Imperial Británico

Mientras que Francia se empleaba a fondo en asentar el sistema métrico decimal en los restantes países, llegando a producirse una verdadera obsesión decimalizadora, Gran Bretaña, por su parte, impulsaba su tradicional sistema de medidas que extendía a los países de su ámbito colonial. Sin embargo, y al mismo tiempo, en el sistema anglosajón comenzaba a producirse una segregación, debido a que EE. UU. y Gran Bretaña poseen unidades que, compartiendo la misma denominación, poseen valores diferentes tales como el *quart* y el *pint*, debido a que Estados Unidos mantuvo los antiguos valores para ambas unidades, mientras que, sin embargo, en Gran Bretaña se modificaron al revisarse el sistema anglosajón en 1824.

A continuación se muestran las distintas unidades anglosajonas:

Unidades anglosajonas de longitud		
Nombre inglés	Equivalencia	Nombre Español
<i>league</i>	<i>3 miles</i>	legua
<i>statute mile</i>	<i>8 furlongs</i>	milla terrestre
<i>furlong</i>	<i>10 chains</i>	estadio
<i>chain</i>	<i>4 rods</i>	cadena
<i>rod, perch ó pole</i>	<i>5,5 yards</i>	barra, vara o mástil
<i>yard</i>	<i>3 feet</i>	yarda
<i>foot</i>	<i>12 inches</i>	pie
<i>inch</i>		pulgada

Tabla 1. Unidades de longitud del Sistema Imperial Británico.

La equivalencia con el metro se obtiene por la relación: 1 *statute mile* = 1.609,34 m

Unidades de capacidad (líquidos y áridos) <i>Sistema Imperial Británico</i>		Unidades Anglosajonas de Volumen	
Nombre Inglés	Equivalencia	Nombre Inglés	Equivalencia
<i>quarter</i>	<i>8 bushels</i>	1 <i>quart</i> (Sistema Imperial)	1.136 490 0 litros
<i>bushel</i>	<i>4 pecks</i>	1 <i>quart</i> (EE. UU., líquidos)	0.946 326 4 litros
<i>peck</i>	<i>2 gallons</i>	1 <i>quart</i> (EE. UU., áridos)	1.101 220 9 litros
<i>gallon</i>	<i>4 quarts</i>		
<i>quart</i>	<i>2 pints</i>		
<i>pint</i>	<i>4 gills</i>		
<i>gill</i>	<i>5 fluidounces</i>		
<i>fluidounce</i>	<i>8 fluidrams</i>		
<i>fluidrams</i>	<i>60 minims</i>		

Tabla 2. Unidades de volumen del sistema anglosajón.

Unidades de capacidad (líquidos) Sistema EE. UU.		Unidades de capacidad (áridos) Sistema EE. UU.	
Nombre inglés	Equivalencia	Nombre inglés	Equivalencia
<i>gallon</i>	4 <i>quarts</i>	<i>bushel</i>	4 <i>pecks</i>
<i>quart</i>	2 <i>pints</i>	<i>peck</i>	2 <i>gallons</i>
<i>pint</i>	4 <i>gills</i>	<i>gallon</i>	4 <i>quarts</i>
<i>gill</i>	4 * <i>fluidounces</i>	<i>quart</i>	2 <i>pints</i>
<i>fluidounce</i>	8 <i>fluidrams</i>		
<i>fluidrams</i>	60 <i>minims</i>		

Tabla 3. Unidades de capacidad del sistema anglosajón.

1.1.2. Industrialización de los procesos de fabricación

La revolución industrial implicó, como ya se ha señalado, grandes cambios en todos los órdenes de la vida, que transformaron los sistemas productivos; la aparición del maquinismo, la partición y diseminación de las tareas productivas frente a la fabricación tradicional basada en los sistemas gremiales, todo cambió. El propio sistema organizativo del trabajo estaba siendo puesto en cuestión, con obras tales como *La riqueza de las naciones* de Adam Smith, en 1776, primer libro de economía moderna, con lo que la realización del trabajo de principio a fin por parte de uno o varios operarios en un mismo lugar fue sustituido por un sistema organizativo diferente en el que participaba mano de obra escasamente cualificada. Tales transformaciones impusieron la necesidad de poder contar con series de productos iguales que poseyeran una cualidad que pasó a ser crucial: la de que los elementos fabricados fueran intercambiables entre sí, ya que cualquier máquina no es sino un conjunto ensamblado de piezas elementales y es preciso garantizar que los acoplamientos entre los elementos constitutivos funcionen adecuadamente al integrarse en el conjunto. Para poder asegurar que el acoplamiento funcione en todos los casos, aunque las piezas elegidas lo sean al azar, provenientes de fabricaciones independientes, de lotes diferentes y fabricadas en distintos lugares por personas distintas, debe lograrse producir con uniformidad. Intercambiabilidad implica, pues, uniformidad, es decir, estandarización. Hasta entonces, para fabricar elementos que encajasen adecuadamente era preciso tener delante uno de ellos para adaptar el otro, o bien fabricar ambos conjuntamente ajustándolos durante el proceso de fabricación.

La intercambiabilidad en las piezas mecánicas es una realidad cotidiana que nos resulta común, sin embargo, conseguirla ha requerido y requiere la aplicación de un sistema de tolerancias que forme parte de las especificaciones de ciertos componentes y que garantice la uniformidad dentro de unos límites claramente establecidos que han de ser controlados y garantizados.

Uno de los antecedentes tempranos de la fabricación «protoindustrial» nos la proporcionan los astilleros, concretamente el Arsenal de Venecia, y en especial el Arsenale Novissimo, en el que ya a finales del siglo xv, una ingente mano de obra. unas 16 000 personas, trabajaban en la construcción de galeras a un ritmo tal que permitía completar una nave diariamente mediante el ensamblaje de piezas fabricadas previamente, y que se iban montando a medida que la nave avanzaba por una rampa inclinada.

La intercambiabilidad se persiguió durante mucho tiempo como un objetivo a lograr, habiendo sido impulsada en sus comienzos por parte de los fabricantes de armas de fuego, ya que las armas como mecanismo no solamente requieren la posibilidad de sustitución de alguna de sus partes, sino que además resulta crítico para su correcto funcionamiento que la munición se adapte a ellas en unas determinadas condiciones de medida. Una munición —una bala de cañón, por ejemplo— demasiado pequeña, es decir, que posea excesiva holgura, provoca que el disparo pierda por completo su eficacia, mientras que un apriete excesivo de la bala implica un elevado riesgo de explosión del arma. Si a esto se une el calentamiento de las piezas, el asunto se complica aún más. Así pues la artillería y los procesos de fabricación ligados a la misma fueron probablemente los primeros sectores en interesarse por investigar, implantar y desarrollar sistemas propios de tolerancias, que son antecedentes y precursores de los actuales. A finales del siglo xv, la munición metálica empieza a emplearse y con ella nace el concepto de calibre y la consiguiente uniformización que permitiese contar con munición previamente preparada que pudiera llevarse al campo de batalla como reserva.

Desde el siglo xviii, se conocen referencias a la utilización de sistemas de tolerancias de medida que permitieran la intercambiabilidad en la fabricación de armamento, tales como las tablas de construcción del general francés Gribeauval, que constituyen una de las primeras recopilaciones sobre dimensiones y características de cañones y que fueron elaboradas entre 1764 y 1790. El llamado sistema Gribeauval de estandarización y reducción dimensional a unos ciertos tamaños estandarizados convertiría a los cañones franceses en las mejores armas de su época.

En 1788, el ingeniero francés Honoré Le Blanc, basándose en los conocimientos de Gribbeauval, aplicó principios de intercambiabilidad a la fabricación de armas ligeras, y en Norteamérica Eli Whitney, el famoso inventor de la desmotadora de algodón, al serle encargados por el gobierno americano la fabricación de 12000 mosquetes, fue el primero en aplicar a gran escala el principio de intercambiabilidad en 1798, adaptando un sistema de troqueles ideado por Le Blanc, y creando así el sistema estadounidense de fabricación en serie, en el que más tarde se inspiraría Ford para desarrollar la industria automovilística americana.

El cumplimiento de la condición de intercambiabilidad precisa de una solución técnica que permita asegurarlo y que fue conseguida mediante el empleo de troqueles y de calibres fijos, o calibres de límites, denominados en los talleres calibres (pasa / no pasa), que materializan los límites o valores extremos, máximo y mínimo de aceptabilidad para una dimensión determinada, o, lo que es lo mismo, acotan los márgenes extremos del error admisible por exceso o defecto para una cierta cota o pieza.

Sabemos que las tolerancias se emplearon en las fábricas durante el siglo XIX, pero no se difundían sino que, por el contrario, se ocultaban, puesto que se consideraba que su elaboración era un conocimiento conseguido a través de la práctica, la destreza y la investigación propias de cada empresa, un secreto profesional a custodiar. De hecho, hasta hace sesenta años no se adoptaría un sistema internacional de tolerancias dimensionales y resulta muy difícil encontrar tablas de tolerancias en los tratados del siglo XIX pese a saber que se utilizaban. Por otra parte, a comienzos del siglo XX, en 1911 F.Taylor publica su obra *Principles of Scientific Management*, en donde desarrolla su teoría científica del trabajo, introduciendo el control de tiempos y la fabricación en cadena.

Con anterioridad a la Primera Guerra Mundial, las fábricas de automóviles, que también se dedicaban en numerosos casos a la fabricación de máquinas de coser, producían de forma artesanal. La primera empresa automovilística en producir en serie y de forma industrial fue la de Ransom Eli Olds, que en 1901 fabricaba el modelo de automóvil Oldsmobile Curved Dash, y posteriormente Ford, con su modelo Ford T, que se inspiró para su cadena móvil en la forma de trabajo de los mataderos de Chicago, Union Stock Yards. Pero sería de nuevo la industria armamentística la que se adelantó. André Citroën, en su fábrica de París, diseñó una cadena móvil para elevar los obuses que producía, empresa que, tras la contienda, se transformó para dedicarse a la fabricación de automóviles.

La prueba de fuego en cuanto a intercambiabilidad la protagonizaría en 1908 la marca americana Cadillac, que proclamaba la uniformidad completa de los componentes de sus automóviles basada en altísimas precisiones. El importador londinense de los vehículos propuso al Real Automovil Club inglés tomar tres Cadillacs K, de los ocho que entonces había en Londres, desmontarlos por completo, mezclarlos con piezas de la fábrica sin uso, y volver a montarlos al azar, sin necesidad de realizar ajuste alguno. La prueba se llevó a cabo y los automóviles así montados rodaron por el circuito de Brooklands 500 millas sin incidente alguno.

En el congreso de Praga de 1928, Francia propuso la adopción de un sistema internacional para definir las tolerancias, tras numerosos estudios surgió el sistema denominado ISA (Internacional Federation of the National Standardizing Association) que más adelante sería sustituido por la normativa ISO (International Organization for Standardization), que desde entonces coordina los esfuerzos internacionales de normalización a través de diversos comités técnicos en los que participan los representantes de los organismos nacionales de normalización.

1.1.3. Normalización

La palabra norma procede del latín *normun* y significa 'regla a seguir para llegar a un fin determinado'. Aunque desde antiguo las civilizaciones caldea y egipcia normalizaron o estandarizaron tamaños de ladrillos y piedras y en China los estándares de calidad eran establecidos por el Estado y conviene recordar que desde el siglo XI a. de C. China contaba con un Estado. En el 221 a. de C. un decreto unificó en China los sistemas de pesos y medidas. La normalización y estandarización alcanzó también a la arquitectura regulando medidas, proporciones, composición de materiales y un largo etcétera. Exponente de ello es el *dou gong*, un protocolo utilizado en la construcción de pagodas y templos que regulaba incluso las proporciones de los materiales. Las civilizaciones griega y romana aportaron estándares constructivos en cuanto a proporciones, como la proporción áurea, utilizada en los templos griegos y la escultura, o las divisiones romanas del terreno en *centuriare*, bloques regulares cuadrados por poner solo algunos ejemplos.

El impulso definitivo a la normalización actual sería definitivo debido a la Primera Guerra Mundial (1914-1918). Los ingenieros alemanes Naubaus y Hellmich crearon el primer organismo dedicado a la normalización, NADI (Normen Ausschuß der Deutschen Industrie: Comité de Normalización de la Industria Alemana), que

comenzó a elaborar normas bajo las siglas DIN (Deutscher Industrie Normen: Normas de la Industria Alemana). En 1926, NADI pasa a ser DNA (Deutsches Normen Ausschuß: Comité de Normas Alemanas), que continuó emitiendo normas bajo las siglas DIN, que entonces pasaron a significar Das Ist Norm (Esto Es Norma). En 1975 las siglas DIN pasaron a significar Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización). En 1918 surgió en Francia AFNOR (Association Française de Normalisation) y en 1919 en el Reino Unido se crea una organización privada, BSI (British Standards Institution). En 1926 se creó en Londres ISA (International Federation of the National Standardization Association). Tras la Segunda Guerra Mundial, ese organismo sería sustituido en 1947 por la ISO (International Organization for Standardization), con sede en Ginebra y dependiente de la ONU. A dicha organización se han ido adhiriendo diferentes organismos dedicados a la normalización y la certificación, actualmente cuenta con 140 países miembros. A consecuencia de la colaboración hispano-alemana durante la guerra civil española, las normas DIN comenzaron a emitirse en España. En 1945, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) crea el Instituto de Racionalización y Normalización (IRANOR), que comienza a editar las primeras normas españolas bajo las siglas UNE (Una Norma Española).

Nomenclatura de las normas UNE. Veamos, por ejemplo, la UNE 1 035 81:

1. La primera cifra, (1), hace mención al comité de normalización del que depende la norma.
2. El segundo grupo de cifras es el número de la norma emitido por dicho comité y puede añadirse una (R) si está en fase de revisión, una (C) si es un complemento de una norma o una (M) si es una modificación de una anterior.
3. El tercer grupo de cifras, (81) en este caso, hace referencia al año de edición de la norma, 1981.

1.1.4. Metrología de precisión, los inicios

El primer instrumento para realizar mediciones de precisión en longitudes es el micrómetro, cuyo nombre procede de la utilización de un husillo roscado de pequeño paso que proporciona una amplificación mecánica que le permite apreciar longitudes no muy apreciables por otros métodos. En la actualidad, es del orden de una micra ($1 \mu\text{m}$).

El fundamento de este instrumento es atribuido a William Gascoigne, astrónomo y matemático inglés que inventó el tornillo micrométrico de banco en 1640, si bien la difusión industrial de micrómetros similares a los actuales tardaría aún unos 200 años en producirse.

Marc Isambard Brunel (1769-1849) creó, en los astilleros de Portsmouth, una línea de montaje para la fabricación de poleas de madera, de mayor resistencia y calidad que las hechas a mano por procedimientos artesanales. Se diseñaron 22 máquinas diferentes, y se consiguió con 43 máquinas una producción de 160 000 poleas anuales. Maudslay desarrollaría el aparejo de los barcos, y sería Henry Maudslay quien logró un dispositivo micrométrico para controlar sus propios trabajos. El instrumento creado por él permitía la realización de lecturas con una precisión de milésima de pulgada y era conocido como Lord Chancellor. En 1772 James Watt construyó un micrómetro que utilizó en la construcción de su máquina de vapor, conservado en el Museo de la Ciencia de Londres.

A partir de las ideas de Maudslay, Joseph Whitworth (1803-1887) fabricante de los rifles que llevan su nombre, construyó un comparador horizontal en el que con un paso de tornillo micrométrico y un *nonius*, era posible efectuar lecturas de 0.00025 mm. En 1841, Whitworth ideó un tipo de rosca que lleva su nombre, la famosa rosca Whitworth, la más antigua, basada en las pulgadas, y que fue tomada como prototipo en Gran Bretaña y adoptada incluso en países bajo el sistema métrico decimal, conocida también como «rosca de gas».

Si bien, la primera patente de un micrómetro similar a los que se usan en la actualidad fue la del francés Jean Laurent Palmer (1848), por lo que frecuentemente a dicho instrumento se le denomina Palmer, y comenzó a fabricarse en serie en EE. UU., por la empresa Starrett, que continúa en activo hasta nuestros días. A finales del siglo XIX los micrómetros ya estaban introducidos en la mayoría de las industrias dedicadas a la fabricación.

1.2. Sistema Internacional de Unidades

1.2.1. La convención del metro

El sistema métrico decimal se implantó en Francia de una manera definitiva y consolidada en 1840. París se convertiría así en el foco de una intensa actividad propagandística dirigida a generalizar la utilización del sistema internacionalmente.

Las exposiciones universales de fines del siglo XIX fueron el foro impulsor de la necesidad de consensuar un único sistema de unidades mundialmente. En la de 1867 se constituyó el Comité de Pesas, Medidas y Monedas, y sucesivamente muchas naciones se fueron adhiriendo al mismo. La adhesión española al sistema métrico se produjo mediante ley publicada en *La Gaceta* de Madrid, el 22 de julio de 1849, bajo el reinado de Isabel II.

En 1889, la Comisión internacional decidió construir nuevos patrones del metro y del kilogramo en platino iridiado, abandonando la primitiva definición de metro que hasta entonces era «la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre», habiendo elegido la Academia el meridiano comprendido entre Dunkerque y Barcelona, la definición se había implantado en 1795. El cambio resultaba necesario, ya que determinaciones más precisas de esa medida hubieran supuesto modificaciones de la unidad. La decisión conllevaba el abandono de definiciones naturales y universales en favor de un patrón material único para cada unidad, que por comparación, permitiese derivar hacia patrones secundarios. Las razones para adoptar el nuevo patrón fueron pues pragmáticas, puesto que patrones basados en medidas geodésicas no podían asegurar una reproducibilidad de la misma calidad que la que podía obtenerse con buenos patrones de trazos. Así pues, en 1875, la Oficina Internacional del Metro encargó al ingeniero mecánico Henri Tresca (1814-1885) el diseño de un patrón de longitud para materializar el metro y el construyó 30 barras de platino e iridio con una ley (90/10), y con sección en (X) asimétrica que se denominó sección Tresca, ideada para proporcionar rigidez máxima a la barra con el mínimo material. La longitud del metro se grabó por medio de trazos de 0,006 mm de espesor junto con dos trazos auxiliares uno a cada lado de 0,5 mm de distancia sobre la fibra neutra protegida por las ramas de la equis. De las 30 barras construidas se eligió la número 6, que fue grabada con una M como Metro Prototipo Internacional, por ser la que menos discrepaba del metro del Archivo. Las demás se repartieron entre los diferentes países miembros para evitar que un incendio o alguna catástrofe pudiera destruir el patrón original depositado en París, y que en ese hipotético supuesto permitiese asegurar su continuidad. El metro estaba especificado que se colocase en posición horizontal, apoyado entre dos trazos distantes entre sí 571 mm y sometido a la presión atmosférica normal y a una temperatura de referencia, que entonces se estableció expresamente como la del hielo fundente, (0 °C), para independizarlo de las definiciones de escalas termométricas de la época y sus posibles errores. La definición de metro como patrón material perduró hasta 1960, año en el que se adoptó la que se mantiene

El fundamento de este instrumento es atribuido a William Gascoigne, astrónomo y matemático inglés que inventó el tornillo micrométrico de banco en 1640, si bien la difusión industrial de micrómetros similares a los actuales tardaría aún unos 200 años en producirse.

Marc Isambard Brunel (1769-1849) creó, en los astilleros de Portsmouth, una línea de montaje para la fabricación de poleas de madera, de mayor resistencia y calidad que las hechas a mano por procedimientos artesanales. Se diseñaron 22 máquinas diferentes, y se consiguió con 43 máquinas una producción de 160 000 poleas anuales. Maudslay desarrollaría el aparejo de los barcos, y sería Henry Maudslay quien logró un dispositivo micrométrico para controlar sus propios trabajos. El instrumento creado por él permitía la realización de lecturas con una precisión de milésima de pulgada y era conocido como Lord Chancellor. En 1772 James Watt construyó un micrómetro que utilizó en la construcción de su máquina de vapor, conservado en el Museo de la Ciencia de Londres.

A partir de las ideas de Maudslay, Joseph Whitworth (1803-1887) fabricante de los rifles que llevan su nombre, construyó un comparador horizontal en el que con un paso de tornillo micrométrico y un *nonius*, era posible efectuar lecturas de 0.00025 mm. En 1841, Whitworth ideó un tipo de rosca que lleva su nombre, la famosa rosca Whitworth, la más antigua, basada en las pulgadas, y que fue tomada como prototipo en Gran Bretaña y adoptada incluso en países bajo el sistema métrico decimal, conocida también como «rosca de gas».

Si bien, la primera patente de un micrómetro similar a los que se usan en la actualidad fue la del francés Jean Laurent Palmer (1848), por lo que frecuentemente a dicho instrumento se le denomina Palmer, y comenzó a fabricarse en serie en EE. UU., por la empresa Starrett, que continúa en activo hasta nuestros días. A finales del siglo XIX los micrómetros ya estaban introducidos en la mayoría de las industrias dedicadas a la fabricación.

1.2. Sistema Internacional de Unidades

1.2.1. La convención del metro

El sistema métrico decimal se implantó en Francia de una manera definitiva y consolidada en 1840. París se convertiría así en el foco de una intensa actividad propagandística dirigida a generalizar la utilización del sistema internacionalmente.

Las exposiciones universales de fines del siglo XIX fueron el foro impulsor de la necesidad de consensuar un único sistema de unidades mundialmente. En la de 1867 se constituyó el Comité de Pesas, Medidas y Monedas, y sucesivamente muchas naciones se fueron adhiriendo al mismo. La adhesión española al sistema métrico se produjo mediante ley publicada en *La Gaceta* de Madrid, el 22 de julio de 1849, bajo el reinado de Isabel II.

En 1889, la Comisión internacional decidió construir nuevos patrones del metro y del kilogramo en platino iridiado, abandonando la primitiva definición de metro que hasta entonces era «la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre», habiendo elegido la Academia el meridiano comprendido entre Dunkerque y Barcelona, la definición se había implantado en 1795. El cambio resultaba necesario, ya que determinaciones más precisas de esa medida hubieran supuesto modificaciones de la unidad. La decisión conllevaba el abandono de definiciones naturales y universales en favor de un patrón material único para cada unidad, que por comparación, permitiese derivar hacia patrones secundarios. Las razones para adoptar el nuevo patrón fueron pues pragmáticas, puesto que patrones basados en medidas geodésicas no podían asegurar una reproducibilidad de la misma calidad que la que podía obtenerse con buenos patrones de trazos. Así pues, en 1875, la Oficina Internacional del Metro encargó al ingeniero mecánico Henri Tresca (1814-1885) el diseño de un patrón de longitud para materializar el metro y el construyó 30 barras de platino e iridio con una ley (90/10), y con sección en (X) asimétrica que se denominó sección Tresca, ideada para proporcionar rigidez máxima a la barra con el mínimo material. La longitud del metro se grabó por medio de trazos de 0,006 mm de espesor junto con dos trazos auxiliares uno a cada lado de 0,5 mm de distancia sobre la fibra neutra protegida por las ramas de la equis. De las 30 barras construidas se eligió la número 6, que fue grabada con una M como Metro Prototipo Internacional, por ser la que menos discrepaba del metro del Archivo. Las demás se repartieron entre los diferentes países miembros para evitar que un incendio o alguna catástrofe pudiera destruir el patrón original depositado en París, y que en ese hipotético supuesto permitiese asegurar su continuidad. El metro estaba especificado que se colocase en posición horizontal, apoyado entre dos trazos distantes entre sí 571 mm y sometido a la presión atmosférica normal y a una temperatura de referencia, que entonces se estableció expresamente como la del hielo fundente, (0 °C), para independizarlo de las definiciones de escalas termométricas de la época y sus posibles errores. La definición de metro como patrón material perduró hasta 1960, año en el que se adoptó la que se mantiene

vigente. A España le correspondieron los prototipos números; 17 y 24, depositados en el Centro Español de Metrología (CEM).

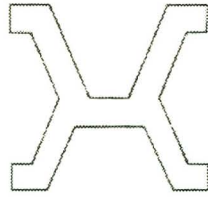


Figura 1. Perfil del patrón de metro, ideado por Henri Tresca.

En 1875 la Convención del Metro creó el Bureau International de Poids et Mesures, cuyos objetivos son los siguientes: el establecimiento de patrones fundamentales y las escalas de las magnitudes físicas principales así como la conservación de prototipos internacionales. El aseguramiento y coordinación de las técnicas de medición, la realización de las constantes, fenómenos físicos, en los que se basan los patrones de las unidades y la intercomparación de los patrones nacionales e internacionales para mantener la trazabilidad.

1.2.2. Números normales o preferentes, series Renard

Simultáneamente a la normalización de patrones y unidades que suponía la adopción del sistema métrico decimal, Charles Renard, un ingeniero francés, comprendió las enormes ventajas que supondría que las fabricaciones mecánicas se estandarizasen también en el aspecto dimensional con la finalidad de favorecer la intercambiabilidad de los componentes. Para ello, propuso que entre todos los valores posibles que podrían adoptar los diferentes elementos mecánicos de una máquina o de una estructura metálica, por ejemplo, se eligieran ciertos valores concretos y no valores aleatorios escogidos al azar por cada diseñador o fabricante. Así fue como Renard propuso sus números preferentes para que cada fabricante pudiera elegir el valor adecuado más próximo a uno de ellos, reduciendo así la posible e infinita variedad de valores, a unas series de números limitados y concretos. El sistema propuesto de utilización de los números preferentes, normales o series de Renard, que se han implantado por la comodidad, el abaratamiento que suponen, y también por la posibilidad de intercambiabilidad que su uso implica al reducir la variabilidad. Además, sus valores, al ser dichos números equidistantes entre sí, presentan la ventaja de formar gamas de productos con tamaños que van aumentando o disminuyendo de forma regular y constante, lo que contribuye a racionalizar los *stocks* en los almacenes, los recambios, los

utilidades, etc., puesto que estos números están compuestos por las potencias del número 10 y en una escala logarítmica de base 10, las primeras potencias de 10 (10, 100, 1000...) se distribuyen a intervalos constantes.

Los números normales o preferentes se generan utilizando la siguiente expresión:

$$a_n = (10^{\frac{1}{q}})^n$$

a_n es el valor normal obtenido;

q es el número de serie; y

n es el número de orden del valor normal.

$$a_1 = (10^{\frac{1}{5}})^1 = 1.584\ 893 \approx 1.60$$

Al valor 1 se le denomina número de orden del valor normal 1,60 en la serie R5.

$$a_5 = (10^{\frac{1}{20}})^5 = 1.778\ 279 \approx 1.80$$

Al valor 5 se le denomina número de orden del valor normal 1.80 en la serie R20.

Los números preferentes o normales son valores redondeados de las series geométricas compuestas por las potencias del número 10.

Los valores normales entre 1 y 10 se suelen encontrar tabulados, no obstante las series de números normales son ilimitadas en ambos sentidos, tanto creciente como decreciente, y los valores de los términos de otros intervalos pueden obtenerse al multiplicar los valores tabulados por potencias enteras de 10, tanto positivas como negativas. Las series de Renard son denominadas R5, R10, R20, R40, R80 y las cifras que acompañan a la R pueden ser los números; 5, 10, 20, 40 y 80, que representan respectivamente el valor del radicando correspondiente a cada serie, aunque la última de ellas, la R80, es de carácter excepcional. Además de estas series, existen otras que se denominan derivadas y que se obtienen alternando términos y seleccionando un número preferente o normal de cada; 2, 3 o 4.

Ejemplos de representación:

R (a₁.....) indica que la serie tiene como límite inferior el n.º preferente a₁ incluido.

R (..... a_2) indica que la serie tiene como límite superior el n.º preferente a_2 incluido.

R (a_1 a_2) indica que la serie tiene como límites los números preferentes, a_1 y a_2 .

R (... a) indica que la serie es ilimitada en ambos sentidos y que contiene el término a .

R 40/2 (a_1 a_2) indica una serie derivada de la R10, tomando términos alternos e incluyendo los números preferentes a_1 y a_2 .

R5: 1.00 1.60 2.50 4.00 6.30

R10: 1.00 1.25 1.60 2.00 2.50 3.15 4.00 5.00 6.30 8.00

R20: 1.00 1.25 1.60 2.00 2.50 3.15 4.00 5.00 6.30 8.00

1.12 1.40 1.80 2.24 2.80 3.55 4.50 5.60 7.10 9.00

R40: 1.00 1.25 1.60 2.00 2.50 3.15 4.00 5.00 6.30 8.00

1.06 1.32 1.70 2.12 2.65 3.35 4.25 5.30 6.70 8.50

1.12 1.40 1.80 2.24 2.80 3.55 4.50 5.60 7.10 9.00

1.18 1.50 1.90 2.36 3.00 3.75 4.75 6.00 7.50 9.50

Los números preferentes o normales poseen interesantes propiedades:

1. Cada una de las series contiene la serie anterior.
2. Las operaciones con números preferentes tales como producto, cociente o potencia, proporcionan siempre números preferentes de la misma serie.
3. El inverso, el doble y la mitad de un número preferente es otro número preferente de la misma serie.
4. Las series R10, R20, R40 y R80 contienen al 2 como número preferente, por lo que el producto o la división de cualquiera de sus valores por este número es otro número preferente.

Los números preferentes o normales han sido cruciales para formar grupos dimensionales y definir amplitudes de tolerancias, siendo una de sus utilidades

principales la asignación de dimensiones nominales a los elementos mecánicos. Pudiendo afirmarse que pese a la normalización que supuso la implantación del sistema métrico decimal, esta no hubiera sido completa en cuanto a la estandarización sin la implantación de las series de Renard en el dimensionamiento de las fabricaciones mecánicas y en el establecimiento de las tolerancias.

1.2.3. El Sistema Internacional (SI)

En 1946, el sistema (MKSA), cuyas siglas se corresponden con las cuatro unidades que lo componían por entonces (metro, kilogramo, segundo y amperio) fue aceptado por los países de la Convención del Metro. En 1954 el sistema se amplió incluyéndose el kelvin y la candela, y pasó a denominarse Sistema Internacional de Unidades. El SI se estableció en 1960 por la 11.^a Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), en 1971 el SI se amplió añadiéndose en la 14.^a Conferencia una nueva unidad, el mol, como unidad básica de cantidad de sustancia.

1.2.3.1. Unidades fundamentales del SI

Actualmente, el Sistema Internacional de Unidades, (SI), que es el sistema de unidades adoptado y también recomendado por la (CGPM) posee siete unidades básicas: metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin, candela y mol. La condición para que una unidad sea considerada como fundamental o básica es su independencia dimensional. Las citadas unidades, junto con las derivadas, componen un sistema coherente de unidades. No obstante, existen otras unidades que estando fuera del SI se aceptan para su uso junto con las pertenecientes al Sistema Internacional de Unidades.

1.2.3.2. Unidades derivadas

Las unidades derivadas son combinaciones de las fundamentales y, para ser consideradas como tales, deben estar expresadas en unidades básicas del (SI), aunque algunas de ellas tienen nombres propios como newton, pascal, tesla, voltio, etc.

Ejemplos de algunas unidades derivadas:

Superficie, expresada en m^2

Volumen, expresado en m^3

Velocidad, m/s

Densidad, kg/m^3

1.2.3.3. Unidades fuera del SI

Se trata de una serie de unidades que no estando incluidas en el SI se aceptan para ser utilizadas en las correspondientes áreas específicas. Su valor está determinado de forma experimental.

Magnitud	Unidad	Símbolo	Valor en unidades (SI)
Tiempo	minuto	min	1 min = 60 s
	hora	h	1 h = 60 min = 3 600 s
	día	d	1 d = 24 h = 86 400 s
Ángulo plano	grado	°	1° = (π/180) rad
	minuto	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
	segundo	''	1'' = (1/60)' = (π/648 000) rad
	grado centesimal	gon	1 gon = (π/200) rad
Superficie	hectárea	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
Volumen	litro	l, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
Masa	tonelada	t	1 t = 10 ³ kg

Tabla 4. Sucesivas definiciones de metro y sus incertidumbres.

El Sistema Internacional (SI) ha ido proporcionando a lo largo del tiempo sucesivas definiciones de las unidades básicas, los cambios de definición no fueron caprichosos, sino que obedecieron a la reducción progresiva de incertidumbres.

En 1937 ya se habían realizado numerosas medidas interferométricas con el objetivo de decidir si la longitud de onda de una radiación luminosa podría ser utilizada como patrón primario de longitud, lo que más adelante se llevaría a cabo.

En la actualidad la única unidad fundamental que no se efectúa mediante un fenómeno físico es el kilogramo, que se identifica aún con un objeto material, sin embargo, posiblemente en pocos años será sustituido por un fenómeno de tipo atómico o nuclear, donde el mundo físico se comporta con una regularidad ideal para el establecimiento de referencias naturales.

1.2.3.4. Unidades suplementarias

Las unidades de ángulo plano (radian) y de ángulo sólido (estereorradian) se consideran como unidades suplementarias. Ambas magnitudes deben considerarse como magnitudes derivadas adimensionales.

1.2.3.5. Unidades básicas del SI

Las unidades básicas del SI son las siete ya señaladas, que corresponden a las magnitudes que se indican entre paréntesis: metro (longitud), kilogramo (masa), segundo (tiempo), amperio (intensidad de corriente eléctrica), candela (intensidad luminosa), mole o mol (cantidad de materia o sustancia).

A continuación se indican sus definiciones en vigor así como algunos comentarios, y para algunas de ellas también la evolución y sucesivas definiciones.

METRO (m): longitud recorrida por la luz en el vacío durante 1/299792458 de segundo, y materializándose mediante la longitud de onda de la radiación de un láser de helio-neón estabilizado sobre todo.

Esta definición adoptada en 1983 supone la velocidad de la luz en el vacío (c) como constante universal con valor 299792458 metros por segundo.

A continuación se indican las sucesivas definiciones de metro:

Año	CGPM	Incertidumbre	Observaciones
1799	-	10 μm	Metro de los Archivos de platino, prismático con sección rectangular.
1889	1ª	0.2 μm	Patrón único hasta 1960, de platino iridiado y sección en "X" asimétrica, <i>Tresca</i> .
1960	11ª	4 nm 10^{-7} m	Lámpara de kriptón 86: 1650763,73 longitudes de onda de una línea espectral específica del kriptón 86.
1983	17ª	1 nm 10^{-11} m	Definición actual. Según últimas recomendaciones de operación (CIPM, 1993)

Tabla 5. Sucesivas definiciones de metro y sus incertidumbres.

KILOGRAMO (kg): masa del prototipo internacional del kilogramo conservado en el (BIPM).

Esta es la única unidad básica que lleva un prefijo multiplicativo, que se indica sobre el gramo, (1 000 g) pero ello no debe inducir a error, la unidad fundamental es el kilogramo y no el gramo.

SEGUNDO (s): duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.

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

KELVIN (K): unidad de temperatura termodinámica, es la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

MOLE (mol): cantidad de sustancia o de materia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0.012 kilogramos de carbono 12. Su símbolo es el «mol». Cuando se emplee el mol, las entidades elementales deben ser especificadas y pueden ser; átomos, moléculas, iones, electrones, u otras partículas o grupos especificados de tales partículas.

CANDELA (Cd): intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ hercios y cuya intensidad energética en dicha dirección es de $1/683$ vatios por estereorradián.

1.2.3.6. Múltiplos y submúltiplos del SI

Sistema Internacional de Unidades, (SI)					
MÚLTIPLOS			SUBMÚLTIPLOS		
Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo	Factor
deca	Da	10	deci	d	10^{-1}
hecto	H	10^2	centi	c	10^{-2}
kilo	K	10^3	mili	m	10^{-3}
mega	M	10^6	micro	μ	10^{-6}
giga	G	10^9	nano	n	10^{-9}
tera	T	10^{12}	pico	p	10^{-12}
peta	P	10^{15}	femto	f	10^{-15}
exa	E	10^{18}	atto	a	10^{-18}
zetta	Z	10^{21}	zepto	z	10^{-21}
yotta	Y	10^{24}	yocto	y	10^{-24}

Tabla 6. Múltiplos y submúltiplos del Sistema Internacional (SI).

1.2.3.7. Reglas para escribir los símbolos de las unidades

1. Las unidades se escriben siempre en caracteres romanos (rectos) y en minúscula excepto cuando el nombre de la unidad procede del nombre o apellido de una persona, en cuyo caso la primera letra se escribe en mayúscula (N, Pa, Hz).
2. Las unidades nunca se escriben en plural. (6 kg, no 6 kgs).
3. Nunca se usa punto final (7 kg, no 7 kg.).

1.3. Organización metrológica

La metrología se divide en distintas ramas que se especializan cada una de ellas en tareas diferentes en relación con la misma y que son:

- Metrología científica.
- Metrología legal.

- Metrología industrial.

1.3.1. Metrología científica

Es la rama de la metrología que se ocupa de la organización y desarrollo de los patrones de medida y de su mantenimiento. En España, de las realizaciones de las diferentes unidades de medida (los patrones nacionales). La capacidad para llevar a cabo de una forma práctica la definición de una unidad a través de la realización del correspondiente experimento físico, solamente la poseen contados laboratorios en el mundo, los de más alto nivel, una vez obtenidos los valores de los diferentes patrones primarios, la forma de comprobar la concordancia de sus resultados se lleva a cabo por medio de intercomparaciones entre ellos. Y su diseminación a los diferentes usuarios los ejecuta el Centro Español de Metrología (CEM) y sus laboratorios asociados que son los siguientes:

- ROA: Real Observatorio de la Armada.
- CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
- IO-CSIC: Instituto de Óptica.
- INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
- LCOE: Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia.
- ISCIII: Instituto de Salud Carlos III.

Estos laboratorios constituyen el vértice de la pirámide metrológica nacional y en ellos se mantienen y establecen los diferentes patrones primarios de las unidades de medida del Sistema Internacional (SI). La diseminación de las unidades de medida, asegurando una trazabilidad demostrable con respecto a los patrones, se lleva a cabo a través de los laboratorios de calibración, acreditados por la Entidad Nacional de Acreditación, (ENAC). Esta serie de laboratorios, junto con la propia (ENAC), forma parte del sistema que constituye la infraestructura española de metrología. Todos ellos trabajan en coordinación y bajo supervisión del Consejo Superior de Metrología (CSM), que es el órgano superior de asesoramiento del Estado español en materia metrológica, ya sea en los aspectos científicos, legales, técnicos o incluso históricos, y cuya secretaría le corresponde al Centro Español de Metrología, (CEM).

1.3.2. Metrología legal

La Metrología legal abarca todas aquellas tareas y actividades para las cuales se prescriben requisitos legales sobre mediciones, unidades de medida, instrumentos y métodos operativos, con el fin de garantizar un adecuado nivel de aseguramiento y fiabilidad de los resultados de medida en el marco regulador de la nación. La metrología legal, recoge las obligaciones legales relacionadas con este campo y el control legal que debe ser ejecutado por el gobierno, ya que son las autoridades gubernamentales quienes tienen la responsabilidad de ejercer el control sobre las actividades metroológicas en general, protegiendo a los consumidores y garantizándoles que lo que consumen, ya sea un combustible, un medicamento, o un servicio, es y está compuesto por las cantidades que se especifican, y pesa o mide o se corresponde fielmente con lo que los fabricantes ofertan. El Control Metroológico del Estado se aplica a los equipos o sistemas de medida. En el ámbito de la metrología legal las Administraciones públicas son las responsables de la designación de los organismos evaluadores de la conformidad en el campo de la metrología legal, utilizan para ello la herramienta de la acreditación (ENAC) y son los siguientes: Organismos Notificados, Organismos de Control Metroológico y Organismos Autorizados de Verificación Metroológica.

Organismo Notificado: entidad pública o privada que actúa en los procedimientos de evaluación de la conformidad, designado por las Administraciones públicas competentes en el ámbito de la Unión Europea.

Organismo de Control Metroológico: entidad pública o privada designada por una Administración pública española competente para la realización de los ensayos en aplicación de una normativa nacional y para emitir los certificados en relación con el control metroológico del Estado en la fase de comercialización y puesta en servicio.

Organismo Autorizado de Verificación Metroológica: entidad pública o privada designada por una Administración pública competente española para la realización y emisión de las certificaciones relativas y verificaciones periódicas y después de reparación o modificación.

1.3.3. Metrología industrial

La Metrología industrial es la parte de la metrología que tiene por finalidad garantizar la fiabilidad de las medidas que se realizan en la industria. La metrología aplicada tiene como objetivo la construcción y el mantenimiento de la

pirámide metrológica ininterrumpidamente. Su documentación se basa en certificados de calibración y en intercomparaciones entre los diferentes laboratorios de calibración e incluye como actividades las siguientes:

- Plan de Calibración de equipos de medición y ensayo.
- Gestión de los instrumentos y equipos metrológicos.
- Diseño de un producto o servicio para que cumpla determinadas especificaciones.
- Inspección de materias primas, procesos y productos a lo largo de la cadena productiva.

1.3.4. Organización Mundial de la Metrología y Metrología Legal

La *Western European Legal Metrology Cooperation* (WELMEC) fue creada en el año 1990, con un Memorándum de Entendimiento firmado por 15 países miembros de la Unión Europea y 3 de la (EFTA), su creación coincidió con la entrada en vigor de las directivas europeas denominadas «de nuevo enfoque», en 1995 el nombre de la organización fue modificado pasando a ser *European Cooperation in Legal Metrology*, aunque las siglas WELMEC se mantuvieron. Actualmente figuran como miembros asociados las entidades nacionales de metrología legal que han firmado acuerdos con la Unión Europea. Sus objetivos son:

- Incrementar la confianza mutua entre las autoridades europeas de metrología legal.
- Armonizar las actividades de metrología legal.
- Fomentar el intercambio de información entre las organizaciones involucradas.

El comité WELMEC está compuesto por Estados miembros y asociados, y observadores de EURAMET, EA y OIML.

EURAMET son las siglas de *European Association of National Metrology*, que es una alianza colaborativa formada por organizaciones metrológicas nacionales de estados miembros de la Unión Europea y de la EFTA, siglas de **European Free Trade Association** ('Asociación Europea de Libre Comercio'), con el propósito de alcanzar una alta eficacia colaborativa, coordinar y compartir actividades metrológicas y servicios.

AE, en inglés EA, son las siglas de *European cooperation for Accreditation* ('Asociación Europea de Cooperación para la Acreditación'). Es una asociación de cuerpos nacionales de acreditación que son reconocidos oficialmente por sus gobiernos nacionales para asesorar y verificar a las organizaciones que se encargan de servicios de certificación, verificación, inspección, es decir, de aseguramiento de conformidad. Otros organismos son EUROLAB (*European Federation of National Associations of Measurement, Testing and Analytical Laboratories*), que es una organización voluntaria que agrupa a unos 2000 laboratorios europeos y representa y promueve ante la Comisión Europea y otros organismos puntos de vista políticos y técnicos sobre metrología.

COOMET (*Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institution*) es la Organización Regional de Metrología de Eurasia, sus miembros colaboran en los campos de la metrología legal, científica y aplicada.

El SIM (Sistema Interamericano de Metrología) se constituyó mediante acuerdo entre las organizaciones metroológicas nacionales de 34 naciones miembros de la Organización de Estados Americanos (OEA). El SIM está organizado en cinco subregiones: (NORAMET) Norteamérica, (CARIMET) Caribe, (CAMET) América Central, (ANDIMET) países andinos, (SURAMET) Otros países de Sudamérica.

APMP (*Asia Pacific Metrology Programme*) es la Organización Metroológica Regional de Asia-Pacífico y el grupo regional que más tiempo lleva funcionando en el mundo.

AFRIMETS (*Intra-África Metrology System*) se creó en 2007 encabezada por SADC MET y auspiciada por la Nueva Asociación Económica para el Desarrollo de África (NEPAD) de la Unión Africana (UA). AFRIMETS tiene cinco organizaciones subregionales: (CEMACMET) África Central, (EACMET) Este de África, (MAGMET) países del Magreb, (SADC MET) Sur de África, (SOAMET) África Occidental, (NEWMET) formada por Egipto, Nigeria, Ghana, Etiopía, Libia y Sudán.

La Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) es una entidad intergubernamental creada en 1955 y que, desde su establecimiento hasta la actualidad, ha venido desarrollando una estructura mundial para proveer a sus miembros de guías y procedimientos de metrología para el establecimiento de requisitos nacionales en la fabricación y uso de instrumentos de medida y control en aplicaciones de metrología legal. La OIML está compuesta por Estados miembros y también por miembros corresponsales que actúan como meros

observadores. El organismo representante de España en esta organización es el Centro Español de Metrología (CEM), cuya actividad se podría resumir como promotora de la armonización de los procedimientos de la metrología legal en el mundo.

1.3.5. Organización Metroológica Nacional

La organización metroológica de una nación se pone de manifiesto a través del esquema piramidal que parte del patrón nacional de la unidad de que se trate, y que conduce por diseminación hasta los instrumentos de medida y control repartidos por talleres y centros de fabricación. Cualquier instrumento de medida, por modesto o sencillo que sea, ha de guardar relación con el patrón nacional de la magnitud correspondiente, a través de una cadena de calibraciones sucesivas que ascienden en el rango de precisión. Dicha pirámide siempre tendrá como vértice el patrón de mayor rango de la magnitud de la que se trate, y en la base se encontrarán los instrumentos de medida diseminados por los centros industriales y talleres tal como muestra la Figura 2.

Hay que tener en cuenta que la diseminación de los patrones conlleva necesariamente una pérdida de precisión, pero tal diseminación resulta imprescindible para poder hacer posible la satisfacción de las necesidades metroológicas en los centros productivos de una manera razonable.

El Centro Español de Metrología (CEM) es un organismo autónomo adscrito a la Secretaría de Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa del Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Fue creado en 1990 y es el máximo órgano técnico en el campo de la metrología en España. Al CEM le corresponde la custodia, conservación y diseminación de los patrones nacionales de las unidades de medida. Este organismo es el encargado de proporcionar soporte de trazabilidad a toda la red de laboratorios de calibración y ensayo e industria. Ejerce las funciones de la Administración General del Estado en materia de metrología legal. Es el organismo encargado de los proyectos de investigación y desarrollo en el ámbito metroológico, y también es el organismo encargado de la gestión del Registro de Control Metroológico y representa a España ante las organizaciones metroológicas internacionales.

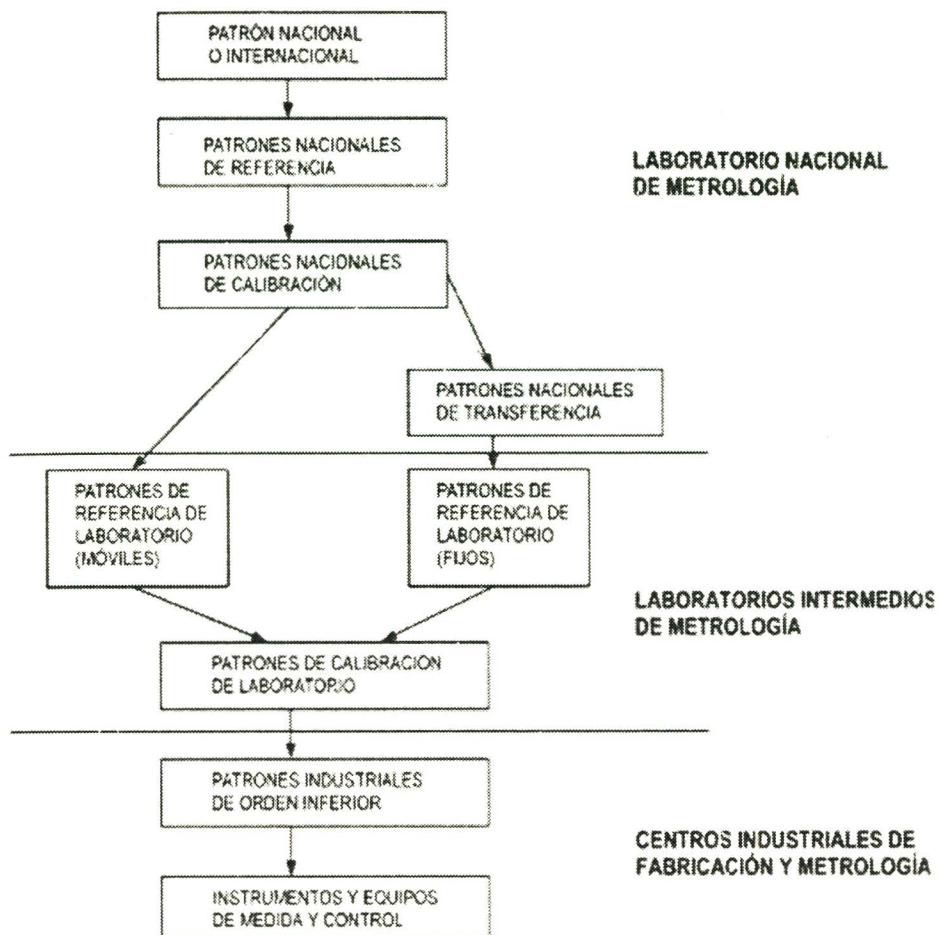


Figura 2. Relación metrológica de los instrumentos de medida con los patrones, diseminación de los patrones.

La Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) fue declarada en 2010 como único organismo dotado de potestad pública para otorgar acreditaciones de acuerdo con lo que establece el Reglamento Europeo. Su función es evaluar por medio de auditorías que los organismos evaluadores de conformidad, ya sean laboratorios, entidades de inspección, de certificación y verificadores, sean técnicamente competentes. El ENAC es el representante de España de la European cooperation for Accreditation (EA).

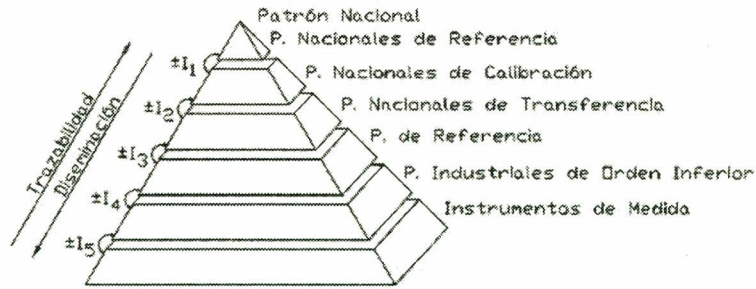


Figura 3. Pirámide que sintetiza la Organización Metrológica, la trazabilidad y la diseminación.

1.3.6. Patrones

El concepto de patrón ha ido evolucionando a lo largo del tiempo tanto en función de los conocimientos y posibilidades tecnológicas de cada época como del cumplimiento de las exigencias de cada momento. Una definición válida es la siguiente:

«Objeto o instrumento que permite materializar y reproducir una unidad de medida o bien un múltiplo o submúltiplo de ella».

Pero los patrones, desde el punto de vista operativo, pueden ser:

Patrones Primarios: también denominados fundamentales o básicos, son los que materializan y reproducen las unidades básicas del SI de acuerdo con su propia definición.

Patrones Secundarios: son los que materializan y reproducen unidades no básicas o unidades básicas por métodos diferentes a los de su definición. También se denomina patrón secundario en el sentido de trabajo metrológico a aquel cuyo valor se fija por comparación con un patrón primario y que se utiliza a su vez para la calibración de otros patrones o instrumentos.

Patrones de Transferencia: se denominan así los patrones que se emplean como intermediarios en la comparación de patrones.

Patrones de Referencia: son aquellos que poseen el mayor rango metrológico. Ocupan el vértice en la pirámide metrológica, bien sea de una nación, de un laboratorio o de un centro de medición y se utilizan para calibrar a los que están por debajo de ellos, ya se trate de otros patrones o de instrumentos de la magnitud que materializan.

Patrones de Trabajo: son patrones que se calibran con respecto al de referencia y son utilizados habitualmente para calibrar o verificar instrumentos o equipos de medida, siendo los de rango metrológico inferior de entre todos los citados.

En épocas anteriores, los patrones eran generalmente objetos y, por tanto, su invariabilidad era absoluta, su precisión baja y su diseminación también baja. Actualmente el desarrollo tecnológico permite que los patrones se puedan definir en función de fenómenos físicos reproducibles con el instrumental adecuado en cualquier lugar, lo que les proporciona una alta precisión, una alta diseminación y una alta invariabilidad. De hecho, el único patrón primario absoluto que se define aún como un prototipo (un objeto material) conservado en el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) es el patrón de masa (kilogramo) que ya posee más de un siglo de antigüedad, y probablemente será sustituido pronto por algún fenómeno atómico.

La pirámide metrológica representada en la Figura 3, además de mostrarnos la relación de cualquier instrumento con su correspondiente patrón, si se recorre desde el vértice hacia la base, ilustra la diseminación de los instrumentos de medida respecto al patrón, pero si el recorrido se realiza en sentido inverso, desde la base hacia el vértice, pone de manifiesto la trazabilidad de cualquier instrumento respecto a su patrón a través de una cadena ininterrumpida de calibraciones que poseen incertidumbres conocidas (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5).

1.3.6.1. Materiales de referencia

Se denomina Material de Referencia, (MR) en español y (RM) en inglés de 'Reference Material', según la norma ISO 30: 1992, a un «material o sustancia que tiene una o varias de sus propiedades suficientemente bien establecidas para calibrar un aparato o instrumento, validar un método analítico, o asignar valores a un material o sistema».

Cuando un Material de Referencia está certificado es un MRC (en inglés CRM: *Certified Reference Materials*) y, según la norma anteriormente citada, es un material de referencia, es decir, «un material o sustancia uno o más valores están certificados por un procedimiento técnicamente válido teniendo un certificado o un documento a este efecto, que es emitido por un organismo de certificación». La principal distinción entre un MRC y un MR reside en el certificado que va asociado al primero y emitido por un organismo competente. Dicho certificado no es simplemente un documento, sino la garantía de que el MRC es la mejor

referencia posible que puede obtenerse en la verificación de la trazabilidad de un método analítico, una calibración, o una asignación de valores, y en el que una o más de sus propiedades están certificadas mediante un procedimiento que establece su trazabilidad. Cada valor certificado ha de estar acompañado de su incertidumbre para un nivel dado de confianza. El término «material de referencia patrón» (SRM), siglas de Material Reference Standard, también se utiliza en algunos países como sinónimo de MRC. Mientras que un MR es, por definición de la guía ISO 30, «un material o sustancia de la cual una o varias propiedades están suficientemente bien definidas para permitir su uso para la calibración de un instrumento, la evaluación de un método de medida o la atribución de valores a los materiales».

Para que un material pueda ser considerado como MRC debe poseer una serie de propiedades básicas y otras adicionales:

Propiedades básicas:

- Exactitud.
- Trazabilidad.
- Homogeneidad.
- Estabilidad.

Propiedades adicionales:

- Precisión.
- Similitud.

Los MRC se preparan en lotes, y los valores de la propiedad o propiedades que les otorgan tal condición se determinan dentro de los límites de las incertidumbres declaradas por medio de medidas, realizadas sobre muestras representativas del lote completo. Debe tenerse en cuenta que bajo la denominación MRC coexisten productos muy diferentes utilizados para verificaciones metrológicas no únicamente concernientes al campo de la metrología dimensional, sino a la metrología en general en cualquiera de sus muchos y variados aspectos y campos de aplicación. El campo de aplicación de los mismos abarca:

- Calibración de instrumentos de medición.
- Verificación en el tiempo de deriva de un instrumento.

- Verificación de la fiabilidad de un método de medición.
- Estimación de intervalos de confianza en un método de medición.
- Estimación de los límites de detección de un método de medición.

Los materiales de referencia de interés general para los análisis y ensayos siderúrgicos, metales puros, son los siguientes: aceros no aleados, poco aleados, muy aleados, materias primas, subproductos, aleaciones especiales, otros MR metalúrgicos para la siderurgia. También, los materiales de referencia no ferrosos.

1.3.7. Laboratorios de metrología y ensayos

Cuando se desea materializar físicamente un sistema integrado de calidad industrial, es necesario realizar pruebas, medidas y ensayos, que han de tener lugar en laboratorios de metrología y ensayos. Tales laboratorios deben poseer la condición de ser «trazables», es decir, han de disponer de procedimientos que permitan las calibraciones de los distintos instrumentos de medida, así como el ajuste y la puesta a punto de las máquinas de ensayo.

La existencia de laboratorios de ensayos y calibración resulta cada vez más necesaria por el gran número de reglamentos técnicos en vigor y por las verificaciones que estos conllevan, existiendo una red de laboratorios de ensayo y una red de laboratorios de calibración a la que pueden adherirse mediante acreditación, aquellos laboratorios que lo soliciten y que cumplan con los requisitos exigibles para ello.

La Norma «Requisitos generales relativos a la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración» contiene las condiciones que un laboratorio debe reunir si desea mostrar su competencia técnica y su capacidad para producir resultados técnicamente válidos. La citada norma especifica que «cada elemento del equipo y su soporte lógico utilizados para realizar ensayos que influyan en los resultados deben llevar en la medida de lo posible, una identificación única» y que «el laboratorio debe establecer programas de calibración para las magnitudes o valores clave de los instrumentos».

La necesidad de la existencia de un sistema de calibración nacional se estableció mediante la promulgación del Real Decreto 2584/1981 y su creación y estructura se desarrolló por orden de 21 de junio de 1982.

En el preámbulo de dicha orden ministerial se indica:

«Los fabricantes industriales y los laboratorios de ensayo requieren la calibración del conjunto de sus instrumentos de medida para asegurar que se encuentran dentro de las tolerancias respecto de su grado de precisión. Esto permitirá disminuir, en lo posible, los errores de medición, acotar el valor final de los mismos y asegurar la trazabilidad de las medidas a las unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades (SI)».

Los laboratorios de calibración, además de prestar labores de apoyo a los laboratorios de ensayo de cara al Sistema Integrado de Calidad Industrial (SICI), cumplen otras funciones, tales como proporcionar servicios de calibración a otros laboratorios, a las empresas productoras y realizar mediciones para los fabricantes y los organismos industriales.

1.3.7.1. Ensayos

Un ensayo, según definición dada por la Norma Europea ISO/IEC 17025:2005 (2), es «la operación técnica consistente en determinar una o varias características de un producto, proceso o servicio considerado, de acuerdo con un modo operativo especificado».

El objetivo de un ensayo consiste en comprobar si ese producto, elemento o material cumple con las especificaciones requeridas respecto a una o varias características. El número de ensayos existentes aprobados es muy variado y pueden cubrir campos muy diversos, siendo susceptibles de ser realizados con diferentes niveles de exactitud. Los ensayos pueden ser llevados a cabo en laboratorios que a su vez pueden ser de primera, segunda o tercera parte. Se denominan laboratorios de primera parte a los de los fabricantes, los de segunda parte son los laboratorios del cliente y los de tercera parte son independientes de ambos, fabricantes y clientes.

Para que los resultados de los ensayos posean validez y rigor metrológico deben llevarse a cabo de acuerdo con las normas o procedimientos que establecen el método aplicable, los valores imponibles a los parámetros del ensayo, las tolerancias admisibles para las magnitudes de influencia y los intervalos de valores admisibles de las variables que permiten concluir el cumplimiento o incumplimiento de las características ensayadas. En los ensayos se suelen utilizar los Materiales de Referencia, (MR) y (MRC), que actúan como «patrones» de resultados de comportamiento de una característica determinada del material.

La metrología, en general, es la responsable de establecer las bases que posibilitan la comparación de los resultados de ensayos. Esto se lleva a cabo en los diferentes niveles de responsabilidad metrológica al proporcionar desde la definición de las unidades de medida, hasta la trazabilidad e incertidumbre que deben ir asociados a los resultados de cualquier medición.

1.3.8. Áreas metrológicas

Dentro de la metrología existen diversas áreas. La citada orden ministerial establece las siguientes:

1. Dimensiones.
2. Tiempo y frecuencia.
3. Masa y fuerza.
4. Presión y vacío.
5. Temperatura.
6. Óptica e iluminación.
7. Acústica.
8. Electricidad.
9. Radiofrecuencia.
10. Radiación ionizante.
11. Otras áreas.

1.3.9. La metrología en la fabricación

La metrología geométrica interviene en los procesos industriales, cobrando en ellos un importante papel en cualquier sistema de calidad aplicado a fabricación, por lo que el manejo y dominio de conceptos tales como trazabilidad, incertidumbre, calibración y el conocimiento de la organización metrológica resultan imprescindibles.

Por otra parte, la globalización de los mercados y el desarrollo tanto social como tecnológico hace que los fabricantes y consumidores se interesen por la mejora y la actualización de sus sistemas de calidad, ya que es requisito valorable y cada vez con mayor frecuencia exigible por parte de cualquier posible cliente. Toda empresa o taller que se dedique a la fabricación de componentes, conjuntos o sistemas, precisa contar con una metrología organizada, que permita conocer las incertidumbres de medida de los instrumentos y equipos de medición que

intervienen en los procesos de control. Además, la componente metrológica debe cuidarse de una forma muy especial, ya que las mediciones constituyen la base de decisiones a adoptar en los planes de calidad. En tal sentido se puede observar una confluencia de criterios y planteamientos en diversos cuerpos normativos como en las normas ISO 9000 (66900 en UNE), concretamente la norma ISO 9000, que en su preámbulo establece que «el papel de la función metrológica consiste en dominar la aptitud en el empleo de todos los medios de medida utilizados en la empresa y a dotarlos de aseguramiento», y otras como la (AQAP) de la OTAN y las normas europeas (EN) de la series 29000 y 45000.

La metrología geométrica a menudo se confunde con la metrología dimensional, que es solo una parte de esta y que posee una magnitud característica que es la longitud y de la cual derivan otras como la superficie y el volumen. Pero la metrología geométrica abarca muchos más aspectos que el dimensional, ya que estudia las formas, orientaciones, situaciones y oscilación de las piezas. La suma de todas estas actividades es lo que constituye la **Macrogeometría**. Otra parte de la metrología geométrica es la **Microgeometría**, que se ocupa del estudio de las características superficiales de las piezas. En la Tabla 7 se indican las diferentes áreas de actuación de ambas partes.

METROLOGÍA GEOMÉTRICA					
Macrogeometría					Microgeometría
Dimensio- nes	Formas	Orientaciones	Situaciones	Oscilación	Características superficiales
Longitud	Rectitud	Paralelismo	Posición	Radial	Perfil completo
Ángulo	Planitud	Perpendicula- ridad	Concentri- cidad	Axial	Ondulación
	Redondez	Inclinación	Simetría		Rugosidad
	Cilindricidad				
	De cualquier línea				
	De cualquier superficie				

Tabla 7. Metrología geométrica, ramas y áreas de actuación.

1.3.9.1. Actividades metrológicas

La metrología en la práctica cotidiana de un centro de fabricación puede abarcar actividades muy variadas, algunas de las cuales se citan a continuación para proporcionar una idea de conjunto.

La metrología atañe no solo a las mediciones y controles realizados sobre las piezas mecánicas durante el proceso de fabricación, sino también a las mismas tras haber sido fabricadas, en el sentido de controlarlas, verificarlas y clasificarlas, e implica además el planeamiento de todos los controles a los que han de ser sometidos los instrumentos y equipos de medida y también los controles de las máquinas-herramientas que intervienen en el proceso de fabricación y de las máquinas de ensayos en el caso en que estos se realicen. Las actividades que a continuación se relacionan forman parte de la metrología de cualquier empresa o taller de fabricación:

- Confección del plan metrológico de la empresa, plan de calibración permanente.
- Gestión de los equipos de medición.
- Mantenimiento de registros que garanticen el cumplimiento del plan metrológico y avalen la trazabilidad.
- Controles periódicos, estáticos y dinámicos de máquinas-herramientas.
- Diseño de piezas y previsión de controles y notaciones de carácter metrológico.
- Diseño y realización de los controles metrológicos a realizar durante el proceso productivo.
- Diseño y realización de los controles metrológicos sobre productos ya fabricados.
- Realización de ensayos (destructivos y no destructivos) y resultados.

1.4. Conceptos generales

1.4.1. Trazabilidad

La trazabilidad es, por definición recogida en el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), la «propiedad del resultado de una medida o de un patrón por la cual el resultado permite relacionarlo con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales

contribuye a la incertidumbre de medida». Véase la Figura 4, que indica la relación metrológica de los instrumentos de medida con los patrones, es decir, las calibraciones en las que se basa la trazabilidad de las medidas obtenidas con dichos instrumentos.

La correcta trazabilidad de un laboratorio metrológico es garantía de los resultados que este proporciona y de las incertidumbres que asigna a los mismos, y es también la base fundamental para su posible acreditación como miembro del Servicio Oficial de Calibración de la nación en la que se halla situado.

En el caso de los centros de fabricación, la trazabilidad de sus instrumentos de control es también la garantía de la trazabilidad de sus productos.

La trazabilidad se consigue por medio del mantenimiento de un **plan de calibración permanente** y también por medio de la periódica participación en intercomparaciones de medidas.

1.4.2. Calibración

Se entiende por calibración al «conjunto de operaciones que establecen, en unas condiciones especificadas, la relación que existe entre los valores indicados por un instrumento o sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada, y los correspondientes valores conocidos de una magnitud medida». VIM (9).

La calibración establece una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas, obtenidas a partir de los patrones de medida y de las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas, para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

Por tanto, para calibrar un instrumento es preciso disponer de un patrón que proporcione el valor «convencionalmente atribuido»⁽¹⁾ al mismo, y se van realizando sucesivamente las comparaciones cada vez ascendiendo a patrones de mayor precisión y más próximos al patrón de referencia a través de una cadena de calibraciones. Se establece así la trazabilidad del instrumento y, por tanto, también la de las medidas que con él se efectúen, al poder otorgarles tanto al instrumento como a las mediciones una incertidumbre conocida.

(1) La utilización de la terminología «valor convencionalmente atribuido» sustituye a lo que en algunos textos continúa denominándose incorrectamente como «valor verdadero». Esta denominación está desaconsejada y ha sido eliminada en el (*GUM*), pues en metrología se parte del principio que enuncia que el «valor verdadero» de una magnitud es siempre desconocido.

La determinación de la incertidumbre de las medidas de un instrumento no puede hacerse con rigor metrológico si el instrumento no se calibra periódicamente.

La finalidad de la calibración es poner de manifiesto las discrepancias que existen entre el instrumento o el patrón que se está calibrando «el calibrando» y un elemento de referencia con características metrológicas estables y conocidas.

La calibración es pues, una operación imprescindible para el establecimiento de la trazabilidad de los instrumentos industriales de medida, aunque la información de la calibración debe ser complementada por otra relacionada con las condiciones de utilización de dicho instrumento o patrón, para poder asignar una incertidumbre final a los resultados de medida.

La calibración se efectúa realizando reiteradas medidas con el instrumento sobre un patrón conocido, y utilizando el instrumento a calibrar en su modo normal de trabajo.

Es de suma importancia que el elemento que se calibre, el «calibrando» durante el proceso de calibración, trabaje en la misma forma en la que lo hace en el día a día. Si el instrumento cuando está siendo calibrado funciona en condiciones diferentes a las que se le exigen habitualmente, la calibración, al otorgarle una incertidumbre, es decir, una corrección al instrumento, lo estaría haciendo de forma inadecuada, ya que la otorgación de una incertidumbre determinada que se asocia a un instrumento se basa en la forma en la que el instrumento se utiliza en el centro de fabricación o en el laboratorio.

El resultado de una calibración se recoge en un documento que suele denominarse **certificado de calibración**.

La calibración, no obstante, puede ser expresada de diferentes formas:

- Declaración de calibración.
- Función de calibración.
- Curva de calibración.
- Tabla de calibración.

Para cada instrumento, equipo de medida, patrón e incluso accesorios, las normas correspondientes definen y especifican el adecuado procedimiento de calibración, es decir, la operativa que le es aplicable. Los requisitos de ISO 9000 en relación a equipos de inspección, medición y ensayo y los documentos adicionales

como UNE-EN 30012-1:1994, codificado como ISO 10012-1, detallan los requisitos de calibración y medida necesarios.

La calibración resulta imprescindible ya que nos permite:

- Garantizar la trazabilidad del laboratorio o centro de medición y, por tanto, las mediciones que en él se realicen mediante el establecimiento y mantenimiento del Plan de Calibración y la participación en intercomparaciones de medida.

La calibración es, pues, un conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones precisas correspondientes a la magnitud a medir.

Hay que tener en cuenta que la calibración suministra una información que se puede utilizar para:

- Aplicar correcciones o ajustes en las indicaciones del instrumento o equipo de medición.
- Aceptar los errores del instrumento o rechazarlo.

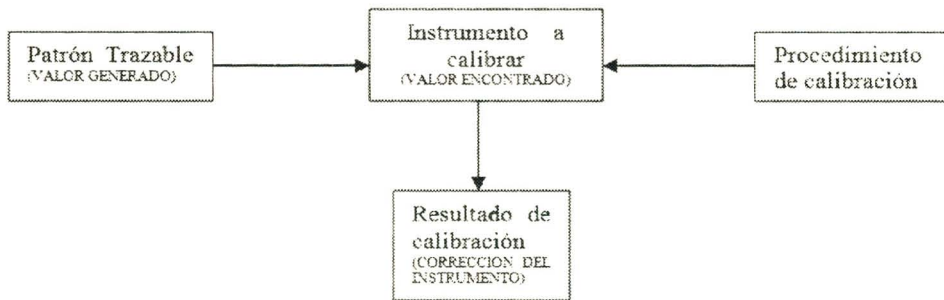


Figura 4. Proceso de calibración.

Cadena de calibración: es la sucesión de calibraciones de patrones e instrumentos que va desde la definición de unidad, situado en el vértice de la pirámide metrológica, hasta los instrumentos diseminados en los centros de trabajo, en la base de dicha pirámide. Cuando se pone en relación la unidad nacional o internacional de la magnitud correspondiente con los instrumentos con los que cotidianamente se mide, a través de una serie de calibraciones con incertidumbres conocidas, se está reproduciendo la **Diseminación** de dicha unidad. Si el camino es recorrido en sentido inverso, desde la base hasta el origen, es decir, desde un instrumento cualesquiera hasta la definición de la unidad

nacional o internacional de la magnitud correspondiente, lo que se reconstruye es la propia **Trazabilidad** de dicho instrumento.

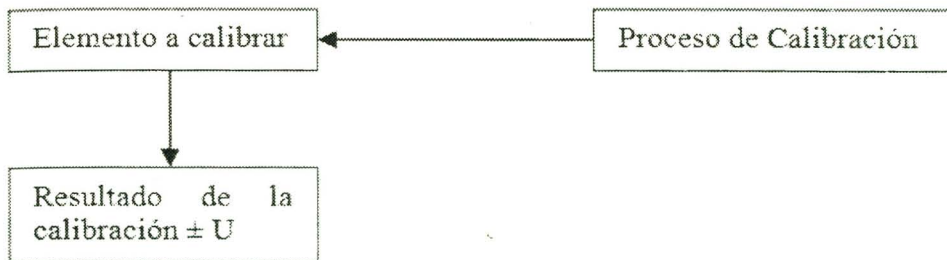


Figura 5. La Cadena de Calibración pone en relación instrumentos de diferentes niveles metrológicos.

1.4.2.1. Planes de calibración

En metrología denominamos Plan de Calibración a la organización y planificación de las calibraciones del conjunto de patrones, instrumentos de medida y accesorios existentes en un laboratorio o en un taller de fabricación. El Plan de Calibración debe establecer el método y la frecuencia con que se llevarán a cabo las calibraciones, entre otros temas que han de documentarse para dejar constancia de su cumplimiento y proporcionar información sobre la organización metrológica, los instrumentos y equipos, los niveles que ocupan, los patrones con los que se calibran, la relación del centro o laboratorio con los laboratorios externos, las condiciones de trabajo de los diferentes instrumentos y las incertidumbres obtenidas. Esta forma sostenida de proceder garantiza y asegura la trazabilidad de las medidas.

La necesidad de contar con un Plan de Calibración no es propia tan solo de los grandes laboratorios de metrología de alto nivel, sino de cualquier centro de fabricación aunque sea pequeño, ya que únicamente la existencia de un Plan de Calibración permanente, las evidencias de su cumplimiento y el conocimiento de la incertidumbre de cada instrumento o patrón, posibilita la toma de decisiones racionales sobre su aptitud metrológica en el control de determinadas cotas y la asignación de la correspondiente incertidumbre que ha de ir asociada a las mediciones de precisión.

Los documentos en los que se sustenta un Plan de Calibración son los siguientes:

1. Carta de trazabilidad.
2. Diagrama de niveles.
3. Fichero de instrucciones.
4. Etiquetas de calibración.
5. Archivo de resultados.
6. Registro general, inventario de instrumentos.

1. Carta de trazabilidad: es la representación gráfica de la cadena de laboratorios que sirven de enlace entre el laboratorio o centro de trabajo del que se trata y el laboratorio primario nacional, o incluso reflejan su relación metrológica con laboratorios internacionales. La Carta de Trazabilidad no precisa especificar los grupos de cada diagrama de niveles en cada laboratorio.

Al tratar el nivel correspondiente a los Laboratorios Primarios Nacionales, la trazabilidad se convierte en intercomparación de patrones.

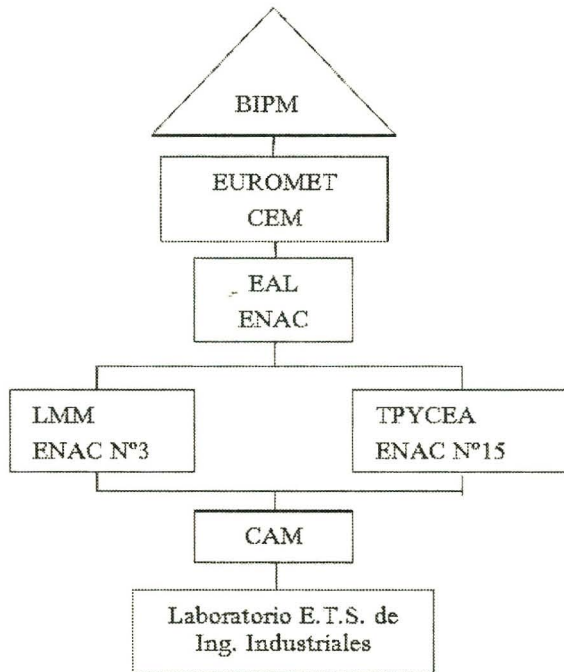
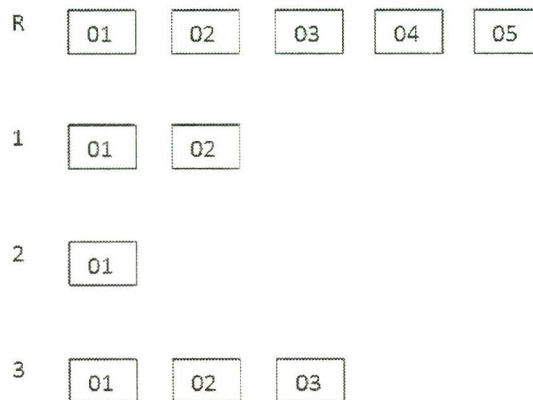


Figura 6. Ejemplo de carta de trazabilidad de un laboratorio metrológico.

2. Diagrama de niveles: el establecimiento de un Plan de Calibración en un centro conlleva la necesaria ordenación de todos los instrumentos, patrones y

accesorios con los que este cuenta, organizados por niveles de calibración. La condición o criterio para reunir en un mismo grupo o nivel del diagrama a diversos instrumentos es que el grupo lo formen instrumentos que sean calibrados por otros de niveles superiores, nunca inferiores y tampoco del mismo nivel. Una regla práctica consiste en colocar cada grupo en el nivel más elevado posible, para facilitar de este modo posibles modificaciones que pudieran producirse al ampliar e introducir nuevos grupos. Se actúa así, con la excepción de los componentes situados en el último nivel. Este es, por lo general, el más numeroso y está formado por aquellos grupos que tras haber sido calibrados no intervienen en ninguna otra calibración interna del laboratorio, si acaso en la calibración o medición de patrones o instrumentos de laboratorios o de centros de rango metrológico inferior.



El diagrama de niveles debe ir acompañado para cada instrumento y nivel de las correspondientes flechas de entrada que indican, en la parte superior del recuadro, los patrones o instrumentos con que cada uno de ellos ha sido calibrado, de flechas de salida, en la parte inferior del recuadro, indicando a qué instrumentos calibran, y pueden también llevar a izquierda y a derecha flechas de entrada y salida que indican respectivamente los instrumentos que participan en su calibración y los instrumentos en cuya calibración participa el instrumento citado si así ocurriera, y, por supuesto, deben adjuntarse los valores de las incertidumbres correspondientes junto a todas ellas. Dentro de cada uno de los recuadros debe figurar la denominación codificada del instrumento según el Sistema de Calibración Industrial (SCI).

Nivel R

01 Bloques patrón.

02 MMC, medidora de tres coordenadas.

03 Perfilómetro.

04 Mesas de planitud.

05 Patrones de vidrio planos paralelos.

Nivel 1

06 Patrones de diámetros interiores.

07 Micrómetros de interiores de tres contactos.

Nivel 2

08 Micrómetros de exteriores de platillos.

Nivel 3

09 Gramiles.

10 Calibres, pies de rey.

11 Micrómetros de exteriores.

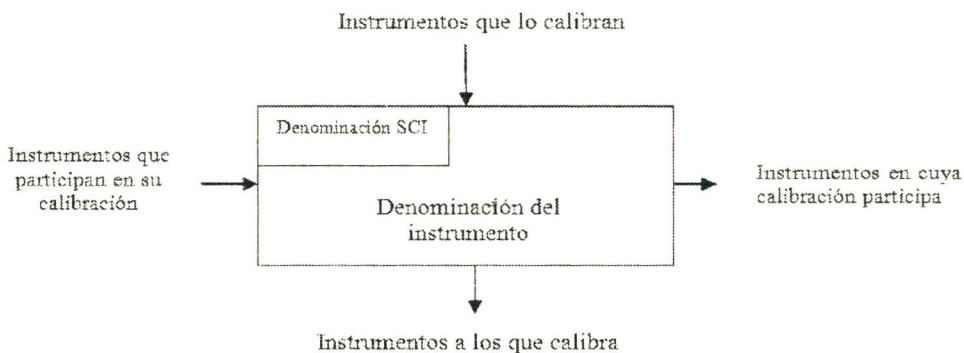


Figura 7. Información que puede contener un diagrama de niveles.

Existe un criterio que debe regir cualquier plan de calibración y es el siguiente: ***cualquiera de las cadenas de calibración de un diagrama debe ser descendente a través de los niveles, sin que se produzcan saltos atrás y sin que se cierre sobre sí misma.*** El cumplimiento de este criterio nos asegura que la calibración de cualquier elemento se realice por medio de otro de precisión más alta, garantizando la trazabilidad de los resultados.

Nivel de referencia: es el llamado nivel R o Nivel 0, es el más elevado del diagrama y está formado por aquellos elementos que han de ser calibrados en otro laboratorio de rango metrológico superior, y cuyas incertidumbres certificadas sirven de punto de partida para calibrar al resto de los instrumentos. Los patrones e instrumentos de este nivel en sus flechas de entrada indican la denominación del laboratorio o centro externo al que pertenecen los patrones con los que han sido calibrados.

La condición que cumple el diagrama de niveles de calibración es alcanzar el objetivo de contar con un diagrama descendente a través de los niveles. La coherencia del laboratorio es mayor cuanto menor sea el número de grupos de nivel de referencia respecto a la totalidad del diagrama.

Diagramas de trazabilidad interna: se obtienen partiendo de los diagramas de niveles de cada uno de los grupos de calibración, materializando las relaciones con todos los niveles superiores que intervienen en la calibración de un elemento.

3. Fichero de instrucciones: está constituido por una colección de fichas numeradas como en el diagrama, cada una de las cuales contiene la relación de instrumentos que incluye y el detalle de las instrucciones necesarias para llevar a cabo el proceso de calibración y el cálculo de la incertidumbre de cada uno de los elementos incluidos en el mismo.

La información mínima de cada proceso debe incluir al menos los siguientes puntos:

- Campo de aplicación.
- Codificación del instrumento.
- Descripción detallada del procedimiento de calibración.
- Criterios para la elección de los períodos de calibración.
- Resultados, incertidumbre final.
- Información complementaria: calidades.
- Bibliografía.

4. Etiquetas de calibración: son simples etiquetas adhesivas en las que se refleja la fecha en la que se ha efectuado la calibración y la fecha en la que ha de realizarse la siguiente calibración. Se coloca sobre cada uno de los instrumentos incluidos en el Plan de Calibración y en él deben figurar los siguientes datos:

- Fecha de calibración.
- Fecha de la próxima calibración.
- Identificación del elemento, según SCI.
- Número de serie, modelo.
- Incertidumbre asignada.

ENAC)		Laboratorio de	
LABORATORIO N°		Metrología E.T.S de	
		Ing. Industriales	
INSTRUMENTO			
Micrómetro de Exteriores (0-25 mm)			
N° DE SERIE	820041	FECHA	20/10/2015
N° DE INFORME	01425	PRÓXIMA CALIBRACION	15/08/2016

Figura 8. Etiqueta de calibración.

5. Archivo de resultados: está constituido por un registro en un soporte capaz de almacenar la información suministrada por las operaciones de calibración internas. Consiste en una serie de carpetas numeradas según el diagrama de niveles en las que se recogen los resultados de la última calibración así como otros datos que se consideren relevantes en relación con cada equipo o instrumento.

6. Calendario de calibración: es un calendario en el que se especifican los períodos de calibración para cada instrumento o equipo, generalmente expresados en meses, en los que todos y cada uno de los instrumentos y equipos deben ser calibrados en intervalos basados en diferentes criterios que se citan a continuación:

- Recomendaciones de las normas para cada instrumento.
- Grado de precisión del instrumento.
- Frecuencia de utilización, condiciones de trabajo.
- Estabilidad y deriva del elemento.
- Rentabilidad económica de la calibración.

Tras varias calibraciones, generalmente después de tres, podemos reconsiderar el período inicial estipulado y modificarlo, espaciándolo o intensificándolo en función de los valores obtenidos.

7. Registro general, inventario: es un libro de registro de entrada de instrumentos en el que constan todos los instrumentos o elementos incluidos en el Plan de Calibración del laboratorio o centro, y que proporciona información de gran interés, que nos permite, por ejemplo:

- Conocer qué instrumentos, patrones y accesorios están incluidos en el plan de calibración.
- Conocer el historial de cualquier instrumento o equipo de medición incluido en el plan: fecha de compra, calibraciones, reparaciones, etc.
- Saber qué equipos e instrumentos se han ido incorporando.
- Saber si existen instrumentos que no se encuentran en condiciones de funcionamiento y comprobar si efectivamente están dados de baja.

Constituye un documento de control de los instrumentos y equipos de medida y la codificación de los mismos conviene hacerla siguiendo el código del Sistema de Calibración Industrial.

A01. PATRONES DE LONGITUD.

A01.01 Lámparas patrón de longitud de onda.

A01.02 Bloques patrón longitudinales.

A01.03 Accesorios para bloques patrón.

A01.04 Columnas de bloques patrón.

A01.05 Barras patrón de extremos.

A01.06 Patrones cilíndricos de diámetro.

A01.07 Bolas patrón.

A01.08 Reglas patrón de trazos.

A02. MEDIDORES DIRECTOS DE LONGITUD.

A02.01 Reglas de trazos. Cintas métricas.

A02.02 Pies de rey.

A02.03 Sondas de regla.

A02.04 Medidor de una coordenada horizontal.

A02.05 Medidor de una coordenada vertical.

A02.06 Medidor de dos coordenadas.

A02.07 Medidor de tres coordenadas. MMC. Robots.

A02.08 Cabezas micrométricas.

A02.09 Sondas micrométricas.

A02.10 Micrómetros de exteriores.

A02.11 Micrómetros de interiores de dos contactos.

A02.12 Micrómetros de interiores de tres contactos.

A02.13 Micrómetros especiales.

A02.14 Calibres de límites lisos.

A03. COMPARADORES DE LONGITUD Y ACCESORIOS.

A03.01 Comparadores mecánicos.

A03.02 Comparadores neumáticos.

A03.03 Comparadores electrónicos.

A03.04 Comparadores ópticos.

A03.05 Soportes de comparador.

A03.06 Accesorios de comparadores.

A03.07 Montajes multicota.

A03.08 Banco verificador de comparadores.

A03.09 Otros comparadores.

A04. PATRONES ANGULARES.

A04.01 Polígonos patrón.

A04.02 Bloques patrón angulares.

A05. MEDIDORES DE ÁNGULOS.

A05.01 Transportador.

A05.02 Platos divisores y/o inclinables.

A05.03 Reglas y mesas de senos.

A05.04 Niveles. Plomadas.

A05.05 Autocolimador.

A06. MEDIDORES DE RECTITUD, PLANITUD, ALINEACIÓN Y PERPENDICULARIDAD.

A06.01 Reglas de rectitud, reglas biseladas, reglas de cantos, reglas de control, reglas de rectitud, reglas paralelas, regla triangular.

A06.02 Escuadras de perpendicularidad, escuadras de montaje.

A06.03 Cilindros de perpendicularidad.

A06.04 Patrones de planitud de vidrio, calibres de cristal, calibres plano-paralelo, disco interferencial.

A06.05 Mesas de planitud, mármoles, plano de referencia.

A06.06 Palancas con comparador.

A06.07 Anteojos de alineación.

A06.08 Reglas ópticas.

A06.09 Otros medidores.

A07. MEDIDORES DE REDONDEZ.

A07.01 Patrón de redondez.

A07.02 Medidora de redondez.

A08 MEDIDORES DE ROSCAS.

A08.01 Patrones de micrómetro de roscas.

A08.02 Calibres de límites para roscas.

A08.03 Micrómetros de roscas.

A08.04 Medidores de paso de roscas.

A08.05 Medidores de diámetro de roscas.

A08.06 Galgas para roscas.

A09. MEDIDORES DE ENGRANAJES.

A09.01 Pie de rey de engranajes.

A09.02 Medidor de perfil de engranajes.

A09.03 Medidor de concentricidad de engranajes.

A09.04 Medidor de concentricidad de engranajes por soldadura.

A09.05 Galgas y accesorios para engranajes.

A10. MEDIDORES DE FORMAS EN GENERAL.

A10.01 Perfilómetros.

A10.02 Microscopios.

A10.03 Proyectores de perfiles.

A10.04 Plantillas de forma, retículos.

A10.05 Calibres de límites de forma.

A11. MEDIDORES DE CALIDAD SUPERFICIAL.

A11.01 Patrones de rugosidad.

A11.02 Comparador visotáctil de rugosidad.

A11.03 Microscopio de corte óptico.

A11.04 Rugosímetro de palpador.

A11.05 Rugosímetro interferencial.

A11.06 Reflectómetro.

A12. APARATOS TOPOGRÁFICOS, GEODÉSICOS Y DE NAVEGACIÓN.

A12.01 Medidores de ángulos, distancias, superficies, volúmenes.

A12.02 Ruedas métricas.

A12.03 Taquímetros.

A12.04 Planímetros.

A12.05 Medidores de volumen.

A12.06 Medidores de nivel.

A12.07 Medidores de espesor.

A13. CAPTADORES Y MEDIDORES GEOMÉTRICOS PARA TRATAMIENTO ELECTRÓNICO.

A13.01 Captadores lineales resistivos, inductivos y capacitivos, ópticos y magnéticos.

A13.02 Captadores rotativos y resistivos, inductivos, capacitivos, ópticos y magnéticos.

A13.03 Niveles electrónicos.

A13.04 Palpadores y detectores de contacto electrónicos.

A13.05 Ordenadores. Autómatas de medida, programas.

A13.06 Medidores ligados a la clasificación de piezas.

A14. VARIOS.

A14.01 Muebles y estuches. Herramientas especiales.

A14.02 Componentes mecánicos, soportes, trípodes, uves, entrepuntos, etc.

A14.03 Accesorios electrónicos, neumáticos, ópticos, etc.

A14.04 Materiales para limpieza y mantenimiento.

A14.05 Consumibles, rotuladores, gráficos, etc.

A14.06 Diversos.

Tabla 8. Sistema de Calibración Industrial, codificación para instrumentos metrológicos.

1.4.2.2. Certificados de calibración

Un certificado de calibración es un documento en el que se registra que en una fecha determinada un instrumento de medida, o un equipo concreto ha sido sometido a una verificación de error y en el que dicho error (al que denominamos incertidumbre) se hace constar asociándolo al mismo. Sin embargo, existen diferentes tipos de certificados de calibración, que a menudo suscitan dudas y que son los siguientes:

- Certificado del fabricante.
- Certificado Acreditado (ENAC).
- Certificado Trazable a (ENAC).

Certificado del fabricante: cuando se adquiere un instrumento de precisión, o un equipo de medición, el fabricante suele adjuntar, no es obligatorio, pero resulta usual, un certificado de calibración del mismo, en el que entre otros datos se hace constar, además de la fecha de calibración, la incertidumbre hallada, la identidad de la persona que realizó la calibración, los patrones con los que se calibró y la evidencia de la trazabilidad que dichos patrones poseen. El certificado de calibración puede ser utilizado inicialmente para atribuirle la incertidumbre a un instrumento recién adquirido que hemos de poner en uso de inmediato, hasta la siguiente calibración, no obstante, conviene realizar una calibración propia para contrastar la suministrada por el fabricante.

Certificado Acreditado (ENAC): es el certificado emitido por un laboratorio acreditado (ENAC). En ocasiones es preceptivo contar con él, dependiendo de la normativa o de la legislación aplicable o incluso por ser requisito impuesto por el cliente. De no ser así no sería necesario.

Certificado Trazable (ENAC): es el certificado más comúnmente utilizado en la industria, significa que la calibración de los instrumentos de medida se ha realizado empleando patrones, que a su vez han sido calibrados por un laboratorio acreditado (ENAC). En estos casos tenemos que recopilar los diferentes certificados de las calibraciones (ENAC) de **todos y cada uno** de los elementos que hayan intervenido en la calibración. Cada empresa puede acometer por su cuenta la calibración de sus instrumentos de control metrológico siempre que cuente con un procedimiento establecido para ello y con los patrones (ENAC) necesarios para llevarla a cabo.

Solamente a través del cumplimiento de los requisitos y la normativa en cuanto a calibraciones, control de documentación, seguimiento de los equipos de medida, registros de formación del personal y planificación de contactos con los proveedores se podrá obtener la certificación. La certificación se define como «la actividad que permite establecer la conformidad de una determinada empresa producto o servicio con los requisitos definidos en normas o especificaciones técnicas». LEY 21 / 1992, de 16 de julio, de Industria. La certificación a su vez puede ser: voluntaria para productos, sistemas de calidad, servicios, etc., o bien obligatoria y derivada de reglamentos técnicos.

Verificación: el término suscita en ocasiones dudas o confusiones por lo que conviene exponer su definición. Por tanto, verificación es «la confirmación por examen y aporte de pruebas tangibles de que las exigencias especificadas han sido satisfechas». (ISO 8402 Gestión de la Calidad y aseguramiento de la Calidad. Vocabulario anulada y sustituida por ISO 9000:2000).

La verificación conlleva por lo tanto:

- Haber establecido previamente cuáles son los criterios de aceptación.
- Haber obtenido los resultados, que pueden haberse logrado mediante calibración o por otros métodos.
- Analizar el cumplimiento de los criterios de aceptación.
- Haber establecido cuándo los resultados que se obtengan los cumplen.

1.4.3. Errores e incertidumbres

1.4.3.1. Incertidumbre de medida

Incertidumbre en general significa duda. Cuando este concepto se aplica al resultado de una medición, indica dudas sobre el valor de la misma, pero la incertidumbre de medida, sirve para acotar el posible error, y nos indica que el valor convencionalmente atribuido al resultado de una medición, que es siempre desconocido, se encuentra dentro de un cierto intervalo. El término *incertidumbre* va siempre asociado a la medición de magnitudes.

La incertidumbre de medida se define como el «parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando».

El término «incertidumbre» aplicado a la metrología consiste en la estimación del posible error en una medición, al que denominaremos grado de incertidumbre.

El valor verdadero de una magnitud a medir es siempre desconocido, debido a las imperfecciones que inevitablemente van asociadas al desarrollo de cualquier actividad humana, tanto en lo referente a la propia construcción del instrumento como a la operativa inherente a la medición, con lo cual el resultado de cualquier medición es siempre aproximado y solamente puede aspirarse a determinar un valor en cuyo entorno se sitúe con gran seguridad el valor de la magnitud medida, que en realidad debe interpretarse como «valor convencionalmente atribuido» al mensurando. Por todo lo cual, cualquier medición, para que posea rigor metrológico, debe incluir una valoración de la precisión del resultado que suele expresarse de la siguiente forma:

La estimación del grado de una medición nos permitirá asociar una incertidumbre al valor medido para que la medición sea completa.

$$\text{Ejemplo: } L = 5.043 \pm 0.025 \text{ mm}$$

Esto se interpreta como una estimación de que el valor de la magnitud medida se encuentra «con gran seguridad» entre 5.068 mm y 5.018 mm. Por lo tanto, un resultado de 5.043 ± 0.015 mm es más preciso que el anterior y un resultado de 5.043 ± 0.050 mm es menos preciso que los citados y responde a una medición de menor calidad.

A partir de esto podemos interpretar la **incertidumbre asociada a una medida** como una cuantificación de precisión o también como la semiamplitud del intervalo indicado (**intervalo de incertidumbre**), que se supone centrado sobre el valor numérico de la medida, aunque el modelo de distribución pudiera ser otro como se estudiará más adelante.

La incertidumbre, en cuanto cantidad que establece la indeterminación de cualquier medida, es un elemento imprescindible que debe ir asociado al resultado de cualquier medición de precisión.

$$X \pm U^{(2)} \quad (k = n)$$

(2) La notación de incertidumbre en español es (I), pero resulta muy frecuente el uso de la notación (U) que procede del término inglés *uncertainty*. En este texto se utilizan ambas indistintamente.

La información a añadir a estos datos es la declaración de cómo ha sido calculada la incertidumbre estándar.

En caso de que se exprese como una incertidumbre expandida se debe indicar el nivel de confianza y el valor del factor de cobertura utilizado.

1.4.3.1.1 Cifras significativas, redondeo de incertidumbres

Así, pues, el valor numérico de una magnitud y y de su incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ o en su caso la incertidumbre expandida (U), no deben darse con un excesivo número de cifras. El valor de la magnitud debe expresarse con un número de cifras que viene condicionado por el valor de la incertidumbre. No sería lógico presentar la medición hasta las milésimas si la incertidumbre solamente afecta a las décimas, el número de cifras que ha de corresponderse entre medición e incertidumbre es lo que se denomina **cifras significativas**. En general, basta con proporcionar $u_c(y)$ y (U), como también las incertidumbres típicas $u(x_i)$ de las estimaciones de entrada (x_i) con dos cifras significativas, pero en algunos casos puede ser necesario proporcionar mayor número de cifras para evitar propagaciones de errores de redondeo en los siguientes cálculos. Existen unas técnicas o reglas de redondeo que se resumen a continuación:

Se conservan las dos primeras cifras significativas de la incertidumbre, es decir, descontando ceros a izquierda y derecha del número, con independencia de la posición del punto decimal y se procede del modo siguiente:

Redondeo al integral múltiple más próximo, es decir, que la última cifra conservada se redondea aumentándola en una unidad cuando la primera de las cifras a descartar sea superior a (5), pero no se altera si fuera menor que (5).

Ej.: $u_c = 6.9749515$, los integrales múltiples serían 6.9 y 7.0 al ser el último más próximo, redondeado sería $u_c = 7.0$

Se emplearán potencias de 10 para evitar que haya cifras no significativas, la misma potencia debe afectar al valor y a su incertidumbre.

Ej.: Valor de la medición: 0.24573, Valor de la incertidumbre: 0.00137,
Expresión: $(24.6 \pm 0.1) 10^{-2}$

1.4.3.2. Errores de medida

En metrología, entendemos por error «la diferencia entre el resultado obtenido en una medición y el valor convencionalmente atribuido a la misma que es siempre desconocido». Esta definición encaja con lo que denominamos **error**

absoluto; este error puede tomar tanto valores positivos como negativos y se expresa en las mismas unidades que la medición.

Sobre este tema, la *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM)* indica que cuando el resultado de una medición dependa de los valores de otras magnitudes diferentes al mensurando, los errores de los valores medidos de esas magnitudes también contribuyen al error del resultado de esa medición y han de ser tenidos en cuenta.

Los errores pueden ser de dos tipos:

- Error sistemático.
- Error aleatorio.

Error sistemático: «Aquel error que permanece constante en valor absoluto y signo al medir una magnitud en las mismas condiciones y que varía de acuerdo con una ley, conocida o no, cuando las condiciones cambian». El error sistemático puede ser controlado o incluso eliminado.

Error aleatorio: también denominado accidental, «es aquel error que varía de forma imprevisible en valor absoluto y signo, cuando se efectúa un gran número de mediciones del mismo valor de una magnitud en condiciones prácticamente idénticas». Sucede, pues, cuando al reiterar mediciones sobre un mensurando aparecen valores diferentes tanto por encima como por debajo del valor que está siendo medido. Es decir, se trata de un error que no es posible controlar.

La *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (Guide to expression of Uncertainty in Measurement: GUM)* indica que el error que afecta a una medición puede provenir de efectos sistemáticos y aleatorios que contribuyen respectivamente al error del resultado.

1.4.3.3. Causas de error

Desde el punto de vista metrológico los errores pueden agruparse en tres grupos dependiendo de las causas que los originan:

- **Primer grupo**, incluye aquellas causas de error que de ninguna manera están bajo el control del observador, quien las percibe como variaciones en las lecturas. La corrección de este primer grupo de errores conlleva la aplicación de una incertidumbre asociada que se estima mediante reglas estadísticas y que se corresponde con la denominada de tipo A por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM).

- **Segundo grupo**, incluye aquellas causas imputables a las denominadas «magnitudes de influencia», es decir, atribuibles a aquellas magnitudes que sin ser objeto de la medida perturban el instrumento o equipo y modifican sus indicaciones, provocando desviaciones que deben ser tenidas en cuenta, pero cuyo valor no se puede determinar de una vez por todas.
- **Tercer grupo**, incluye aquellas causas de error imputables fundamentalmente a las imperfecciones constructivas del instrumento o equipo. Presentan la particularidad sobre las anteriores de que la corrección correspondiente puede calcularse de una vez y para un cierto período mediante la operación de calibración.

Conviene hacer, sin embargo, una distinción de conceptos entre **exactitud** y **precisión**. Para clarificar ambos nada mejor que ilustrarlo con unas imágenes ya clásicas en los textos de metrología, en las que unas dianas, que en este caso podrían representar los valores obtenidos tras una serie de mediciones sucesivas sobre el mismo mensurando, presentan puntos como valores o resultados de una medición, y en el que el centro de la diana representa el valor de referencia, lo que denominamos el «valor convencionalmente atribuido» del mensurando, para entender la importante diferencia existente entre ambas, precisión y exactitud. En función de los resultados obtenidos y representados en cada una de las dianas se puede afirmar:

- A) Que se ha logrado una alta precisión y una alta exactitud.
- B) Que se ha logrado una alta precisión pero una baja exactitud.
- C) Que se ha logrado una baja precisión y una alta exactitud.
- D) Que se ha logrado una baja precisión y una baja exactitud.

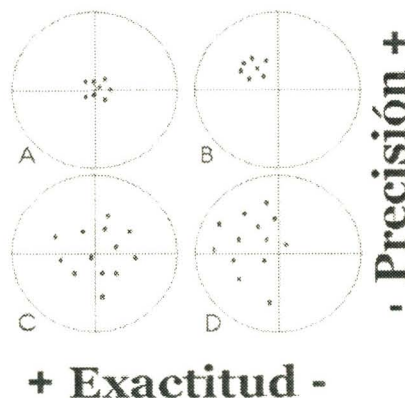


Figura 9. Diferencias entre precisión y exactitud.

Una vez diferenciadas, **precisión** y **exactitud**, ambas se definen:

Precisión: es la proximidad entre los valores obtenidos en mediciones repetidas sobre el mismo mensurando, bajo ciertas condiciones. La precisión se expresa o puede expresarse numéricamente mediante medidas de dispersión tales como desviación típica, varianza o coeficiente de variación. La precisión se utiliza para definir repetibilidad, reproducibilidad o precisión intermedia.

Exactitud: es la proximidad mayor o menor entre un valor medido y el valor convencionalmente atribuido al mensurando. La exactitud no es una magnitud y no se expresa numéricamente, la exactitud es por lo tanto un concepto y no una magnitud. Se afirma que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida, y puede interpretarse como la proximidad entre los valores medidos atribuidos al mensurando.

Así pues precisión y exactitud son conceptos diferentes y susceptibles de ser o no coincidentes.

1.4.3.4. Expresión de mediciones

La expresión de una medida de precisión siempre dispondrá de los siguientes elementos básicos:

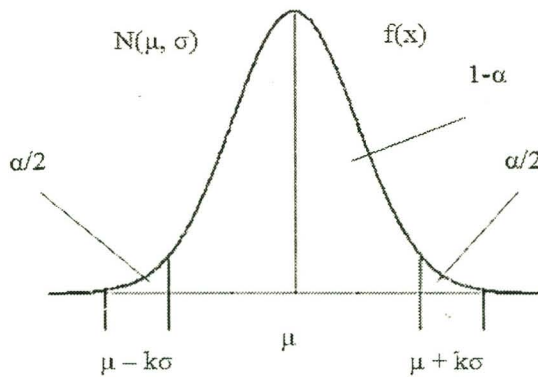
1. Valor del mensurando.
2. Unidad de medida.
3. Grado de precisión de dicha medida.
4. Normativa utilizada para la determinación del grado de precisión.

Ej.: 32.054 mm \pm 0.006 ($k = 2$)

En general puede afirmarse que cuando el número de mediciones tiende a infinito, estas tienden a adoptar una distribución normal de *Gauss*, en la que los parámetros de centrado vienen definidos por la media aritmética (\bar{x}) y los parámetros de dispersión por la desviación típica muestral (s).

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

El porcentaje de área de la curva entre las abscisas $(\mu - k\sigma)$ y $(\mu + k\sigma)$ y las probabilidades de obtener mediciones en un intervalo situado en torno a la media son:



k	$\mu \pm k\sigma$	1- α (%)
0.67	$\mu \pm 0.67\sigma$	50.0
1.00	$\mu \pm 1.00\sigma$	68.3
1.50	$\mu \pm 1.50\sigma$	86.6
1.96	$\mu \pm 1.96\sigma$	95.0
2.00	$\mu \pm 2.00\sigma$	95.4
2.50	$\mu \pm 2.50\sigma$	98.8
2.58	$\mu \pm 2.58\sigma$	99.0
3.00	$\mu \pm 3.00\sigma$	99.7

Figura 10. Porcentaje de áreas de curva y probabilidades de medida.

Así pues para un nivel de confianza de 95 % $k = 1.96 \approx 2$ y para uno del 99.5 % $k = 2.81 \approx 3$.

Pudiendo convenirse que la media o su estimador constituye el valor más probable de la medición y la desviación típica o su estimador, está relacionado con la calidad de la medición y, por lo tanto, con su incertidumbre.

$$\bar{X} = k \frac{s}{\sqrt{n}} \quad K = 2 \text{ o } 3$$

1.4.3.5. Expresiones de incertidumbre

En la mayoría de las ocasiones, el mensurando (Y) no es medido directamente, sino que se determina partiendo de otras magnitudes, (x_1, x_2, \dots, x_n) por medio de una relación funcional, (f).

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

(Y) es la magnitud de salida del mensurando.

(X_1, X_2, \dots, X_n) son magnitudes de entrada a partir de las cuales se puede obtener el valor del mensurando.

(f) es la función modelo.

Dado que el resultado de una medición es siempre aproximado, el valor ha de ser acompañado de una incertidumbre asociada.

Incertidumbre típica es pues la incertidumbre del resultado de una medición, expresada como una desviación típica.

La desviación típica asociada al resultado de una medición (Y) se denomina incertidumbre típica combinada, $u_c(y)$ y se calcula a partir de la desviación típica asociada a cada estimación de entrada (x_i) denominada **incertidumbre típica** y está representada por $u(x_i)$.

$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ y dado que $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ es la incertidumbre típica.

$u(y) = f\{u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)\}$ es la incertidumbre típica combinada.

Cada estimación de entrada (x_i), así como su incertidumbre asociada $u(x_i)$ se obtienen a partir de una distribución de valores posibles de la magnitud de entrada (X_i).

La distribución de probabilidad puede estar basada en una distribución de frecuencias, o bien puede tratarse de una distribución supuesta de forma apriorística.

En 1980, el grupo de trabajo del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) designó un grupo de trabajo que presentó la Recomendación ILC / 1 (1980) sobre «Expresión de incertidumbres experimentales» que sugirió la agrupación de las componentes de la incertidumbre de medida en dos grandes categorías, A y B , dependiendo del método empleado para su determinación numérica. No obstante, existen otros tipos de incertidumbre muy utilizados en metrología. Actualmente GUM y su suplemento (1) suministran las definiciones de todos ellos.

1.4.3.5.1. Evaluación de incertidumbres

Dependiendo de cómo se hayan obtenido los datos de entrada, de su número, de su procedencia, etc., estaremos bien ante una incertidumbre estándar de tipo (A) o (B), y los métodos de evaluación para cada una de ellas serán diferentes.

Evaluación Tipo A de incertidumbre: método de evaluación de incertidumbre que se estima mediante procedimientos estadísticos de análisis de observaciones. Se utiliza cuando se han llevado a cabo una serie de observaciones (N), independientes de las magnitudes de entrada y bajo las mismas condiciones de medida. Las evaluaciones del tipo (A) de incertidumbre se basan en distribuciones de frecuencia.

Pero cuando una medida se repite en las mismas condiciones se puede observar que existe una dispersión siempre y cuando el procedimiento de medida

posea la resolución suficiente. La incertidumbre de una magnitud de entrada se puede estimar con base en la dispersión de los resultados individuales.

En la evaluación de Tipo (A) de incertidumbre debe especificarse siempre el número de grados de libertad ($n-1$).

Los métodos de obtención de la incertidumbre de tipo (A) son:

- ANOVA: *Analysis of Variance*.
- Método de mínimos cuadrados.
- Método general.

ANOVA: el análisis de la varianza consiste en un método de análisis que parte del concepto de regresión lineal. El método se basa en el uso de mínimos cuadrados, que consiste en separar mediante la suma de cuadrados componentes relativos a los factores que contempla el modelo. En ese caso se ajustaría la curva basándose en los dos parámetros que la caracterizan y que son la varianza y la incertidumbre estándar.

Mínimos cuadrados: se trata de un análisis numérico en el que a partir de un conjunto de pares ordenados, variable independiente-variable dependiente y una familia de funciones, se intenta hallar la función continua que mejor se aproxime a los datos con un criterio de mínimo error cuadrático.

Método general: este método considera que para una serie de mediciones, tomadas en condiciones de repetividad, de n medidas, ($n > 1$), el valor «convencionalmente atribuido» a la magnitud viene dado por la media aritmética de los valores individuales obtenidos en la medición.

Evaluación Tipo B de incertidumbre: método de evaluación de incertidumbre que se estima por otros procedimientos diferentes a los estadísticos. Lo usual es interpretar que la distribución determinada de la probabilidad esté basada en la experiencia o en otras informaciones. Las evaluaciones del tipo (B) de incertidumbres se basan en distribuciones supuestas a priori. La incertidumbre de tipo (B) se utiliza cuando no se cuenta con observaciones repetidas y el valor se calcula en función de la información disponible, por ejemplo, proveniente de un ensayo destructivo. Es decir, que cuando se cuenta con una estimación (x_i) que no procede de observaciones repetidas, la varianza estimada $u^2(x_i)$ o la incertidumbre estándar $u(x_i)$ se evalúa mediante un método científico basado en la información disponible sobre la variabilidad de (X_i). La información disponible sobre (X_i) puede ser:

- Proveniente de anteriores mediciones.
- Procedente de certificados de calibración anteriores.
- Incertidumbres y especificaciones del fabricante.

La evaluación de tipo (B) de la incertidumbre es adecuada cuando solamente contamos con un valor de la variable de entrada dada como un múltiplo de una desviación típica y también cuando la distribución de probabilidad de la variable es normal, triangular, rectangular o de tipo (U).

1.4.3.5.2. Criterios de rechazo de valores atípicos

Cuando se realiza una medición reiterada sobre un mensurando podemos hallarnos ante el caso de que algunas mediciones se diferencien de las restantes. Estos datos atípicos deben ser analizados cuidadosamente para valorar si son *outliers*, es decir, no provenientes de la misma distribución que el resto de la muestra y deben ser identificados para poder excluirlos o rechazarlos.

Los denominados criterios de rechazo son pruebas y sistemas que actúan como filtros que permiten desechar aquellas mediciones erróneas, datos atípicos, cuya inclusión en el conjunto de valores medidos provocarían la distorsión o falseamiento del cálculo de la media y de la desviación típica.

Entre los sistemas de eliminación de datos atípicos se citan los siguientes:

- Prueba de Dixon o Test Q.
- Prueba de Grubbs y Beck.
- Prueba de desviación relativa máxima.
- Criterio de Chauvenet.

Prueba de Dixon: La prueba de Dixon, o simplemente el Test Q, se utiliza para la identificación y rechazo de datos atípicos *outliers* y adquiere diferentes formas dependiendo del número de datos a evaluar:

Si el número de datos ($n < 10$).

Determinamos el valor (Q), que se compara con una tabla de valores estándar para decidir si es un valor atípico o no.

$$Q = \frac{d}{w} = \frac{x_q - x_n}{x_h - x_l}$$

x_q , posible valor atípico.

x_n , valor más cercano al posible valor atípico.

x_h , valor máximo.

x_i , valor mínimo.

N.º de medidas	Rechazo con 90 % de confianza	Rechazo con 95 % de confianza	Rechazo con 99 % de confianza
3	0.941	0.970	0.994
4	0.765	0.829	0.926
5	0.642	0.710	0.821
6	0.560	0.625	0.740
7	0.507	0.568	0.680
8	0.468	0.526	0.634
9	0.437	0.493	0.598
10	0.412	0.466	0.568

Tabla 9. Valores estándar.

Prueba de Grubbs y Beck: en esta prueba se considera que si el dato a analizar se desvía de la media aritmética del resto de los datos en más de 3 s, el dato sería un *outlier* que debe ser rechazado.

Se utiliza para $n > 10$

$$|X_i - \bar{X}| \geq 3s$$

Siendo s la desviación media estándar.

X_i el valor de la medición a analizar.

Desviación relativa máxima: este método de cálculo se basa en la expresión.

$$\frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \geq t$$

X_i es el dato a analizar para observar si es o no atípico.

\bar{x} es la media aritmética del resto de los datos.

(t) depende del nivel de importancia (H) y del número de datos (n).

El nivel (H) de importancia se considera comprendido entre 0.05 a 0.01. En mediciones de precisión se debe considerar un nivel (H) no superior a 0.01, un 1 %.

H	0.05	0.02	0.01	0.001
N				
2	15.561	38.973	77.964	779.696
3	4.969	8.042	11.460	36.486
4	3.558	5.077	6.530	14.468
5	3.041	4.105	5.043	9.432
6	2.777	3.635	4.355	7.409
7	2.616	3.360	3,963	6.370
8	2.508	3.180	3.711	5.733
9	2.431	3.053	3.536	5.314
10	2.372	2.959	3.409	5.014
11	2.327	2.887	3.310	4.791
12	2.291	2.829	3.233	4.618
13	2.261	2.782	3.170	4.481
14	2.236	2.743	3.118	4.369
15	2.215	2.710	3.075	4.276
16	2.197	2.683	3.038	4.198

Tabla 10. Valores de t en función del nivel de importancia (H).

Criterio de Chauvenet: su utilización es más que discutible, contando con la refutación científica. Sin embargo, es un criterio de rechazo bastante difundido en los textos de metrología, según el cual se deben desechar todos aquellos valores de mediciones cuya probabilidad de aparición sea inferior a:

$1/2n$ lo que establece un coeficiente $k(n)$ del criterio de *Chauvenet* y unos límites inferior y superior de aplicación que vienen dados por la expresión:

$$\bar{x} - k(n) s \leq X_i \leq \bar{x} + k(n)$$

Incertidumbre típica combinada: incertidumbre típica del resultado de una medición, cuando el resultado se ha obtenido partiendo de los valores de otras magnitudes, $\sqrt{\sum_1^n (x_1 + x_2 + \dots + x_n)}$, siendo estas las varianzas y las covarianzas

de esas magnitudes, ponderadas en función de la variación del resultado de medida con la variación de las mismas.

Incertidumbre expandida: magnitud que define un intervalo en torno al resultado de una medición, en el cual se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores que se supone podrían atribuírsele al mensurando.

Regresión lineal: también ajuste lineal, es un modelo matemático utilizado para aproximar la relación de dependencia entre una variable dependiente (Y) y las variables independientes (X) y un término aleatorio (ϵ).

Factor de cobertura: factor numérico utilizado como multiplicador de la incertidumbre típica combinada para obtener la incertidumbre expandida. Un factor típico de cobertura (k), toma valores entre 2 y 3.

Intervalo de cobertura: intervalo que contiene el valor de una magnitud, con una probabilidad declarada, basada en la información disponible. En ocasiones se le denomina intervalo *bayesiano*⁽³⁾ o de certeza, lo que no debe nunca es denominarse «intervalo de confianza» según criterio de (*GUM*), ya que el intervalo de confianza es un concepto estadístico diferente.

(3). El enfoque *bayesiano* está basado en una interpretación subjetiva de la probabilidad y considera a ésta como un grado de creencia con respecto a la incertidumbre. El teorema de Bayes parte de una red *bayesiana* que es un modelo probabilístico que representa un conjunto de variables aleatorias y sus dependencias condicionales a través de un grafo acíclico dirigido un (*DAG*). Cada uno de los nodos de la red representa variables aleatorias.

Probabilidad de cobertura: indica la probabilidad de que un valor determinado de una magnitud se halle incluido dentro de un cierto intervalo de cobertura.

Función de distribución: es una función que para cada valor (ξ) proporciona la probabilidad de que la variable aleatoria (X) sea menor o igual que (ξ).

$$G_X(\xi) = Pr(X \leq \xi)$$

Distribución de la probabilidad: es una función variable aleatoria, que expresa la probabilidad de que una variable aleatoria tome cualquier valor dado o bien que esté incluida en un conjunto de valores determinados.

Distribución t : distribución de probabilidad que posee una variable aleatoria continua (X), en la que la (FDP), función de densidad de probabilidades, viene dada por:

$$g_x(\xi) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi\nu}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left(1 + \frac{\xi^2}{\nu}\right)^{-(\nu+1)/2}$$

Función de densidad de probabilidad (FDP): es una derivada, cuando existe, de la función de distribución.

Esperanza matemática: se define como la propiedad de una variable aleatoria, que para una variable aleatoria continua (X) determinada a partir de una función de densidad de probabilidad, (FDP), $g_x(\xi)$ se define como:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi g_x(\xi) d\xi$$

Varianza: propiedad de una variable aleatoria en la que para una variable continua (X) caracterizada por una función de densidad de la probabilidad, (FDP), $g_x(\xi)$ se expresa como:

$$V(X) = \int_{-\infty}^{\infty} [\xi - E(X)]^2 g_x(\xi) d\xi$$

Desviación típica: también se denomina desviación estándar (σ o s). Es una medida del grado de dispersión de los datos, es decir, que muestra cuánto tienden a alejarse estos respecto al valor promedio, posee la ventaja de que tiene en cuenta todos los datos existentes.

$$s = |\sqrt{V}|$$

1.4.3.5.3. Fases para la evaluación de incertidumbres

La evaluación de una incertidumbre se realiza en tres fases:

1. Formulación.
2. Propagación.
3. Resumen.

Formulación

- a. Se define la magnitud de salida, (Y), magnitud del mensurando.
- b. Se determinan las magnitudes de entrada $X = (X_1, \dots, X_N)^T$, de las que depende (Y).
- c. Se aborda el desarrollo de un modelo para relacionar (Y) con (X).

- d. A partir de los datos, se asignan las Funciones de Densidad de Probabilidad (FDP), que pueden ser gaussianas, rectangulares, trapezoides, triangulares, en U, etc., y se les asigna una (FDP) común a las (X_i) que no son independientes.

Propagación

Se propagan las (FDP) de las (X_i) por medio del modelo elegido para obtener la (FDP) de (Y) .

Resumen

Se utiliza la (FDP) de (Y) para obtener con ella:

- La esperanza matemática de (Y) , entendida como estimación (y) de la magnitud.
- La desviación típica de (Y) , entendida como estimación (y) de la magnitud.
- Un intervalo de cobertura que contenga a (Y) .

1.4.3.5.4. Tratamiento de la incertidumbre

En el tratamiento de las incertidumbres se puede utilizar el método basado en la filosofía GUM, esto consiste en aplicar la ley de propagación de la incertidumbre y caracterizar la magnitud de salida como distribución gaussiana o distribución (t) , para obtener un intervalo de cobertura. Para ello se requiere:

1. Identificar todas las componentes de la incertidumbre.
2. Calcular la incertidumbre típica de cada componente de la incertidumbre.
3. Calcular la incertidumbre combinada.
4. Calcular la incertidumbre expandida.
5. Expresar el resultado de la medición como $(X \pm U) \cdot \alpha$

1.4.3.5.5. Método Monte Carlo (MMC)

Compararemos los principios en los que se basa el enfoque GUM y el sistema Monte Carlo (MMC) en la realización de la propagación de distribuciones.

En la evaluación de la incertidumbre de tipo A, GUM proporciona una guía para obtener la mejor estimación de una magnitud y su incertidumbre típica asociada a partir de la media y de la desviación típica de un conjunto de indicaciones de la magnitud obtenidas de forma independiente.

En cuanto a la evaluación de la incertidumbre de tipo (B), una vez conocida dicha magnitud, esta se utiliza para caracterizarla mediante una función de densidad de probabilidad, (FDP), y a partir de ella determinar la mejor estimación de la magnitud y su incertidumbre típica asociada. La GUM establece que ambos tipos de evaluación se basan en distribuciones de probabilidad. Ambas aproximaciones utilizan interpretaciones admitidas sobre la probabilidad. GUM considera las FDP como una base para realizar la evaluación de la incertidumbre. El enfoque GUM emplea solo las mejores estimaciones (X_i) y sus incertidumbres asociadas, en cuanto a los valores de (Y), por ejemplo referido a intervalos de cobertura se obtendría sobre la base de hipótesis adicionales, tales como suponer que la distribución (Y) es gaussiana por ejemplo.

En cuanto al método Monte Carlo (MMC), es un método para la propagación de distribuciones que se lleva a cabo a partir de un muestreo aleatorio de distribuciones de probabilidad y que presenta ventajas tales como:

1. Conlleva un menor esfuerzo en analizar modelos no lineales o complejos, al no ser necesarias las derivadas parciales de primer orden para proporcionar los coeficientes de sensibilidad en la ley de propagación de incertidumbres.
2. El MMC proporciona una mejor estimación de (Y) en modelos no lineales.
3. El MMC proporciona una mejor incertidumbre típica asociada a la estimación de (Y) en modelos no lineales, especialmente si las (X_i) tienen asignadas (FDP) no *gaussianas*, sin necesidad de proporcionar las derivadas de orden superior.
4. El MMC proporciona un intervalo de cobertura correspondiente a una probabilidad de cobertura establecida en el caso de que la (FDP) de (Y) no pueda aproximarse adecuadamente a una distribución gaussiana o por una distribución (t).
5. No es necesario establecer un factor de cobertura cuando se determina un intervalo de cobertura.

En la práctica, únicamente en los casos sencillos es posible aplicar la propagación de distribuciones sin llevar a cabo aproximaciones. El enfoque GUM se basa en la aplicación de un método aproximado, mientras que el MMC, como su denominación indica, no es ni determinista ni estadístico numérico, y proporciona soluciones aproximadas, ya que a diferencia de los métodos estadísticos que se basan en el análisis de (N) puntos en un espacio (M)

dimensional, para hallar soluciones aproximadas, el MMC otorga un error absoluto de la estimación que va decreciendo en relación $(1/\sqrt{N})$ en virtud del teorema del límite central, lo que le permite, aunque con menos exactitud que el enfoque GUM, abordar casos más complejos.



Figura 11. Algunas de las posibles distribuciones de funciones de densidad de probabilidad (FDP).

1.4.3.6. Relación tolerancia / incertidumbre, (U/T)

Cuando se realiza la medición de una cota, los límites extremos de su tolerancia: máximo y mínimo, indican los valores frontera de su aceptación o rechazo. Como ya se ha mencionado, cualquier medición conlleva inevitablemente la existencia de una cierta incertidumbre asociada a ella. Esto conduce al hecho de que aquellas piezas con medidas próximas a los límites máximo y mínimo, es decir, que se encuentran en los extremos de la tolerancia, resultan susceptibles de ser aceptadas o rechazadas de forma errónea al estar afectadas por la incertidumbre de medida del instrumento utilizado. La Figura 12 esquematiza la situación que se produce en la práctica, al tener que rechazar un cierto número de piezas dudosas, que podrían o no cumplir con el requisito de tolerancia tanto para el valor máximo como para el mínimo. Para evitar el grave riesgo que supondría entregar piezas que no cumpliesen el requisito de tolerancia, todas ellas se rechazan sistemáticamente, lo que en la práctica implica el estrechamiento efectivo de la tolerancia de fabricación con respecto a la tolerancia de diseño, y como consecuencia de ello, el rechazo de una cierta cantidad de posibles piezas como dudosas, pero que podrían ser aceptables y la pérdida económica que ello supone.



Figura 12. Reducción de la Tolerancia de diseño debida a la incertidumbre del instrumento de medida utilizado.

De lo expuesto se deduce que, en la elección de un instrumento de medida para el control de una cierta cota sometida a tolerancia, uno de los criterios a considerar es la relación existente entre la amplitud de la tolerancia de la cota a medir y el valor de la incertidumbre del instrumento con el que se va a realizar la medición de la misma. De tal forma, que la elección de un instrumento afectado de una incertidumbre baja provocará en la práctica que las franjas laterales correspondientes a los extremos máximo y mínimo de la tolerancia, y que dan lugar a piezas dudosas, se reduzcan al mínimo, consiguiéndose un nivel productivo más económico, si bien hay que tener en cuenta que el control metrológico cuanto más sofisticado sea y menor incertidumbre posea, supone mayores costes. El hecho es que la tolerancia de fabricación (T_f) queda reducida con respecto a la Tolerancia de diseño (T_d) y deberá llegarse a una solución de compromiso entre el valor de las piezas a desechar y la adopción de un control metrológico más exhaustivo y por tanto más costoso:

$T_f = T_d - 2U$, a la Tolerancia de Fabricación se la denomina también Tolerancia Efectiva.

La forma correcta de proceder, además de tener en cuenta lo expuesto, ha de garantizar en todo caso que la incertidumbre asociada al instrumento de medida sea siempre despreciable o al menos sea baja en relación con el valor de la tolerancia de diseño y nunca llegue a comprometer el correcto funcionamiento de la pieza o elemento, lo que ocurriría en el caso de que sumando el valor de la incertidumbre del instrumento más la magnitud a medir, el valor sobrepasase los límites de la tolerancia de diseño. Es decir, deberemos contemplar la incertidumbre del instrumento con el que controlamos una cota, como un factor que influirá en la reducción efectiva de su tolerancia de diseño en mayor o menor medida y, por supuesto, garantizar en todo caso que la medición con el

instrumento elegido no comprometa nunca la tolerancia asignada que es la que figura en el plano. Aunque cabría hacer para cada caso un estudio estadístico específico que recoja las peculiaridades de la distribución de los diferentes valores del lote, en general es preciso recurrir a los valores indicativos normalizados que establecen relaciones tolerancia / incertidumbre, en los que la tolerancia está referida a las calidades y grupos dimensionales del sistema (ISO) de tolerancias. En cuanto a las incertidumbres existen algunos criterios de seguridad:

- Evitar la inclusión de cualquier mensurando dudoso.
- Velar para que el intervalo de incertidumbre del instrumento sea varias veces inferior al de la tolerancia de diseño y se halle entre los límites adecuados.
- Comprobar la incidencia económica que supone el intervalo de piezas dudosas.
- Tener en cuenta la división de escala (E) del instrumento.

En general y de forma un tanto simplificada puede afirmarse lo siguiente:

Cuando deseamos efectuar la medición de una cota afectada por un intervalo de tolerancia de un cierto valor T (μm) deberemos emplear un instrumento o sistema de medición cuya incertidumbre total U (μm) cumpla la siguiente condición:

$$\frac{T}{IT + 2} \geq U \text{ para } 3 \leq IT \leq 10$$

$$\frac{T}{IT + 3} \geq U \text{ para } 10 \leq IT \leq 12$$

$$\frac{T}{16} \geq U \text{ para } 12 \leq IT \leq 16$$

(IT) es el número indicativo de la calidad (ISO) al que pertenece la tolerancia de la cota considerada.

En las cotas que no aparezcan expresadas según el sistema (ISO) de tolerancias se aplicará la condición anterior, pero asignando el valor de (IT) correspondiente a la calidad inmediata inferior.

En general, podemos afirmar que el valor de la relación tolerancia/incertidumbre debe estar comprendido en los procesos de medición entre 5 y 16, es decir:

$$\frac{T}{U} = 5 \div 16 \text{ ó también } \frac{T}{2U} = 2.5 \div 8$$

En la práctica conviene considerar que $T_{efectiva} = T_{diseño} - 2U$

$$\text{En general: } 3 \leq \frac{T}{2U(k=2)} \leq 10$$

Relaciones tolerancia/incertidumbre inferiores a 3 supondrían rechazar un número demasiado grande de piezas dudosas y potencialmente admisibles, mientras que relaciones tolerancia/incertidumbre inferiores a (10) exigirían el empleo de controles metroológicos muy costosos.

Además de tener en cuenta las proporciones más convenientes que deben mantener los valores de las tolerancias y las incertidumbres, existe un tercer factor a considerar como es la división de escala del instrumento. La división de escala de un instrumento de medida es una característica metroológica del mismo y es el valor de la magnitud (E) existente entre dos trazos consecutivos cualesquiera de su escala de medida. La división de escala del instrumento (E) debe tener un valor adecuado y compatible con la incertidumbre. La expresión siguiente recoge una relación razonable entre ambos valores:

$$0.5 \leq \frac{U}{E} \leq 10$$

1.4.3.7. Magnitudes de influencia

En una medición intervienen directamente tres factores: la persona o personas que llevan a cabo la medición, el instrumento con el que se mide y el objeto de la medición (el mensurando). Sin embargo, existen otros factores que, pese a no formar parte de la medición pero sí del ambiente y de las condiciones en el que esta se realiza, influyen en sus resultados pudiendo alterarlos, y por ello se denominan magnitudes de influencia, tales como la temperatura a la que se realiza la medición, la humedad ambiente y la presión atmosférica entre otras. Conviene tener en cuenta que muchas de las mediciones que se llevan a cabo no pueden desarrollarse en ambientes controlados, como puedan ser salas blancas o laboratorios metroológicos, sino que han de realizarse en talleres a pie de máquina y en lugares que presentan condiciones ambientales alejadas de las consideradas no ya ideales, sino ni siquiera adecuadas para los controles metroológicos, alterando los resultados de las medidas. Cuando las magnitudes de influencia

están situadas en valores comprendidos dentro de unos ciertos intervalos previamente establecidos como admisibles, que denominamos intervalos de referencia, se dice que las magnitudes de influencia se hallan bajo control, si no lo estuvieran, habrán de ser tenidos en cuenta y valorar; si poseen relevancia o no y si son susceptibles de alterar la medición, y si así fuera efectuar las correcciones pertinentes y, por supuesto, han de ser documentados en todo caso haciéndolos constar en la hoja de medición, ya que toda medición, además de proporcionar los valores numéricos que se obtienen, debe incluir información adicional sobre las circunstancias en las que se ha realizado la medición. Documentar el método utilizado, el instrumento empleado y su incertidumbre asociada, el lugar y las condiciones ambientales en las que se llevó a cabo una medición respecto a las magnitudes de influencia es la única forma de proporcionarle rigor y validez metrológica, y, en función de todo ello, poder otorgarle una incertidumbre, pues de otra forma la medición no podría ser reproducible.

Ciertamente no todas las mediciones tienen la misma trascendencia y, por tanto, tampoco las mismas exigencias de control respecto a las magnitudes de influencia. No es lo mismo la calibración de un instrumento, que debe ser realizada en el ambiente limpio y controlado de un laboratorio y en cuyos resultados se basará la incertidumbre otorgada a todas las mediciones que con él se realicen, que una medición que se lleva a cabo en un ambiente sucio, a una temperatura elevada, en una sala de máquinas por ejemplo. Tampoco los diferentes instrumentos y equipos requieren las mismas condiciones y cuidados, la determinación de la longitud de onda de un láser, por ejemplo es una medida muy sensible que se ve afectada por la presión atmosférica, la humedad relativa, la temperatura e incluso la composición del aire.

1.4.3.8. Condiciones de las magnitudes de referencia en los laboratorios

Temperatura de referencia

Las mediciones de precisión deben ser realizadas bajo ciertas condiciones, una de las cuales guarda relación con la temperatura ambiente, la norma (ISO) nos proporciona la temperatura de referencia de 20 °C, que es la indicada para los laboratorios y salas de calibración en las que se lleven a cabo medidas de gran precisión y a la cual están calibradas las escalas de los instrumentos de medida y se considera también que los valores de las cotas especificadas en los planos estan referidos a dicha temperatura.

Tolerancias en la temperatura de referencia

Esta misma norma, fija tolerancias respecto a la temperatura de referencia para las distintas operaciones metrológicas, que a continuación se detallan:

Mediciones de precisión: La temperatura deberá estar comprendida en el intervalo de $(20\text{ °C} \pm 2\text{ °C})$.

Calibraciones: La temperatura estará comprendida dentro del intervalo de $(20\text{ °C} \pm 1\text{ °C})$.

Mediciones interferométricas: La temperatura estará comprendida en el intervalo $(20\text{ °C} \pm 0.1\text{ °C})$.

Tolerancias en la humedad relativa

En un laboratorio la humedad relativa se limitará a un máximo del 50 % pudiendo admitirse un mínimo del 40 % por motivos fisiológicos.

Tolerancias de partículas en el aire

El polvo en el aire podrá presentar como máximo 200 partículas/cm³, debiendo contar con sistemas de filtrado capaces de retener partículas mayores de (0.001 mm).

Indicaciones de circulación del aire

Deben realizarse entre 10 y 20 renovaciones/hora. La velocidad máxima del aire en el lugar de trabajo será de 0.15 m/s. Deben evitarse los gradientes de temperatura provocados por corrientes de aire, ventanales, sistemas de calefacción, iluminación inadecuada, etc.

Tolerancia de sobrepresión estática

Entre 12.5 a 25 Pa.

Tolerancia en cuanto a vibraciones

Aceleración máxima de 0.003 g correspondiente a una frecuencia de 200 Hz.

Los laboratorios de metrología deberán, pues, trabajar bajo unas condiciones ambientales muy controladas, ya que las magnitudes de influencia pueden repercutir de diferentes formas en los resultados de las mediciones, dilatando los cuerpos o haciendo variar la viscosidad de los líquidos, por ejemplo. El aire deberá ser limpio, contando con un sistema de renovación capaz de aportar aire filtrado y

seco con una velocidad limitada, y de la forma más regular posible, y teniendo en cuenta el número de personas que trabajan en él, al ser fuentes de calor a considerar. La humedad ha de ser controlada limitándola para evitar la oxidación de los instrumentos por posibles condensaciones. La presión atmosférica es otro factor que interfiere al hacer variar las mediciones realizadas mediante sistemas ópticos. Del mismo modo, cualquier otro factor que altere o pueda alterar los resultados de las mediciones debe ser evitado o minimizado como las vibraciones o el ruido. Otra característica importante para las mediciones es contar con una iluminación adecuada, luz fría en techos y alumbrado de sobremesa, si fuera necesario también de luz fría. Dado que muchos de los equipos están conectados a la red, deberán contar con una estabilización que evite variaciones de parámetros eléctricos que pudieran distorsionar las mediciones.

1.4.3.9. Efectos de la dilatación

Debemos tener en cuenta que las escalas de los instrumentos de medida, y los propios instrumentos, así como los patrones, han sido calibrados a la temperatura de referencia (20 °C), y que, por tanto, cualquier medición que se realice a temperaturas que excedan el margen de tolerancia permitido por la norma, afectan a las escalas de los instrumentos empleados, que han sido calibrados a dicha temperatura y a las propias piezas que son objeto de medición, ya que las magnitudes especificadas en los planos se suponen referidas a la temperatura de referencia, y por tanto sobrepasar dicha temperatura hace variar el resultado de la medición.

Conviene recordar que cada material posee un coeficiente (α) característico de dilatación y en función del mismo y del incremento térmico al que sea sometido, experimenta dilataciones que afectan a su escala y por tanto a los resultados de las mediciones. Por ello, cuando no sea posible medir en las condiciones indicadas por la norma, será preciso aplicar las correcciones pertinentes en función de la expresión de la dilatación lineal.

Los instrumentos de medida sensibles, los patrones y accesorios de medida, debido al contacto prolongado con las manos, experimentan también aumentos de temperatura y, por tanto, las consiguientes dilataciones. Esto debe ser tenido en cuenta en su manejo.

En la Tabla 11 se proporcionan coeficientes de dilatación de algunos metales corrientes.

METAL	Coefficiente de dilatación (α)
Acero dulce	$10.5 \cdot 10^{-6}$
Acero templado	$12 \cdot 10^{-6}$
Aluminio	$22 \cdot 10^{-6}$
Bronce	De $16 \cdot 10^{-6}$ a $20 \cdot 10^{-6}$
Cobre	$16 \cdot 10^{-6}$
Latón	$18 \cdot 10^{-6}$
Magnesio	$24 \cdot 10^{-6}$

Tabla 11. Coeficientes de dilatación medios (α) de los metales más comunes.

En general, y para los aceros utilizados en los calibres, podemos suponer un valor de ($\alpha = 11.5 \cdot 10^{-6}$), salvo que el fabricante especifique otro diferente.

En medidas de precisión será preciso alcanzar la igualdad de temperatura entre la pieza a medir y el instrumento de medida o el patrón de referencia. Si fuera preciso, se esperará el tiempo necesario para que ambos se igualen térmicamente.

Correcciones debidas a la dilatación

El incremento por unidad de longitud (ΔL) es directamente proporcional al coeficiente (α), a la longitud inicial (L_{20}) y al incremento de temperatura (Δt), por lo que la longitud final del instrumento a una temperatura distinta a la de referencia será:

$$\Delta L = \alpha L_{20} \Delta t$$

La longitud final:

$$L_f = L_{20} + \Delta L = L_{20} + \alpha L_{20} \Delta t = L_{20} (1 + \alpha \Delta t)$$

$$L_f = L_{20} (1 + \alpha \Delta t), \Delta t = (t - 20^\circ)$$

$$L_f = L_{20} [1 + \alpha(t - 20^\circ)]$$

Esta expresión se utilizará para el instrumento de medida. Para la pieza, la expresión será, siendo (α') su coeficiente de dilatación:

$$L'_f = L'_{20} [1 + \alpha' (t - 20^\circ)]$$

Lo que nos permite escribir:

$$L'_{20} = L_{20} \frac{1 + \alpha \cdot (t - 20^\circ)}{1 + \alpha' \cdot (t - 20^\circ)}, \text{ si se multiplican los dos términos de esta fracción por:}$$

$1 - \alpha'(t - 20^\circ)$ y dado que (α) y (α') tienen un valor muy pequeño, su cuadrado y su producto se pueden considerar despreciables, tendremos que:

$$L'_{20} = L_{20} [1 + (\alpha - \alpha')(t - 20^\circ)]$$

Podría darse el caso muy improbable de que el coeficiente de dilatación del instrumento de medida (α) fuese igual, que el coeficiente de dilatación de la pieza a medir (α'). Únicamente en ese hipotético caso, no haría falta aplicar correcciones por dilatación dado que ambos estarían afectados en la misma cuantía.

1.5. Tolerancias dimensionales

1.5.1. Introducción

En las fabricaciones en general y concretamente en las mecánicas, los valores nominales reflejados en los planos son en realidad una abstracción, al fabricar las piezas solamente podemos aspirar a alcanzar valores aproximados a los especificados en los planos.

Las variaciones de las medidas obtenidas tras la fabricación deben estar limitadas y comprendidas dentro de un cierto intervalo previsto y establecido también en el plano. Queda así definida la tolerancia como el espacio admisible de variación en la dimensión nominal que puede presentar una pieza o cota determinada, sin que ello comprometa su adecuado funcionamiento. De forma que si el valor obtenido tras la fabricación está incluido entre dos valores extremos tolerados, uno máximo y el otro mínimo, tal magnitud se considera aceptable. Así pues la tolerancia (T) de una medida es la diferencia existente entre las medidas máxima y mínima permitidas o expresado de otro modo, la tolerancia delimita la variación de magnitud sobre la dimensión establecida en el plano, lo que en realidad supone definir los límites de las desviaciones dimensionales que pueden ser admisibles para no comprometer la intercambiabilidad de las piezas o elementos mecánicos y en última instancia su correcto funcionamiento.

El término tolerancia posee un doble significado en tecnología ya que existen dos tipos de tolerancias:

Tolerancia de diseño: de una determinada cota, es aquella que se estima suficiente para asegurar el correcto comportamiento del elemento relativo a esa cota dentro del conjunto mecánico en el que haya de integrarse.

Tolerancia de fabricación: también denominada tolerancia efectiva, es la tolerancia resultante obtenida de la fabricación con un método determinado y con unos ciertos medios.

Es importante definir algunos conceptos relativos a las tolerancias dimensionales:

Dimensión nominal: valor teórico de una dimensión respecto al cual se establecen las medidas límite, es decir, la tolerancia.

Dimensión efectiva: valor obtenido tras la fabricación y que se determina sobre una pieza real.

Dimensiones límite: valores extremos, máximo y mínimo que puede tomar la dimensión considerada.

Línea cero: también denominada línea de referencia, una línea recta que se utiliza como referencia para establecer la posición de los límites superior e inferior de la dimensión nominal.

Cota funcional: es aquella cota que posee relevancia en el funcionamiento de la pieza.

Diferencia efectiva: es la diferencia entre la medida obtenida y la nominal.

Diferencia superior/inferior: es la diferencia entre la dimensión superior y la nominal.

Desviación fundamental: de una cota afectada de tolerancia es la desviación máxima (puede ser desviación superior o inferior) que posea menor valor absoluto.

Los proyectistas suelen tener cierta tendencia a especificar tolerancias de diseño lo menores posibles, pero ello tiene repercusiones en diferentes aspectos, ya que obliga a la oficina de métodos a elegir procedimientos de fabricación más estrechamente controlados, lo que a su vez incide en el coste de producción, encareciéndolo.

La elección de las tolerancias de diseño es una cuestión que requiere un compromiso tecnológico que está influido por cuestiones de diversa índole: económicas, de normativa, de seguridad, de medios disponibles, etc.

1.5.2. Sistema de tolerancias (ISO)

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha establecido un sistema de tolerancias que cubre dimensiones de hasta 500 mm, aunque también existen normativas o mejor dicho recomendaciones para dimensiones superiores. El sistema (ISO) emplea códigos de letras y números que definen la calidad de la tolerancia y su posición con respecto a la línea cero. El sistema (ISO) prevé un total de 20 grados o calidades distintas de tolerancias normalizadas de los cuales, los grados o calidades (IT1 a IT18) son los que figuran en el cuerpo de la norma. Mientras que los grados o calidades (IT0 e IT01) no son de uso general. En la Tabla 12 se muestran los grupos dimensionales, los diferentes grados de calidad (IT) y los valores que corresponden para cada uno de ellos.

Grupos de Diámetros (mm)	Calidades (μm)									
	IT 01	IT 0	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8
$d \leq 3$	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14
$3 \leq d \leq 6$	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18
$6 \leq d \leq 10$	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22
$10 \leq d \leq 18$	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27
$18 \leq d \leq 30$	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33
$30 \leq d \leq 50$	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39
$50 \leq d \leq 80$	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46
$80 \leq d \leq 120$	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54
$120 \leq d \leq 180$	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63
$180 \leq d \leq 250$	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72
$250 \leq d \leq 315$	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81
$315 \leq d \leq 400$	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89
$400 \leq d \leq 500$	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97

Grupos de Diámetros (mm)	Calidades (μm)							
	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16
$d \leq 3$	25	40	60	100	140	250	400	600
$3 \leq d \leq 6$	30	48	75	120	180	300	480	750
$6 \leq d \leq 10$	36	58	90	150	220	360	580	900
$10 \leq d \leq 18$	43	70	110	180	270	430	700	1100
$18 \leq d \leq 30$	52	84	130	210	330	520	840	1300
$30 \leq d \leq 50$	62	100	160	250	390	620	1000	1600
$50 \leq d \leq 80$	74	120	190	300	460	740	1200	1900
$80 \leq d \leq 120$	87	140	220	350	540	870	1400	2200
$120 \leq d \leq 180$	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
$180 \leq d \leq 250$	115	185	290	460	720	1150	1850	2900
$250 \leq d \leq 315$	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
$315 \leq d \leq 400$	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
$400 \leq d \leq 500$	155	250	400	630	970	1550	2500	4000

Tabla 12. Amplitud de la banda de tolerancia (μm) para los 13 grupos de diámetros de (0-500) mm y para las 16 calidades de tolerancia (IT) según el Sistema (ISO).

El índice de calidad o grado de calidad es el grupo de tolerancias que se corresponde con un mismo grado de precisión para cualquier grupo de diámetros.

Las diferentes calidades poseen aplicaciones adecuadas para determinados usos:

- **Instrumentos y piezas de alta precisión:** (IT01 a IT3) ambas incluidas en ejes e (IT01 a IT4) ambas incluidas en agujeros.
- **Piezas que forman parte de ajustes:** (IT4 a IT11) ambas incluidas en ejes e (IT5 a IT11) ambas incluida en agujeros.
- **Piezas aisladas, sin especiales requisitos:** (ITs superiores a 11).

Por otra parte hay que tener en cuenta el uso de las superficies en el conjunto, por lo que las superficies a su vez pueden ser de varios tipos:

- Superficies funcionales.

- Superficies de apoyo.
- Superficies libres.

Las superficies funcionales requieren acabados muy finos, las de apoyo requieren acabados intermedios y las superficies libres, pueden tener acabados irregulares.

Los diferentes procesos mecánicos de fabricación, como torneado, fresado, rectificado, etc., implican limitaciones en cuanto a las calidades que con cada uno de ellos se puede obtener y que han de ser tenidas en cuenta en la fase de diseño. No se pueden pretender calidades muy altas dependiendo de los procesos de fabricación que la pieza o elemento requiera. La Tabla 13 proporciona una visión de lo que cada proceso mecánico puede ofrecer expresados en términos de calidad (IT).

Procesos	Calidades (IT)															
	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Oxicorte																
Serrado																
Lijado-Cepillado																
Taladrado																
Fresado																
Taladrado+Esca																
Escariado																
Brochado																
Torneado																
Rectificado																
Afinado Superf.																
Superdefinición																

Tabla 13. Calidades de tolerancia (IT) que se pueden lograr con los diferentes procesos de mecanizado.

La fórmula para las calidades comprendidas entre (IT05 a IT16) es:

$$IT_n = k (0.45 \sqrt[3]{D} + 0.001 D)$$

IT_n = Tolerancia de Calidad “n” expresada en (µm); y

D = Media geométrica de los valores extremos de cada grupo de diámetros nominales, en mm:

$$D = \sqrt{D_1 D_2}$$

(0.001 D) es un término que compensa las irregularidades de medidas crecientes, en relación proporcional al diámetro y debe considerarse en diámetros superiores a 80 mm; y

k = Factor multiplicador, adimensional.

Índice de Tolerancia	IT 05	IT 06	IT 07	IT 08	IT 09	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16
k	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640	1000

Tabla 14. Índice de tolerancia para las distintas calidades (IT).

1.5.2.1. Posición de la zona de tolerancia

El sistema (ISO) de tolerancia define 27 posiciones diferentes, como posibles zonas de tolerancia en relación a la línea cero o línea de referencia y el valor de la tolerancia se condiciona a la magnitud de la medida nominal. Las posiciones consideradas se designan por letras mayúsculas para agujeros y minúsculas para ejes.

La posición de la zona de tolerancia queda fijada por la distancia existente entre la línea cero o línea de referencia y la línea del límite de la tolerancia que se encuentre más próximo a la línea cero.

Las posiciones que se encuentren en la zona positiva, respecto a línea cero de referencia están determinadas en función de la **diferencia inferior**. Mientras que las posiciones que se encuentran en zona negativa, respecto a la línea cero están determinadas por la **diferencia superior**.

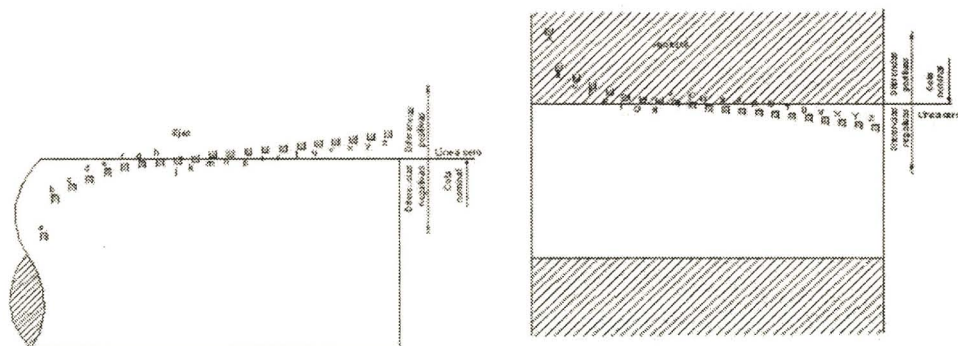


Figura 13. Posiciones relativas de ejes y agujeros según norma (ISO).

		Posiciones: a – js / A – Js											
		a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js
		A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	Js
	1600 < m ≤ 1800					430	240		120		32	0	
	1800 < m ≤ 2000												
	2000 < m ≤ 2240					480	280		130		34	0	
	2240 < m ≤ 2500												
	2500 < m ≤ 2800					520	290		145		38	0	
	2800 < m ≤ 3150												

Tabla 15. Desviaciones fundamentales (μm) para las posiciones: a – js / A – Js.

		Posiciones						
		j			k		m	n
		5 y 6	7	8	4 a 7	resto	todas	
Grupos dimensionales mm	1 < m ≤ 3	-2	-4	-6	0	0	2	4
	3 < m ≤ 6	-2	-4		1	0	4	8
	6 < m ≤ 10	-2	-5		1	0	6	10
	10 < m ≤ 18	-3	-6		1	0	7	12
	18 < m ≤ 30	-4	-8		2	0	8	15
	30 < m ≤ 50	-5	-10		2	0	9	17
	50 < m ≤ 80	-7	-12		2	0	11	20
	80 < m ≤ 120	-9	-15		3	0	13	23
	120 < m ≤ 180	-11	-18		3	0	15	27
	180 < m ≤ 250	-13	-21		4	0	17	31
	250 < m ≤ 315	-16	-26		4	0	20	34
	315 < m ≤ 400	-18	-28		4	0	21	37
400 < m ≤ 500	-20	-32		5	0	23	40	

Tabla 16. Desviaciones inferiores d_i (μm) para las posiciones j, k, m, n.

		Posiciones										x (μm)				
		J			K		M				N					
		6	7	8	≤8	>8	≤8	>8	≤8	>8	3	4	5	6	7	8
Grupos dimensionales mm	1 < m ≤ 3	2	4	6	0	0	-2	-2	-4	-4						
	3 < m ≤ 6	5	6	10	-1+x		-4+x	-4	-8+x	0	1	1.5	1	3	4	6
	6 < m ≤ 10	5	8	12	-1+x		-6+x	-6	-10+x	0	1	1.5	2	3	6	7
	10 < m ≤ 18	6	10	15	-1+x		-7+x	-7	-12+x	0	1	2	3	3	7	9
	18 < m ≤ 30	8	12	20	-2+x		-8+x	-8	-15+x	0	1.5	2	3	4	8	12
	30 < m ≤ 50	10	14	24	-2+x		-9+x	-9	-17+x	0	1.5	3	4	5	9	14
	50 < m ≤ 80	13	18	28	-2+x		-11+x	-11	-20+x	0	2	3	5	6	11	16
	80 < m ≤ 120	16	22	34	-3+x		-13+x	-13	-23+x	0	2	4	5	7	13	19
	120 < m ≤ 180	18	26	41	-3+x		-15+x	-15	-27+x	0	3	4	6	7	15	23
	180 < m ≤ 250	22	30	47	-4+x		-17+x	-17	-31+x	0	3	4	6	9	17	26
	250 < m ≤ 315	25	36	55	-4+x		-20+x	-20	-34+x	0	4	4	7	9	20	29
	315 < m ≤ 400	29	39	60	-4+x		-21+x	-21	-37+x	0	4	5	7	11	21	32
400 < m ≤ 500	33	43	66	-5+x		-23+x	-23	-40+x	0	5	5	7	13	23	34	

Tabla 17. Desviaciones superiores D_s (μm) para las posiciones J, K, M, N y valores (x).

		Posiciones											
		p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
		P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC
Grupos dimensionales mm	1 < m ≤ 3	6	10	14		18		20		26	32	40	60
	3 < m ≤ 6	12	15	19		23		28		35	42	50	80
	6 < m ≤ 10	15	19	23		28		34		42	52	67	97
	10 < m ≤ 14	18	23	28		33		40		50	64	90	130
	14 < m ≤ 18	18	23	28		33	39	45		60	77	108	150
	18 < m ≤ 24	22	28	35		41	47	54	63	73	98	136	188
	24 < m ≤ 30	22	28	35	41	48	55	64	75	88	118	160	218
	30 < m ≤ 40	26	34	43	48	60	68	80	94	112	148	200	274
	40 < m ≤ 50	26	34	43	54	70	81	97	114	136	180	242	325
	50 < m ≤ 65	32	41	53	66	87	102	122	144	172	226	300	405
	65 < m ≤ 80	32	43	59	75	102	120	146	174	210	274	360	480
	80 < m ≤ 100	37	51	71	91	124	146	178	214	258	335	445	585
	100 < m ≤ 120	37	54	79	104	144	172	210	254	310	400	525	690
	120 < m ≤ 140	43	63	92	122	170	202	248	300	365	470	620	800
	140 < m ≤ 160	43	65	100	134	190	228	280	340	415	535	700	900
	160 < m ≤ 180	43	68	108	146	210	252	310	380	465	600	780	1000
	180 < m ≤ 200	50	77	122	166	236	284	350	425	520	670	880	1150
	200 < m ≤ 225	50	80	130	180	258	310	385	470	575	740	960	1250
	225 < m ≤ 250	50	84	140	196	284	340	425	520	640	820	1050	1350
	250 < m ≤ 280	56	94	158	218	315	385	475	580	710	920	1200	1550
	280 < m ≤ 315	56	98	170	240	350	425	525	650	790	1000	1300	1700
	315 < m ≤ 355	62	108	190	268	390	475	590	730	900	1150	1500	1900
	355 < m ≤ 400	62	114	208	294	435	530	660	820	1000	1300	1650	2100
	400 < m ≤ 450	68	126	232	330	490	595	740	920	1100	1450	1850	2400
	450 < m ≤ 500	68	132	252	360	540	660	820	1000	1250	1600	2100	2600
500 < m ≤ 560	78	150	280	400	600								
560 < m ≤ 630		155	310	450	660								
630 < m ≤ 710	88	175	340	500	740								
710 < m ≤ 800		185	380	560	840								
800 < m ≤ 900	100	210	430	620	940								
900 < m ≤ 1000		220	470	680	1050								
1000 < m ≤ 1120	120	250	520	780	1150								
1120 < m ≤ 1250		260	580	840	1300								
1250 < m ≤ 1400	140	300	640	960	1450								
1400 < m ≤ 1600		330	720	1060	1600								
1600 < m ≤ 1800	170	370	820	1200	1850								
1800 < m ≤ 2000		400	920	1350	2000								
2000 < m ≤ 2240	195	440	1000	1500	2300								
2240 < m ≤ 2500		460	1100	1650	2500								

		Posiciones											
		p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
		P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC
2500 < m ≤ 2800	240	550	1250	1900	2800								
		580	1400	2100	3200								
2800 < m ≤ 3150													

NOTA: Las desviaciones fundamentales para calidades (≤ 7) se obtienen de esta tabla añadiéndoles la cantidad (x) que se indica a la derecha de la tabla anterior.

Tabla 18. Desviaciones fundamentales (μm) para las calidades (>7) para posiciones p-zc / P-ZC.

Para el rango de nominales considerado en UNE 4040-77, o sea, entre 1 y 500 mm, los diferentes valores se encuentran comprendidos en trece **grupos dimensionales principales** que son los relativos a las columnas de la izquierda de la Tabla 15, Tabla 17 y Tabla 18, en cuanto a los 25 **grupos dimensionales secundarios** están incluidos en las Tablas 17 y 18.

Como puede verse en la Tabla 12, relativa al indicativo de calidad que forma el tercer campo de la designación normalizada de tolerancias, existen 18 calidades o índices de tolerancia (IT), que están designados por los números: 01, 0, 1, 2... 15, 16.

De forma indicativa podríamos decir que las siete calidades superiores entre (01 a 5) inclusive, corresponden a la mecánica de precisión, en ellas estarían incluidos los instrumentos y accesorios de metrología.

Las calidades comprendidas entre (6 a 11) inclusive son las empleadas en elementos de acoplamiento. Las calidades comprendidas entre (12 a 16) inclusive corresponden a desbastes, preformas y elementos que no van a formar parte de acoplamientos.

1.5.2.2. Zonas de tolerancia preferente para ajustes

Incluso utilizando el sistema (ISO) para ajustes de eje único o de agujero único se obtiene un número enorme de ajustes posibles, por lo que la norma ISO 1829-75 *Selection of tolerance zones for general purposes* los restringe aún más e indica los de empleo preferente y que están formados por los siguientes agujeros:

H7, H8, H9, H11 y, ocasionalmente, **H6** y **H10** junto con los ejes preferentes que son:

g6, h6, js6, k6, n6, p6, r6, s6, f7, h7, e8, d9, h9, a11, b11, c11, h11.

En un segundo nivel de utilización los empleados serían los siguientes tipos de ejes:

g5, h5, js5, k5, m5, n5, p5, r5, s5, t5, f6, m6, t6, e7, js7, k7, m7, n7, p7, r7, s7, t7, u7, d8, f8, h8, e9, e10.

Puede observarse que, para cada grupo de diámetros nominales, resulta posible elegir un elevado número de zonas de tolerancia y de grados de calidad (IT), sin embargo, se han reducido en función de la experiencia y solamente se recomienda emplear algunas zonas que se denominan zonas de tolerancia preferente que se muestran respectivamente para ejes y agujeros en las tablas 19 y 20.

						g5	h5	js5	k5	m5	n5	p5	r5	s5	t5	
				f6	g6	h6	js6	k6	m6	n6	p6	r6	s6	t6		
				f7		h7	js7	k7	m7	n7	p7	r7	s7	t7	u7	
			d8	e8	f8		h8									
			d9	e9			h9									
			d10													
a11	b11	c11					h11									

Tabla 19. Zonas de tolerancia preferente para ejes.

						G6	H6	Js6	K6	M6	N6	P6	R6	S6	T6	
				F7	G7	H7	Js7	K7	M7	N7	P7	R7	S7	T7		
				E8	F8		H8	Js8	K8	M8	N8	P8	R8			
			D9	E9	F9		H9									
			D10	E10			H10									
A11	B11	C11	D11				H11									

Tabla 20. Zonas de tolerancia preferente para agujeros.

1.5.2.3. Normas

Las especificaciones de tolerancias dimensionales en los planos son documentos en los que confluyen las filosofías de diseño y de fabricación y, por tanto, constituyen el punto de partida de la mayor parte de los aspectos tanto teóricos como prácticos de la Metrología Geométrica. Las normas españolas (normas UNE e ISO) que recogen las cuestiones considerados en este apartado están relacionadas en la Tabla 21.

UNE EN 22768 1:1993	Tolerancias generales dimensionales
ISO 286-1:1988	Parte 1 Base de tolerancias, desviaciones y ajustes.
ISO 2768 1:1989	Modificación de la anterior
ISO 1829-75	<i>Selection of tolerance zones for general purposes</i>
UNE 1120-76	Dibujos técnicos. Notación de las tolerancias lineales y angulares
UNE 4026-75	Tolerancias de medida. Definiciones
UNE 4040-77	Tolerancias para piezas lisas hasta 500 mm. Sistema (ISO)

Tabla 21. Normas UNE e ISO sobre tolerancias dimensionales.

1.5.3. Designación de tolerancias

Existen diversas formas de representar las tolerancias dimensionales que se exponen a continuación:

1. Siguiendo la notación normalizada (ISO).
2. Con su medida nominal seguida de las desviaciones límites.
3. Con los valores máximo y mínimo.

En la designación de tolerancias, las dimensiones de las piezas o cotas se expresan en mm y las dimensiones de tolerancias y de diferencias se expresan en (μm).

1. Siguiendo la notación normalizada (ISO)

- a) Número entero en milímetros que indica el nominal de la cota.
- b) Una letra, o dos, que indican la «posición» de la zona de tolerancia, siendo dicha letra o letras mayúsculas en el caso de que la cota se refiera a un elemento o pieza que funcione como hembra o agujero en el conjunto al que va destinada, y con una letra minúscula en el caso de que funcione como elemento macho, o eje, del ensamblaje.
- c) Un número de una o dos cifras que designa la amplitud de la zona de tolerancia, o «calidad» de la misma. Ejemplo:

Ø112 H 7

Diámetro nominal, 112.

Posición de la zona de tolerancia H (la letra al ser mayúscula indica que el elemento es hembra o agujero en el montaje posterior).

Calidad de la tolerancia (IT) es 7.

Consultamos las tablas y vemos que la tolerancia $T = 35 \text{ } (\mu\text{m})$, Desviación Inferior (EI) = 0.

Diámetro máximo (DM) = $112 + 0.035 = 112.035$.

Diámetro mínimo (Dm) = $112 + 0 = 112$.

2. Con su medida nominal seguida de las desviaciones límite

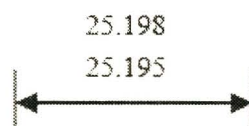
Una forma de designar una cota afectada de tolerancia es la de situar a la derecha del nominal de la cota considerada el valor entero expresado en milímetros, las desviaciones máximas toleradas para que la cota resulte aceptable en dos niveles. La desviación superior, o sea, la diferencia algebraica entre la medida máxima aceptable y el valor nominal, se colocará en el nivel superior. La desviación inferior, la diferencia algebraica entre la medida mínima aceptable y el nominal, se situará en el nivel inferior.

Por tanto, si deseamos expresar una cota cuyo valor máximo tolerado fuera 25.05 mm y cuyo valor mínimo fuera 24.98 mm, se expresaría: $25^{+0.05}_{-0.02}$. Este sistema de designación proporciona libertad total al diseñador. Si una de las diferencias es nula, se representa con la cifra (0) y si la tolerancia fuera simétrica respecto a la medida nominal, solo se representa el valor de la diferencia precedido del signo (\pm).



3. Con los valores máximo y mínimo

En este tipo de representación la medida nominal no se representa, sino únicamente los valores extremos que puede tomar.



1.5.3.1. Tolerancias para chaflanes, radios exteriores y aristas matadas

A continuación, en la tabla 22, se proporcionan las tolerancias generales para medidas de aristas matadas, radios exteriores y alturas de chaflanes según (ISO).

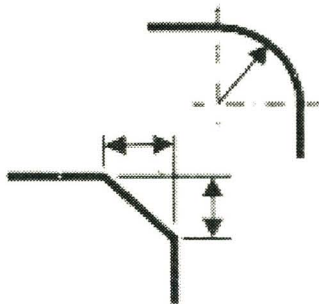


Figura 14. Acotación de chaflanes, radios exteriores o aristas matadas para tolerancias.

Clase de tolerancia		Desviaciones admisibles respecto al valor nominal		
Designación	Descripción	0,5 ¹⁾ hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6
f	fina	± 0.2	± 0.5	± 1.0
m	media			
c	grosera	± 0.4	± 1.0	± 2.0
v	muy grosera			

Tabla 22. Tolerancias para aristas matadas, radios exteriores y alturas de chaflanes.

1.5.3.2. Tolerancias dimensionales para medidas angulares

Existen algunas formas geométricas en las que, debido a sus características, las tolerancias dimensionales son muy específicas, formas tales como superficies cónicas, por ejemplo, los ajustes cónicos se utilizan en acoplamiento cónicos de utillaje y portaherramientas, etc. Tal como ocurre en el caso de las tolerancias lineales, en las angulares las tolerancias se indican cuando es necesario por el funcionamiento de la pieza o por algún requisito de resistencia. La Tabla 23 recoge las desviaciones admisibles en función de la longitud del lado menor del ángulo considerado y de las calidades establecidas y puede emplearse en general.

Clase de tolerancia		Desviaciones admisibles en función de la longitud del lado menor del ángulo considerado, en (mm).				
Designación	Descripción	Hasta 10	De 10 hasta 50	De 50 hasta 120	De 120 hasta 400	Más de 400
f	fina	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 5'$
m	media					
c	grosera	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 15'$	$\pm 0^\circ 10'$
v	muy grosera	$\pm 3^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$

Tabla 23. Tolerancias generales para medidas angulares.

Las tolerancias angulares pueden representarse de diferentes formas a saber:

1. Con su medida nominal seguida de las desviaciones límite.



2. Con su medida nominal y la desviación seguida del signo \pm cuando la desviación es simétrica.



3. Con los valores máximo y mínimo, prescindiendo de la cota nominal.



1.5.4. Ajustes

Se entiende por ajuste el conjunto formado por un par de elementos mecánicos ensamblables, a los que denominaremos eje/agujero, tales que poseyendo la

misma dimensión nominal pueda establecerse entre ellos un acoplamiento de tipo machihembrado.

Eje/agujero: estos dos términos deben ser interpretados en sentido genérico y de hecho pueden referirse a cualquier elemento o pieza exterior/interior respectivamente que forme parte de un ajuste, tanto si es cilíndrica como si es prismática, pero siempre que esté destinada a acoplarse. En ISO, las tolerancias y todos los parámetros relativos a ejes, como diámetros o superficies, calidades, posiciones etc., se representan con letras minúsculas. Las tolerancias y los parámetros relativos a agujeros, como diámetros, superficies, calidades, posiciones, etc., se representan con letras mayúsculas.

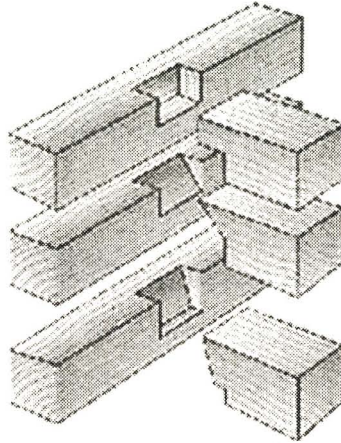


Figura 15. Ajuste machihembrado, se considera agujero/eje.

Ajuste: es el acoplamiento dimensional de dos piezas en el que una pieza encaja sobre la otra.

Eje: es cada una de las partes de una pieza que constituye un ajuste y que presenta contactos externos, es la parte contenida.

Agujero: es cada una de las partes de una pieza que constituye un ajuste y que presenta contactos internos, es la parte que contiene.

Un ajuste es también la diferencia entre las medidas de dos piezas que han de ser acopladas anteriormente a su montaje o ensamblaje. Dependiendo de las tolerancias de las dos piezas que formarán parte del acoplamiento, los ajustes pueden ser de varios tipos:

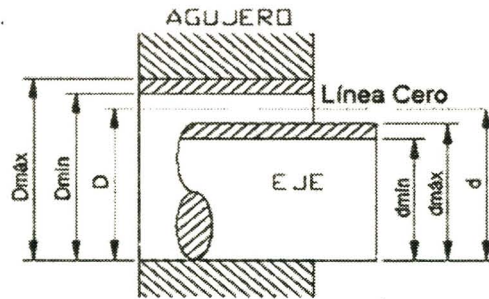


Figura 16. Representación de un ajuste.

1. Ajuste con juego o móvil (J).
2. Ajuste con aprieto o fijo (A).
3. Ajuste indeterminado (I).

Tolerancia de ajuste: es la suma aritmética de las tolerancias de los elementos de un ajuste (TA).

$$TA = T + t$$

Los ajustes en función de sus tolerancias de ajuste (TA) pueden ser de diferentes clases:

1. Ajuste con juego (J): es el ajuste que asegura siempre la existencia de un juego, es decir, de un movimiento libre entre agujero y eje tras el ensamblaje. La medida nominal es común para ambos elementos. En un **Ajuste con juego** cabe distinguir los siguientes conceptos:

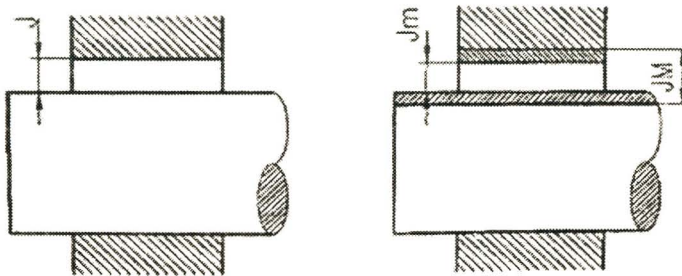


Figura 17. Ajuste con juego.

Juego máximo (JM) es la diferencia entre la medida máxima admisible del agujero y la mínima admisible del eje.

$$JM = DM - dm$$

Juego mínimo (Jm) es la diferencia entre la medida mínima admisible del agujero y la máxima admisible del eje.

$$Jm = Dm - dM$$

Tolerancia del juego (TJ) es la diferencia entre los juegos máximo y mínimo que debe coincidir con las tolerancias de agujero y eje.

$$TJ = JM - Jm = T + t$$

2. Ajuste con aprieto (A): es el ajuste que asegura siempre que será fijo, que presenta interferencia, es decir, que no existe movimiento libre, entre agujero y eje tras el ensamblaje, la medida nominal es común para ambos elementos. En un ajuste con aprieto, cabe distinguir los siguientes conceptos:

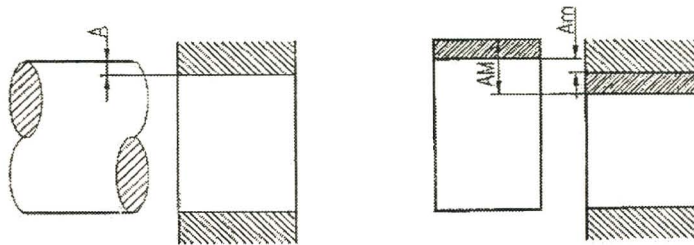


Figura 18. Ajuste con aprieto.

Aprieto máximo (AM) es la diferencia entre la medida máxima admisible del eje y la mínima admisible del agujero.

$$AM = dM - Dm$$

Aprieto mínimo (Am) es la diferencia entre la medida mínima admisible del eje y la máxima admisible del agujero.

$$Am = dm - DM$$

Tolerancia del Aprieto (TA) es la diferencia entre los aprietos máximo y mínimo que debe coincidir con la suma de las tolerancias del agujero y del eje.

$$TA = AM - Am = T + t$$

3. Ajuste indeterminado (I): también denominado de transición, es un ajuste tal que al ensamblar puede resultar en juego o aprieto, es decir, que puede ser un ajuste fijo o móvil mediante montaje selectivo, dependiendo de las medidas finales obtenidas tras la fabricación de ambos elementos, la medida nominal es común para ambos elementos. En un Ajuste indeterminado cabe distinguir los siguientes conceptos:

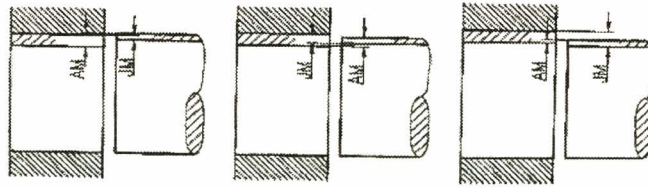


Figura 19. Ajuste indeterminado.

Juego máximo (JM) es la diferencia entre la medida máxima del agujero y la mínima del eje.

$$JM = DM - dm$$

Aprieto máximo (AM) es la diferencia entre la medida máxima del eje y la mínima del agujero.

Tolerancia del ajuste indeterminado (TI) es la suma del juego máximo y del aprieto máximo que debe coincidir con la suma de las tolerancias del agujero y del eje.

$$TI = JM - AM = T + t$$

1.5.4.1. Sistemas (ISO) de ajuste

Un sistema de ajuste es un conjunto sistemático de ajustes entre ejes y agujeros, resultado de la combinación de determinadas zonas de tolerancias, y que dan lugar a diversos juegos y aprietos.

Los sistemas de ajuste se utilizan para reducir y simplificar la enorme variedad de ajustes posibles. Se denomina sistema de ajustes (ISO) a un conjunto de ajustes limitado y determinado previamente, que es el resultado de combinar una serie de zonas establecidas de tolerancia para ejes y agujeros.

ISO emplea únicamente dos sistemas de ajuste, que se denominan sistema de **agujero base** y sistema de **eje base**.

1.5.4.1.1. Sistema de agujero base

Este sistema también se denomina de **agujero único**. Es un sistema de ajuste en el cual las diferencias fundamentales de todos los agujeros son iguales, de ahí el nombre de agujero único. ISO elige un agujero cuya diferencia inferior es nula, es decir, este sistema utiliza en todos los ajustes agujeros de posición de la franja de tolerancia **H**, mientras que para la selección de la posición de tolerancia de los ejes se deja completa libertad de selección. **H** para agujeros indica que la desviación inferior es nula.

Constituye el sistema más empleado, ya que la fabricación de exteriores, que es por otra parte la más sencilla, es la que resulta también más variada.

Desde el punto de vista metrológico este sistema encarece la verificación si se emplean en ella exclusivamente calibres de límites, ya que hará falta un mayor número de calibres de herradura (más caros) que los de tampón. Este inconveniente no resulta tan acusado y llega incluso a convertirse en ventaja eligiendo adecuadamente la utilización de instrumentos de medida y verificación por variables y por atributos.

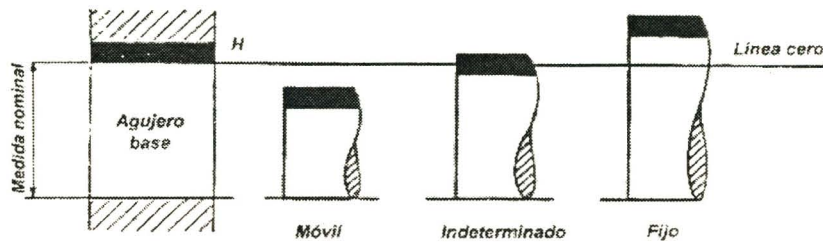


Figura 20. Posibles ajustes en un agujero base H

1.5.4.1.2 Sistema de eje base

Este sistema también se denomina de **eje único**. Es un sistema de ajuste en el cual las diferencias fundamentales de todos los ejes son iguales, de ahí el nombre de eje único. ISO elige un eje cuya diferencia superior es nula, es decir, este sistema utiliza en todos los ajustes ejes de posición de la franja de tolerancia h , mientras que para la selección de la posición de los agujeros se deja completa libertad de selección. h para ejes, indica que la desviación inferior es nula.

Es un método más engorroso para emplear en la fabricación.

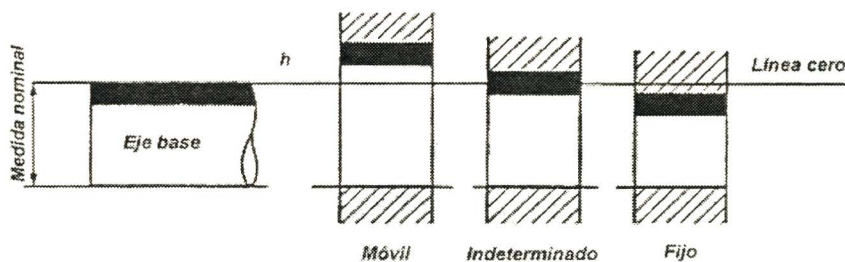


Figura 21. Posibles ajustes en un eje base h.

Sistema mixto: generalmente se debe elegir adoptar el sistema de agujero único y en ocasiones el de eje único. No obstante, a veces es preciso utilizar el sistema denominado mixto en el cual se obtienen juegos y aprietos haciendo variar simultáneamente los límites tanto de los agujeros como de los ejes. En este sistema, ni el agujero ni el eje coinciden en sus cotas límites con la cota nominal, es decir, sus posiciones son respectivamente distintas de **H** y de **h**.

1.5.4.1.3. Representación de un ajuste

La representación de un ajuste según el sistema ISO es la siguiente:

$\varnothing 60 H8g7$

\varnothing (60); Cota nominal común.

H; Zona de tolerancia del eje en mayúscula.

8; Índice de calidad.

g; Zona de tolerancia del agujero en minúscula.

7; Índice de calidad del agujero.

1.5.4.1.4. Posiciones especiales

De entre todas las posiciones posibles en el sistema ISO, merecen especial mención las siguientes:

j_s , para ejes, indica que la desviación superior es positiva y la inferior negativa, y para ambas de igual valor absoluto. Es una posición centrada con respecto a la línea cero o línea de referencia.

J_s , para agujeros, indica posición idéntica a la anterior.

Todo ello resume el Sistema ISO de Tolerancias adoptado por todos los organismos de normalización existentes en el mundo. Complementando al mismo, ISO ha publicado una ampliación de su sistema para aquellos nominales comprendidos entre 500 y 3150 mm, sin embargo, esta ampliación no tiene carácter de norma, sino tan solo de recomendación.

La principal utilidad del Sistema ISO de Tolerancias, desde un punto de vista tecnológico, es la consecución de ajustes adecuados en los montajes mecánicos.

Con vistas a la codificación, o decodificación de los símbolos relativos al segundo campo se dispone de la Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18, en las

que aparecen recogidos los valores de la **desviación fundamental** de la zona de tolerancia salvo indicación en contra.

Todo conjunto de ajustes entre ejes y agujeros perteneciente a un sistema de tolerancias se denomina sistema de ajuste. Si se fabricasen ajustes sin más, la ingente variedad de ajustes posibles que podríamos obtener mediante la combinación de las diferentes calidades, posiciones y gamas de diámetros provocaría una ingente variabilidad lo que redundaría en la necesidad de contar con una enorme cantidad de utillaje e instrumentos de control, encareciendo, complicando y entorpeciendo los procesos de fabricación, la intercambiabilidad, los controles a realizar, etc. Por ello ISO, con el fin de reducir al mínimo el número de los ajustes recomendados y para lograr un mejor aprovechamiento de las ventajas de la normalización, ha reducido la gama, estableciendo los denominados **ajustes de empleo preferente** siendo dos los únicos sistemas de ajuste: **agujero único** o agujero base y de **eje único** o eje base.

1.5.4.1.5. Grados de tolerancias

Los grados o calidades de tolerancias normalizadas están designados por las letras IT, seguidas por una cifra, pero cuando el grado de tolerancia está asociado a una letra, que representa una desviación fundamental para dar una clase o tipo de tolerancia, entonces se suprimen las letras IT, lo que nos daría por ejemplo la nomenclatura H6, referida a un agujero.

El sistema ISO prevé en total 20 grados o calidades diferentes de tolerancias normalizadas, de ellas, las comprendidas entre IT1 a IT18, ambas incluidas, son de uso general, mientras que los grados de IT0 e IT01 no son de uso general.

Los niveles de calidad de los dos elementos que forman el ajuste deben ser compatibles entre sí, preferentemente un grado superior en ejes que en agujeros, dado que resulta más barato el mecanizado de exteriores que el de interiores. También se utiliza a menudo la misma calidad para los dos elementos de un ajuste. Siguiendo las recomendaciones de ajustes preferentes para propósitos generales, tendríamos del orden de unos 50 posibles para cada nominal. Esta cantidad es lo suficientemente grande como para proporcionar al diseñador libertad de elección, pero es muy inferior a la que se podría obtener partiendo de todas las combinaciones posibles que proporciona el Sistema ISO de Tolerancias.

1.5.4.1.6. Uniones roscadas

Se denomina rosca en mecánica a un surco helicoidal construido o tallado sobre un cilindro y que posee un perfil determinado según su tipo y con un desarrollo

continuo y uniforme. Si la hélice es exterior, la rosca se denomina tornillo; y si es interior, tuerca.

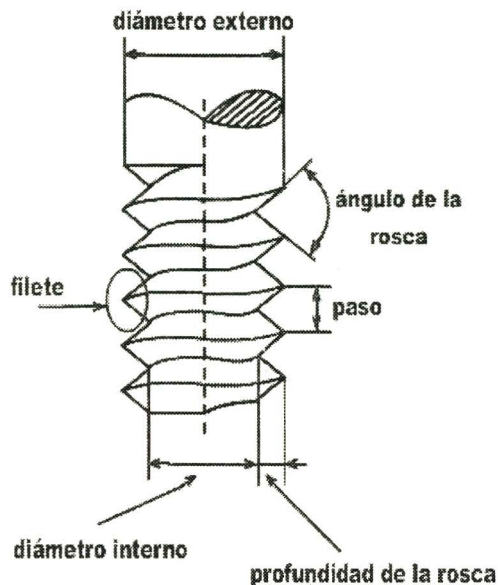


Figura 22. Rosca exterior, tornillo y elementos característicos.

Las roscas poseen una serie de elementos característicos que se definen a continuación:

Diámetro exterior: diámetro máximo de la rosca.

Diámetro interior: diámetro mínimo de la rosca.

Diámetro medio: diámetro virtual en el que el ancho del vano coincide con el ancho del filete.

Paso: distancia axial entre dos filetes contiguos. También se define como el número de hilos por unidad de longitud (en pulgadas). En las roscas de varias entradas se distingue el paso de filete y el paso de rosca.

Filete: también hilo, es la parte saliente del surco, en el que la parte más baja se denomina fondo y la más elevada cresta.

Ángulo de hélice: es el ángulo formado por la tangente al filete con la dirección perpendicular del eje.

Flanco: es la superficie de contacto tanto para el tornillo como para la tuerca.

Profundidad de la rosca: es la altura del filete que se corresponde con la diferencia existente entre su diámetro exterior e interior.

Los elementos roscados exteriores, cuando se montan sobre otros interiores, pueden realizar el acoplamiento con mayor o menor juego y, por tanto, también están sometidos a un sistema de tolerancias que los garantice. El sistema (ISO) de tolerancias de roscas posee analogías con el de tolerancias dimensionales en cuanto a que también define posiciones de tolerancia y amplitudes.

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							3h4h	4h	5h4h
Media		6e	7e6e	5g6g	6g	7g6g	5h6h	6h	7h6h
Basta					8g	9g8g			

Tabla 24. Clases de tolerancias recomendadas para tornillos.

Clase de calidad	Posición de tolerancia G			Posición de tolerancia H		
	S	N	L	S	N	L
Fina				4H	5H	6H
Media	5G	6G	7G	5H	6H	7H
Basta		7G	8G		7H	8H

Tabla 25. Clases de tolerancias recomendadas para tuercas.

Las tolerancias en las roscas deben garantizar:

- Intercambiabilidad.
- Solidez.

Las roscas deben reunir características de calidad de fabricación que garanticen su correcto perfil y que se traducirán en última instancia, en que los flancos del filete apoyen sobre toda su superficie y a lo largo de la longitud roscada. El montaje tornillo - tuerca guarda analogías con el sistema de agujero base, así pues para la tuerca, el perfil teórico será el perfil límite inferior, mientras que para el tornillo, el perfil teórico será el perfil límite superior.

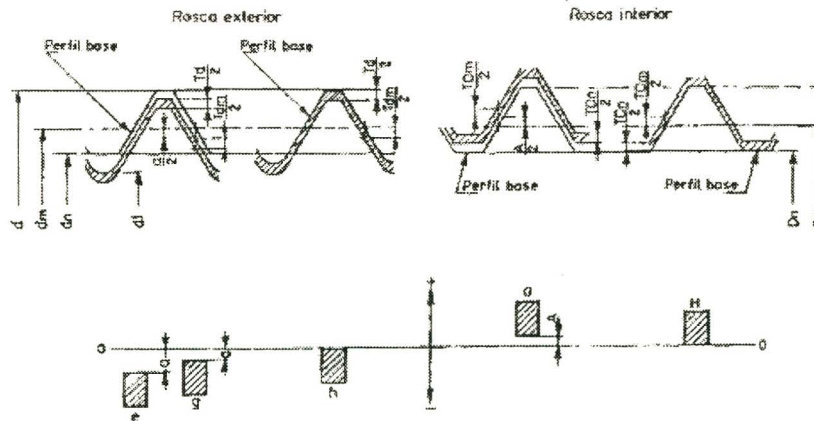


Figura 23. Situación de las posiciones de tolerancia de tornillo y tuerca

Las tolerancias de roscas se definen mediante un número que indica la calidad de la tolerancia y con una letra que indica la posición de la tolerancia, la letra es minúscula para tornillos y mayúscula para tuercas. Como puede observarse los conceptos y la codificación son similares a los empleados en el sistema ISO de tolerancias, lo que cambia en el caso de las roscas es el orden de la codificación, ya que en los elementos roscados en primer lugar se indica la calidad y a continuación la posición, es decir a la inversa, para evitar confusiones con las tablas. La selección de la rosca dependerá del uso al que vaya a ser destinada y también se considera la longitud roscada.

Las posiciones más comunes son:

- Para tornillos: e, g y h.
- Para tuercas: G y H.

En cuanto a las calidades van desde la 4 hasta la 9, teniendo en cuenta que también contemplan la medida de los diámetros, la longitud del acoplamiento y la calidad de elaboración.

A continuación, se muestra la designación de la tolerancia de una rosca que se aplica al diámetro medio y al exterior y se efectúa estableciendo en primer lugar la calidad y a continuación la posición:

Ej.: tornillo M16 – 6g.

M16, denominación de la rosca y medida nominal.

6g, clase de tolerancia para el paso y la posición de la cresta.

1.5.4.1.7. Consideraciones en la elección de ajustes

En la elección de los ajustes se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Evitar el exceso de precisión si no está justificado técnicamente e igualmente no establecer cualquier precisión que no responda a una necesidad.
- La precisión tiene un coste, por lo cual las tolerancias serán todo lo amplias que sea posible siempre que ello no comprometa el correcto funcionamiento del conjunto.
- Cuando sea posible se debe diseñar con tolerancias más amplias para agujeros que para ejes.
- En la elección de las tolerancias se tendrá en cuenta que las calidades de ambos elementos, eje y agujero, no difieran en más de dos índices.
- Las experiencias sobre comportamientos de ajustes similares con funcionamiento correcto, han de ser consideradas.

Cuando se determinan los juegos límites de un ajuste, deben tenerse en cuenta los factores siguientes:

- Velocidad a la que habrá de funcionar.
- Clase de material con el que se fabricarán las piezas.
- Lubricación del conjunto.
- Temperatura que alcanzará cuando esté en funcionamiento.
- Desgastes que previsiblemente sufrirá.
- Estado superficial.
- Geometría del conjunto.
- Conocimiento de los esfuerzos a los que estará sometido.

Una de las ventajas de la Tabla 26, a continuación, es que nos indica el tipo de ajuste en cuanto a su movilidad o fijeza, interferencia que se corresponde con cada una de las codificaciones (ISO). Estos tipos de fijeza o movilidad, holgado, deslizante, con giro, etc., implican condiciones de montaje y desmontaje diferentes según su dureza que constituyen otro factor que ha de ser tenido en cuenta.

Tipo	Calidad superficial	Sistema				Clase	Características
		Agujero base		Eje base			
		Agujero	Eje	Eje	Agujero		
Fino	N5÷N8	H7	s6/r6	h6	s7/r7	Prensado	Montaje a presión. No seguro de giro
			n6		N7	Forzado duro	Montaje difícil. Seguro de giro
			k6		K7	Forzado medio	Montaje martillo. Seguro de giro y deslizamiento
			j6		J7	Forzado ligero	Montaje a mano. Ambos seguros
			h6		H7	Deslizante	
			g6		G7	Giratorio	Juego pequeño
			f7		F8	Holgado	Juego mediano
Medio	N9	H8	h9	h9	H9	Deslizante	
			e8		E9	Giratorio	Juego mediano
			d9		D10	Holgado	Juego amplio
Basto	N10÷N11	H11	h11	h11	H11	Deslizante	
			d9		D10	Giratorio	Juego mediano
			e11		E11	Holgado	Juego amplio
			a11		A11	Muy holgado	

Tabla 26. Ajustes recomendados ISO y clases de ajuste obtenido.

1.5.4.1.8. Control de tolerancias dimensionales

Tras la fabricación, las piezas han de ser controladas metrologicamente para comprobar que sus tolerancias de fabricación son menores o iguales que sus tolerancias de diseño, es decir, que cumplen con los requisitos dimensionales especificados en el plano. Dichos controles metrologicos pueden ser de dos tipos:

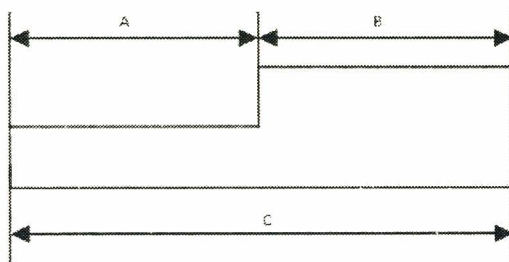
- Verificaciones.
- Mediciones.

1.5.4.1.9. Operaciones con tolerancias

Suele resultar habitual tener que cambiar las disposiciones iniciales de las cotas sometidas a tolerancia por otras también sometidas a tolerancia, o bien tener que modificar el tipo de indicación de una tolerancia para facilitar los controles metrológicos y es necesario tener en cuenta que:

La determinación de la tolerancia resultante de una cadena de tolerancias en la misma dirección se calcula sumando los valores de las tolerancias de cada uno de los componentes que forman la cadena.

En el caso de que A, B y C sean magnitudes sometidas a tolerancias y dispusiéramos de las magnitudes A y su tolerancia y B y su tolerancia, se cumplirá que:



$$C = A + B \quad C_{\text{máx}} = A_{\text{máx}} + B_{\text{máx}} \quad C_{\text{mín}} = A_{\text{mín}} + B_{\text{mín}} \quad T_{\text{ol}}C = T_{\text{ol}}B + T_{\text{ol}}A$$

En el caso de que las cotas funcionales sometidas a tolerancia fuesen A y C y deseamos calcular B, estaremos efectuando una sustracción de cotas.

$$B = C - A$$

$$T_{\text{ol}}B = T_{\text{ol}}C - T_{\text{ol}}A$$

En algunos casos puede ocurrir que se deban sustituir cotas sometidas a tolerancias, esto no es muy aconsejable ya que siempre se obtendrán tolerancias menores como resultado de la operación y además deben seguirse ciertos criterios:

- La cota a sustituir debe estar afectada de una tolerancia mayor que la que se conserva, de otro modo habría que modificar el plano.
- El método de cálculo de la nueva cota ha de comenzar por plantear la relación de la cota que se sustituye.

Cuando una cota funcional no pueda identificarse en el plano con una cota de mecanizado, es necesario calcularla de acuerdo con los criterios enunciados.

1.5.5. Intercambiabilidad

En la fabricación en serie, se producen elementos que posteriormente tienen que ser acoplados; de tal forma que dichos acoplamientos reúnan condiciones de funcionamiento. Si tenemos, por ejemplo, 100 ejes y 100 agujeros con los que se pueden formar 100 conjuntos acoplados, y ocurriera que cualquiera de esos ejes se pudiera acoplar en cualquiera de los agujeros de forma aleatoria y sin necesidad de reajustes y en condiciones correctas de funcionamiento y cumpliéndose que cualquiera de los acoplamientos así obtenidos fuese apto para funcionar, diríamos que entre ellos existe intercambiabilidad.

La intercambiabilidad se consigue por medio de la adecuada elección de las tolerancias de fabricación como ya se ha visto.

1.5.6. Montaje selectivo

También conocido como apareamiento mediante selección, se utiliza en aquellos casos en los que se necesita una precisión especial, y los acoplamientos, para ser posibles, requerirían el empleo de tolerancias muy estrechas, lo que incidiría en el costo de producción de los mismos, por ello, y para evitar el encarecimiento de la fabricación se acude a este sistema.

Consiste simplemente en producir piezas con tolerancias de diseño algo más amplias de las que en realidad son necesarias, y posteriormente clasificarlas en grupos o familias en razón de las tolerancias de fabricación obtenidas. Los acoplamientos solo serán posibles entre piezas pertenecientes a un mismo grupo o «familia», consiguiéndose de este modo ajustes de gran exactitud, pero a un coste más reducido.

La intercambiabilidad en este caso no se consigue plenamente, sino que queda reducida. Este sistema se suele emplear en la fabricación de rodamientos y ha venido siendo utilizado en la industria automovilística. Cuando se fabrica sobre la base de tres grupos, la intercambiabilidad queda reducida a un tercio. Pero existen fabricaciones en las que se mantienen hasta veinte familias. Los problemas surgen cuando los elementos acoplados sufren desgastes, que llevan a los componentes que forman el acoplamiento lejos de su grupo dimensional de origen. Lo que hace necesario contar con reservas de recambios que no pueden ser de los distintos grupos, puesto que los desgastes los harían inútiles, sino que deben dejarse inacabados para poder adaptarlos. Otra de las desventajas de este sistema, es la formación de acoplamientos imperfectos, problema que surge

cuando la frecuencia de distribución de los intervalos de tolerancia de los componentes que intervienen en el acoplamiento no es aproximadamente la misma, como por ejemplo el caso de un conjunto émbolo, pistón.

1.5.7. Medidas de tolerancia libre

Se denominan también diferencias admisibles para medidas sin indicación de tolerancia. Son las diferencias de valor numérico estipuladas para aquellas medidas nominales de piezas de escasa precisión mecanizadas en el taller.

Existen muchas medidas que no necesitan estar afectadas de una tolerancia particular. Para facilitar su acotación, estas medidas se dejan sin tolerancia y se les da a todas una misma calidad, la norma DIN 7 168 prevé cuatro calidades que sirven para las diferentes precisiones, y que se denominan respectivamente fino, medio, basto y muy basto. A continuación, se detallan en la Tabla 27 y Tabla 28 sus valores, tanto para las magnitudes lineales como para las angulares.

Grado de precisión	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 315	Más de 315 hasta 1000
Fino	± 0.05	± 0.05	± 0.1	± 0.15	± 0.2	± 0.3
Medio	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 0.8
Basta	-	± 0.2	± 0.5	± 0.8	± 1.2	± 2
Muy Basto	-	± 0.5	± 1	± 1.5	± 2	± 3

Tabla 27. Tolerancias libres para magnitudes lineales en las diferentes calidades.

Grado de precisión	Medidas nominales (mm) (longitud del lado más corto)			
	Hasta 10	Más de 10 hasta 50	Más de 50 hasta 120	Más de 120
Fino				
Medio	± 1°	± 30'	± 20'	± 10'
Basta				
Muy basta	± 3°	± 2°	± 1°	± 30'

Tabla 28. Tolerancias libres para magnitudes angulares en las diferentes calidades.

1.5.8. Conversión de unidades

La conversión de pulgadas y fracciones de pulgada, a milímetros y viceversa en aquellas medidas sometidas a tolerancia, debe realizarse siguiendo las indicaciones proporcionadas por la norma UNE 4-035-81 ISO 370. En dicha norma se detallan los diferentes métodos de redondeo y los procedimientos a seguir en casos especiales para poder asegurar la intercambiabilidad correspondiente a las tolerancias de las que se trata.

1.6. Tolerancias geométricas

1.6.1. Antecedentes

Durante la Segunda Guerra Mundial, en Gran Bretaña, se observó que una parte importante de la producción destinada a la industria bélica no ensamblaba adecuadamente, esto se atribuyó a errores de signo provenientes de los sistemas de coordenadas, pero sobre todo a la falta de información de los planos. En este tema trabajaron F. H. Rolt y Stanley Parker, de la Royal Torpedo Factory, quienes idearon un sistema de posicionamiento de tolerancias, con zonas de tolerancias circulares. Un ejemplo clásico de las dificultades que presenta la utilización de tolerancias dimensionales únicamente vendría dada en el caso del ensamblaje de tres piezas con un orificio sometido a tolerancia dimensional y fabricadas en lugares diferentes por diferentes personas y que tuviera que ensamblarse con un eje también procedente de una fabricación distinta y sometido a tolerancia dimensional, en el que puede darse el caso de que las posibles cotas efectivas logradas, aun estando entre los límites admisibles de las tolerancias dimensionales establecidas, podrían, sin embargo, no bastar para garantizar el ajuste del conjunto por cuestiones de posición. Tras la guerra, conscientes del problema, los equipos técnicos, continuaron trabajando en los estándares, publicando un juego de normativa en 1944. En 1948 apareció el *Dimensional Analysis of Engineering Design*, que sería el primer estándar completo en incluir conceptos tanto sobre dimensiones como sobre posicionamientos. En EE. UU. se fabricaron y enviaron a Europa numerosas piezas de repuesto para apoyar la guerra y se observó también que muchas de ellas ensamblaban mal o incluso que no servían. Chevrolet publicó en 1940 un manual para delineantes que incluía temas de posicionamiento de tolerancias, *Draftsman's Handbook*, y en 1945 el ejército de EE.UU. elaboró un documento titulado *Ordinance Manual on Dimensioning and Tolerancing*, que introducía el uso de símbolos en lugar de anotaciones para definir el posicionamiento de las tolerancias. En 1946 se publicó

el *American Standard Drawing and Drafting Room Practice*. En 1949 el ejército norteamericano, como antes había hecho el británico, realizó un trabajo sobre dimensiones y tolerancias denominado MIL-STD-8, seguido de otro el MIL-STD-8B, en el año 1959, que aprobaba el empleo de 7 símbolos e introducía un método operacional para el dimensionamiento funcional. También en EE. UU la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) publicó en 1952 el *SAE Aeronautical Drafting Manual*. EE. UU. mantenía tres equipos separados dedicados al tema de estándares: ASA, SAE y el propio ejército. En el año 1957 ASA aprobó un estándar de dimensiones y tolerancias junto con canadienses y británicos. En 1966, tras años de discusiones, la *American National Standards Institute* (ANSI), anteriormente ASA, publicó el ANSI Y14.5, que se renovó en 1973 cambiando las notas por símbolos, la actual se publicó en 1994.

1.6.2. GD&T

Geometric Dimensional and Tolerancing (GD&T), en español la notación es (DTG) correspondiente a 'Dimensiones y Tolerancias Geométricas', es un conjunto de símbolos estandarizados que definen las características de una pieza y sus zonas de tolerancia. Tanto los símbolos como su interpretación están regulados por la norma ANSI Y14-5-M-1994 de la *American National Standards Institute*.

GD&T es también una filosofía que define la función o cometido de la pieza, permitiendo que el diseñador pueda comunicar, mediante su utilización en los planos, cómo va a funcionar la pieza en el conjunto del que va a formar parte, para que así el centro de fabricación pueda entender sus necesidades específicas de diseño sin que existan dudas o posibles interpretaciones al respecto, ya que en numerosas ocasiones el correcto montaje de las piezas depende de la relación existente entre la desviación geométrica y la desviación dimensional de los elementos a ajustar.

Del mismo modo que existe una desviación dimensional que es regulable y controlada a través de un sistema de tolerancias dimensionales, se crearon también una serie de símbolos, trece en total, referidos a las características geométricas utilizadas en el lenguaje de GD&T. Los trece símbolos afectan a cuestiones tales como el perfil, la angularidad, la perpendicularidad, el paralelismo, la concentricidad, la posición, el control circular y el control total.

La creciente difusión de las GPS (*Geometrical Product Specifications*) y de la VGP (Verificación Geométrica del Producto) es imparable por las ventajas que ofrecen. Este lenguaje está siendo desarrollado en los últimos años por el comité

técnico 213 (*TC213*) de ISO que ya lleva publicadas numerosas normas y especificaciones técnicas, más de 100, bajo la denominación *GPS*. El denominado Plan Maestro del (*TC213*) está reflejado en ISO 14638 y en él se consideran los siguientes tipos de normas:

- (GPS) Fundamentales, son reglas para dimensionado y tolerado.
- (GPS) Globales.
- (GPS) Generales.
- (GPS) Complementarias.

El Plan Maestro se basa en un modelo matricial que aparece en los documentos (*GPS*), y en el cual indica qué partes están afectadas por qué documentación.

	NORMAS GLOBALES GPS					
	MATRIZ GENERAL GPS					
Tamaño	1	2	3	4	5	6
Distancia						
Radio						
Ángulo						
Forma de una línea independiente de un dato						
Forma de una línea dependiente de un dato						
Forma de una superficie independiente de un dato						
Forma de una superficie dependiente de un dato						
Orientación						
Localización						
Cabeceo Circular						
Cabeceo total						
Datos						
Perfil de Rugosidad						
Perfil de Ondulación						
Perfil Primario						
Defectos Superficiales						
Bordes, orillas						

Tabla 29. Matriz general (GPS).

Las columnas se refieren respectivamente a los siguientes temas:

1. Codificación.
2. Definición y valores teóricos.
3. Definición de la característica.
4. Evaluación de desviaciones de la pieza
5. Requisitos de medición.
6. Requisitos de calibración, patrones.

La matriz es una potente herramienta de desambiguación, ya que recoge y trata todos los aspectos que pueden generar dudas, precisar aclaraciones y, en última instancia, causar errores y encarecer la producción.

Los requisitos dimensionales que pueden afectar a una pieza como forma, orientación, localización, variación y perfil, pueden cada una de ellas estar referidas a diferentes características a su vez indicadas por los citados símbolos como puede observarse en la Tabla 30 que se muestra a continuación.

	TOLERANCIAS	CARACTERÍSTICAS	SÍMBOLO
Elementos simples (Sin referencia)	Forma	Rectitud	—
		Planitud	
		Redondez	
		Cilindricidad	
Elementos simples o asociados		Perfil de una línea	
		Perfil de una superficie	
Elementos asociados. (Con referencia)	Orientación	Paralelismo	//
		Perpendicularidad	
		Angularidad	
	Localización	Posición	
		Concentricidad y Coaxialidad	
		Simetría	
	Alabeo	Alabeo-Radial	
		Alabeo-Axial	

Tabla 30. Tipos de tolerancias geométricas, características y símbolos.

1.6.2.1. Interpretación de los símbolos

1. Rectitud: es una condición en la que todos los puntos forman una línea recta, la tolerancia se representa como dos líneas paralelas.

2. Plano: es una condición en la que todos los puntos en una superficie están en un plano, la tolerancia se especifica con dos planos paralelos.

3. Redondez o circularidad: todos los puntos en una superficie forman un círculo. La tolerancia se especifica como dos círculos concéntricos.

4. Cilindricidad: condición en la que todos los puntos de la superficie son equidistantes a un eje común. Una tolerancia cilíndrica se especifica definida entre dos cilindros concéntricos.

5. Perfil: es un método de tolerancia para controlar superficies irregulares, líneas, arcos o planos normales. Los perfiles se pueden aplicar a elementos de líneas individuales o a toda la superficie de la pieza. La tolerancia del perfil especifica un límite uniforme a lo largo del perfil real dentro del que se deben situar los elementos de la superficie.

6. Angularidad: la condición de una superficie o eje que forma un ángulo específico (aparte de 90°), con otro eje o plano. La zona de tolerancia está definida por dos planos paralelos al ángulo básico específico desde el eje o plano de un dato.

7. Perpendicularidad: la condición de una superficie o eje que forma un ángulo recto con otro plano o eje. La tolerancia de perpendicularidad especifica una zona definida por dos planos perpendiculares al otro plano o eje del dato o una zona definida por dos planos paralelos perpendiculares al eje del dato.

8. Paralelismo: la condición de una superficie o eje equidistantes a todos los puntos desde el plano o eje del dato. La tolerancia de paralelismo especifica una zona que está definida por dos planos o líneas paralelas al plano o eje del dato o una zona de tolerancia cilíndrica cuyo eje sea paralelo al eje de un dato.

9. Concentricidad: los ejes de todos los elementos locales cruzados de una superficie de revolución son comunes a la característica del eje del dato.

10. Posición: la tolerancia de posición define una zona en la que el eje central o plano central puede variar desde la posición real. Una tolerancia de posición es la variación total admisible entre la situación de una característica y su situación exacta. Para características cilíndricas como agujeros y diámetros externos, la

tolerancia de posición es, por lo general, el diámetro de la zona de tolerancia, donde se deben situar los ejes de la característica. Para las características que no sean redondeadas, como ranuras y lengüetas, la tolerancia de posición es el ancho de la zona de tolerancia donde se debe situar el centro del plano de la característica.

11. Control circular: permite controlar los elementos circulares de una superficie. La tolerancia se aplica independientemente a cualquier posición circular de medición ya que la pieza se puede rotar 360°. Una tolerancia de control circular aplicada a superficies construidas alrededor del eje de un dato controla las variaciones acumulativas de circularidad y axialidad. Cuando lo aplicamos a superficies construidas en ángulos rectos al eje del dato, controla elementos circulares de la superficie de un plano.

12. Control total: supone control compuesto de todos los elementos de la superficie. La tolerancia se aplica de forma simultánea a elementos circulares y longitudinales, ya que la pieza se rota 360°. El control total permite controlar la variación acumulativa de circularidad, cilindridad, rectitud, coaxialidad, angularidad, conicidad y perfil siempre que se aplique a superficies construidas alrededor del eje de un dato. Cuando se aplica a superficies construidas en ángulo recto en relación con el eje del dato, controla las variaciones acumulativas de perpendicularidad y de plano.

Símbolo	Descripción
	Rectitud
	Plano
	Redonde
	Cilindricidad
	Perfil
	Angularidad
	Perpendicularidad
	Paralelismo
	Concentricidad
	Posición
	Control circular
	Control total

Tabla 31. Tolerancias geométricas características y símbolos.

1.6.2.2. Categorías de tolerancias geométricas

Las tolerancias geométricas se clasifican en diferentes categorías dependiendo de los aspectos a los que afecten y que pueden ser los siguientes:

- Tolerancias geométricas de forma.
- Tolerancias geométricas de posición.
- Tolerancias geométricas de localización.
- Tolerancias geométricas de cabeceo.

1.6.2.2.1. Tolerancias geométricas de forma

Las tolerancias geométricas pueden afectar a diferentes aspectos, como por ejemplo la forma pero a su vez la tolerancia geométrica de forma puede estar referida a la rectitud, a la planicidad, a la redondez, a la cilindridad, o bien a la

forma de una línea cualesquiera o de una superficie cualesquiera. En lo referente a la rectitud la línea cuya rectitud se controla mediante la tolerancia puede estar contenida en una superficie que ha de ser paralela a otra, o bien ser cualquiera de las generatrices de un cilindro o pertenecer al eje de un cilindro, tal como se muestra en la Tabla 32, a continuación:

Tolerancias de Forma		
Rectitud		Una línea contenida en la superficie superior paralela al plano de proyección sobre el que se da la inclinación, debe estar contenida entre dos líneas paralelas distantes en $\pm 0,1$ (d es cualquier distancia).
		Cualquier generatriz del cilindro ha de estar comprendida entre dos rectas // separadas entre sí 0,06 mm
		El eje del cilindro ha de estar comprendido en una zona cilíndrica de diámetro 0,06 mm
Planitud		La superficie debe estar comprendida entre dos planos // separados entre sí, 0,06 mm
Redondez		El contorno del cono debe estar comprendido entre dos circunferencias separadas entre sí 0,06 mm
Cilíndricidad		La superficie considerada debe estar comprendida entre dos cilindros coaxiales separados entre sí 0,07 mm.
Forma de una línea cualquiera		La línea debe estar comprendida entre dos líneas envolventes de círculos de diámetro $\pm 0,05$ cuyos centros están situados sobre una línea con la forma geométrica teórica.
Forma de una superficie cualquiera		La superficie debe estar comprendida entre dos superficies envolventes de esferas de diámetro $\pm 0,2$ cuyos centros están situados sobre una superficie con la forma geométrica correcta.

Tabla 32. Tolerancias geométricas de forma y representación.

1.6.2.2.2. Tolerancias geométricas de posición

Las tolerancias geométricas que guardan relación con la posición pueden referirse a paralelismo, perpendicularidad, inclinación, posición o ubicación, coaxialidad, simetría, oscilación circular y oscilación total, tal como se muestra en la Tabla 33, a continuación:

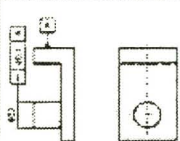
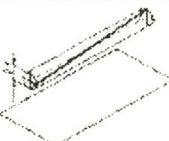
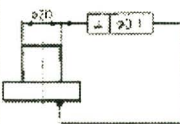

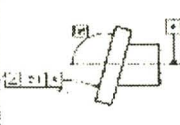

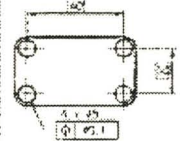
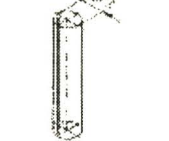
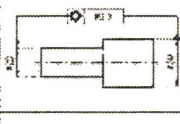

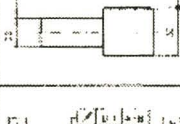

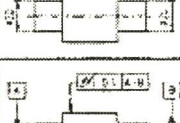

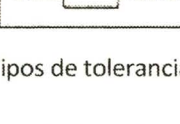
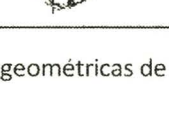
Tolerancia	Ejemplo	Zona de tolerancia	Descripción
Paralelismo			El eje del elemento es paralelo al plano de referencia cuando está situado dentro de un cilindro de eje coincidente con el nominal y diámetro la tolerancia.
Perpendicularidad			El eje del elemento es perpendicular al plano de referencia cuando está situado dentro de un cilindro de eje coincidente con el nominal y diámetro la tolerancia.
Inclinación			El plano debe estar situado entre dos planos paralelos entre sí, separados la tolerancia y que forman un ángulo respecto al eje de referencia igual a la cota rectangular especificada.
Posición			El eje de cada taladro debe estar situado dentro de un cilindro de diámetro igual a la tolerancia y eje situado en las posiciones "teóricamente exactas".
Coaxialidad			El eje del elemento es coaxial respecto al eje de referencia cuando está dentro de un cilindro de diámetro la tolerancia y eje la referencia.
Simetría			El plano medio de los elementos definidos por la cota es simétrico respecto al plano de referencia cuando está comprendido entre dos planos paralelos, simétricos respecto a la referencia y separados la tolerancia.
Oscilación circular			En cualquier sección recta, la oscilación del radio no debe ser mayor de la tolerancia en una vuelta completa.
Oscilación total			En cualquier punto de la superficie, la oscilación del radio no debe ser mayor de la tolerancia en una vuelta completa.

Tabla 33. Tipos de tolerancias geométricas de posición y representación.

1.6.2.2.3. Tolerancias de localización

Las tolerancias geométricas que afectan a la localización pueden estar relacionadas con la posición, la concentricidad y coaxialidad o con la simetría, tal como se muestra en la Tabla 34, a continuación:


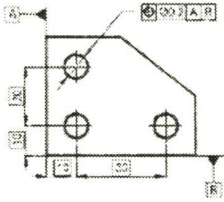
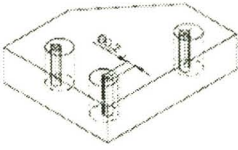

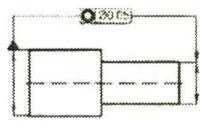
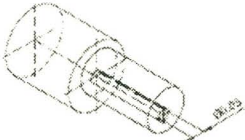

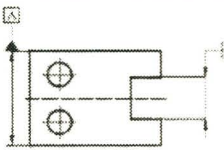
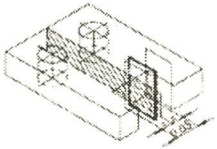
<p>Posición</p>				<p>Cada uno de los ejes de los tres orificios deberá estar situado dentro de un cilindro de diámetro 0.2 mm, cuyo eje coincidirá con la posición teórica exacta de los ejes de dichos orificios la cual ha sido establecida con respecto a los planos de referencia A y B.</p>
<p>Concentricidad y Coaxialidad</p>				<p>El eje del cilindro perfilado deberá estar situado dentro de un cilindro de diámetro 0.05 mm, y coaxial con el eje de referencia A.</p>
<p>Simetría</p>				<p>El plano de simetría de la ranura deberá estar situado entre dos cilindros paralelos tangenciales 0.05 mm, y espaciados simétricamente con respecto al plano medio A de referencia.</p>

Tabla 34. Tipos de tolerancias geométricas de posición y representación.

1.6.2.2.4. Tolerancias de cabeceo

Las tolerancias geométricas relacionadas con el cabeceo pueden afectar a los siguientes aspectos: oscilación circular radial, oscilación circular axial, oscilación total radial, oscilación total axial, tal como se muestra en la Tabla 35, a continuación:

CARACTERÍSTICAS	SÍMBOLO	INDICACIÓN EN EL DIBUJO	ZONA DE TOLERANCIA	INTERPRETACIÓN
Circular				OSCILACION CIRCULAR RADIAL: En cualquier posición de medición radial, la oscilación máxima del contorno de la sección correspondiente está limitada por dos círculos concéntricos cuya diferencia de radios es 0,1 mm, y cuyo eje coincide con el eje de referencia A, durante una revolución completa de la pieza alrededor de dicho eje.
				OSCILACION CIRCULAR AXIAL: En cualquier posición de medición axial, la oscilación máxima del contorno de la sección correspondiente está limitada por dos círculos paralelos separados 0,1 mm, y cuyos ejes coinciden con el eje de referencia A, durante una revolución completa de la pieza alrededor de dicho eje.
Total				OSCILACION TOTAL RADIAL: En toda la superficie cilíndrica, la máxima oscilación radial que puede presentar la misma está limitada por dos cilindros concéntricos cuya diferencia de radios es 0,1 mm, y cuyos ejes coinciden con el eje de referencia A, durante varias revoluciones de la pieza alrededor de dicho eje y con desplazamiento axial del equipo de medida.
				OSCILACION TOTAL AXIAL: En toda la superficie especificada, la máxima oscilación axial que puede presentar la misma está limitada por dos cilindros paralelos separados 0,1 mm, y cuyos ejes coinciden con el eje de referencia A, durante varias revoluciones de la pieza alrededor de dicho eje y con desplazamiento radial del instrumento de medida.

Tabla 35. Tipos de tolerancias geométricas de posición y representación.

1.6.2.3. Indicaciones de tolerancias: *datum*

Las distintas características de las tolerancias geométricas se indican en los planos mediante una serie de símbolos denominados *datum*, que se colocan sobre el elemento a controlar, como con una indicación de referencia que puede ser incluso parcial, y también existen símbolos para mostrar que una cota determinada debe poseer el valor teóricamente exacto. Los diferentes *datum* se muestran a continuación en la Tabla 36.




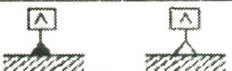




Descripción		Simbolo
Indicación del elemento controlado	Directamente	
	Con letra	
Indicación de la referencia	Directamente	
	Con letra	
Indicador de referencia parcial		
Cota teóricamente exacta		
Zona de tolerancia proyectada		
Condición de máximo material		

Tabla 36. Datum para indicar características.

Un *datum* es un plano, línea, punto o cilindro teóricamente ideal y una característica *datum* es, pues, una característica física de la parte indicada por un símbolo de característica *datum*. Estos símbolos son referenciados por uno o más referencias de características *datum* mediante las cuales se indican mediciones con respecto a la característica *datum* y que pueden mostrarse en un rectángulo referencia *datum*.

1.6.2.4. Marco de control

En este sistema DTG, denominamos marco de control o rectángulo de tolerancia, en inglés "*Feature Control Frame*" (FCF), a un marco o rectángulo compartimentado en dos o más casillas que de izquierda a derecha puede contener la información siguiente:

1. Tipo de tolerancia.
2. Perfil de la zona de tolerancia.
3. Valor de la tolerancia.
4. Modificador de la condición en la que se aplica la tolerancia.

5. Referencias *datum* con sus respectivos modificadores.

\oplus	0.01	C	A	B
----------	------	---	---	---

1. Elemento controlado.
2. Elemento controlado respecto a una referencia.
3. Tolerancia restrictiva.

Especificaciones restrictivas

Cuando hay que especificar más de una tolerancia afectando a un elemento, se darán las especificaciones en rectángulos colocados uno sobre otro.

Cuando la tolerancia se aplique a una longitud parcial en cualquier posición, el valor de la citada longitud debe añadirse detrás del valor de la tolerancia y separado por una barra inclinada, y si se tratase de una superficie la forma de indicarlo sería la misma.

Si la especificación referida a un elemento completo se debe complementar con otra referida a una parte de él, esta última va colocada en otro marco.

Si la tolerancia se aplica a una parte concreta del elemento, debe dimensionarse con la ayuda de cotas y una línea gruesa de trazo y punto.

1.6.2.5. Características y referencias *datum*

Existen, pues, trece símbolos de características geométricas utilizados en DTG divididos a su vez en cinco categorías: forma, orientación, localización, variación y perfil y en la Tabla 37, a continuación, se muestran indicando si conllevan referencia *datum* o no.

CATEGORÍA	CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	REFERENCIA A DATUM*
FORMA	PLANICIDAD		NUNCA USA REFERENCIA A UN DATUM
	LINEARIDAD		
	CIRCULARIDAD		
	CILINDRICIDAD		
ORIENTACIÓN	PERPENDICULARIDAD		SIEMPRE USA REFERENCIA A UN DATUM
	ANGULARIDAD		
	PARALELISMO		
LOCALIZACIÓN	POSICIÓN		SIEMPRE USA REFERENCIA A UN DATUM
	CONCENTRICIDAD		
VARIACIÓN	VARIACIÓN CIRCULAR		SIEMPRE USA REFERENCIA A UN DATUM
	VARIACIÓN TOTAL		
PERFIL	PERFIL DE LÍNEA		PUEDE USAR UNA REFERENCIA A DATUM
	PERFIL DE SUPERFICIE		

Tabla 37. Símbolos, categorías y referencias o no a datum.

1.6.2.6. Características de tamaño (FOS)

En DTG una característica de tamaño, un FOS, en inglés de "*Feature Of Size*", es una superficie cilíndrica o esférica o un conjunto de elementos opuestos o superficies paralelas opuestas asociadas a una dimensión. Una de las claves de FOS es que las superficies o elementos deben ser opuestos, un eje, un plano medio o un punto central pueden establecerse también a partir de un FOS.

1.6.2.7. Modificadores

Los símbolos modificadores en DTG son condiciones adicionales que han de añadirse en determinados supuestos para garantizar el perfecto funcionamiento y acoplamiento de los elementos a ensamblar.

Tres de ellos están directamente relacionados con las tolerancias y son los siguientes: **condición de máximo material**, **condición de mínimo material** y **condición de indiferencia dimensional**. Los modificadores o condiciones se describen y se exponen, a continuación, en la Tabla 38 con sus correspondientes símbolos.

Símbolo	Modificador
$\overline{\text{F}}$	Estado libre
$\overline{\text{L}}$	Condición de mínimo material (LMC)
$\overline{\text{M}}$	Condición de máximo material (MMC)
$\overline{\text{P}}$	Zona de tolerancia proyectada
$\overline{\text{S}}$	Indiferencia dimensional (RFS)
$\overline{\text{T}}$	Plano tangente
$\overline{\text{U}}$	Unilateral

Tabla 38. Modificadores y sus símbolos.

1. Condición de estado libre.
2. Condición de mínimo material.
3. Condición de máximo material.
4. Zona de tolerancia proyectada.
5. Condición de indiferencia dimensional.
6. Plano tangente.
7. Unilateral.

1. Condición de estado libre: “free state” (F), encerrado en un círculo, salvo que esté especificado, todas las dimensiones y sus tolerancias se refieren a una condición de estado libre, en otras palabras, la restricción de estado libre se pone como condición en zonas que están consideradas como rígidas y no es aplicable a partes no rígidas.

2. Condición o principio de Mínimo Material: CmM en español (en inglés LMC: “Less Material Condition”). Es un modificador que indica que, en función del tamaño del elemento afectado por dicha condición, la cantidad de material sea la menor posible dentro de los límites establecidos de tamaño. La tolerancia con este modificador se expresaría para un eje/agujero: como el diámetro mínimo para el eje y el diámetro máximo para el agujero.

3. Condición o principio de Máximo Material: CMM en español (en inglés MMC: "*Maximum Material Condition*"). Es un modificador que se utiliza para limitar la tolerancia de una dimensión o dimensiones dadas. Puede definirse como la condición aplicable a la característica de una pieza que requiere la máxima cantidad de material y también se emplea para mantener la separación y el ajuste entre ejes y agujeros. La tolerancia con este modificador se expresaría para un eje/agujero, como el diámetro máximo del eje y el diámetro mínimo del agujero.

4. Zona de tolerancia Proyectada: En inglés "*Projected Tolerance Zone*", su símbolo es (P) encerrado en un círculo, este modificador sirve para especificar aún más la tolerancia establecida en el plano. La (P) se indica acompañando a la tolerancia de posición. Por ejemplo, las tolerancias proyectadas controlan la zona de tolerancia de la perpendicularidad de una pieza que ha de funcionar acoplada a otra. El símbolo (P) ha de ir precedido por el valor de la altura que establece la zona de tolerancia mínima proyectada, símbolo y altura van indicados dentro de un marco de referencia adicional al marco de referencia donde se indica la tolerancia especificada.

5. Condición de Indiferencia Dimensional: en inglés "*Regardless of Feature Size*", (RFS). Es un modificador predeterminado, por lo que si no existe (RFS) en el marco de referencia, significa que este modificador está predeterminado por defecto. Se emplea cuando la característica de tamaño no afecta a la tolerancia especificada.

6. Principio o condición de plano tangente: su símbolo es (T). Imaginemos que existe un control de paralelismo entre dos superficies en la que una de ellas está sometida a un cierto valor de tolerancia (t), ello implica que la superficie sometida a tolerancia debería tener un control de planitud, pues bien, al introducir el modificador plano tangente, indica que solo se debería garantizar que los puntos más altos de dicha superficie controlada estén en el límite máximo de la tolerancia especificada, sin tener que estar sometida la misma a ningún control de planitud.

7. Condición unilateral: su símbolo es (U) encerrado en un círculo, indica que un perfil o una superficie sometidos a tolerancia no son simétricas con respecto al perfil o superficie teórica. El valor que sigue al símbolo es el valor de la tolerancia que en esa dirección puede ser aceptado por encima del perfil teórico.

1.6.2.8. Relaciones entre tolerancias dimensionales y geométricas

Para establecer los criterios de relación entre tolerancias dimensionales (lineales y angulares) y las tolerancias geométricas, para evitar dificultades, en la norma UNE

1-149-90 se establecen las aclaraciones que se resumen en los siguientes principios:

1. Principio de Independencia.
2. Principio de Envoltente.
3. Principio de Máximo Material.

1. Principio de Independencia: Expresado por las Normas; ANSI Y 14.5 M, ISO 8015, UNE 1-149. Este principio enuncia que cada requisito, ya sea dimensional o geométrico, expresado en un plano, ha de ser cumplido por sí mismo y al margen de otros, salvo que se especifique una relación particular entre requisitos, pero si eso no se produce, entonces la tolerancia geométrica se aplica sin tener en cuenta la medida del elemento y ambos requisitos son independientes.

2. Principio o condición de Envoltente: su símbolo es (E) encerrado en un círculo, también denominado requisito de recubrimiento o Principio de Taylor. Esta condición implica y obliga a que no se sobrepase la envoltente de forma perfecta en condición de máximo material (CMM) del elemento que se controla. Este requisito es aplicable a elementos aislados ya sean cilíndricos o definidos por dos superficies planas y paralelas que puedan ser medibles o verificables. Se denomina también principio de Taylor, porque lo estableció en 1905 para el control de pernos y agujeros utilizando calibres de límites (pasa/no pasa) de tal forma que un agujero para ser conforme debía ensamblar completamente en un calibre en forma de perno «pasa», y adicionalmente el agujero debía ser inspeccionado comprobando mediante verificación que su diámetro máximo tampoco sobrepasase al del calibre en forma de perno «no pasa».

3. Condición de Máximo Material: su símbolo es (CMM). Este requisito establece que las peores condiciones de montaje se tienen para un eje sobre un agujero, cuando la dimensión del eje es máxima y el defecto geométrico también es máximo y el agujero se encuentra en su medida mínima con defecto geométrico máximo, pudiendo este último considerarse como caso límite la suma de la tolerancia geométrica especificada y la dimensional, cuando la medida dimensional es más favorable, es decir, mínima para ejes y máxima para agujeros.

4. Condición de Mínimo Material: su símbolo es (CmM) y está relacionado con el principio de máximo material, y resulta de gran utilidad en el control de espesor mínimo de paredes para prevenir roturas.

1.6.2.9. Ventajas

El sistema (*GD&T*) posee importantes ventajas:

- Reduce costes, al evitar errores.
- Mejora la comunicación evitando pérdidas de tiempo, malentendidos, correcciones, etc.
- Mejora el diseño.
- Incrementa las tolerancias de producción.
- Resulta imprescindible en un mundo globalizado.

