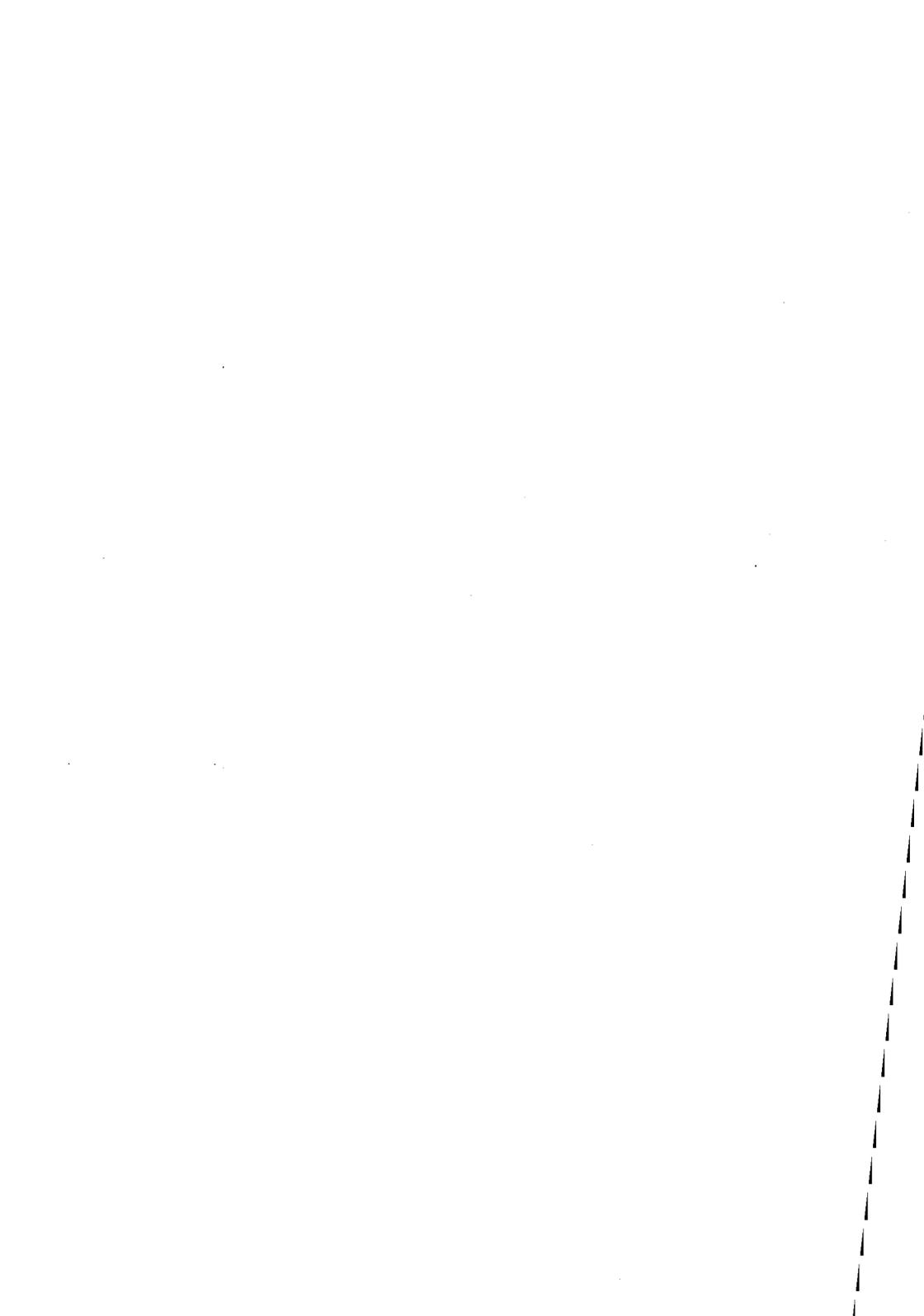


APLICACIONES DEL LÁSER EN METROLOGÍA Y CALIBRACIÓN INDUSTRIALES

Ángel María Sánchez Pérez
Catedrático de Ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid



I. INTRODUCCIÓN

Con objeto de que los asistentes dispongan de todos los elementos que suelen intervenir en los sistemas de calidad, en la primera parte de la ponencia se establecen los conceptos de corrección, incertidumbre y trazabilidad de las medidas, que se enlazan con las aplicaciones industriales a través de la tolerancia. Asimismo, se justifica como requisito indispensable para satisfacer las exigencias de trazabilidad.

Analizando la evolución de los patrones primarios de longitud, e introduce de forma natural el empleo del láser en la metrología dimensional cuyas aplicaciones constituyen el objeto del resto de la sesión. Se dedica una atención especial a los interferómetros láser heterodinos porque son los de utilización más frecuente en las aplicaciones industriales.

II. CONCEPTO DE INCERTIDUMBRE

Desde un punto de vista estricto, todo instrumento es defectuoso y cualquier método de medida resulta imperfecto. Por ello, cualquier medida debe ser corregida con mayor o menor minuciosidad según la calidad que se pretenda conferir a la misma y que dependerá del nivel de exigencia de la especificación que vaya a comprobarse con dicha medida.

La corrección que debería aplicarse a cualquier medida exige a su vez la realización de nuevas medidas, que se habrán obtenido en el entorno próximo del usuario de la medida o en otros lugares. Tal es el caso de la determinación de la longitud de una barra metálica que se mide a una temperatura diferente a 20°C.

El esquema apuntado conduce a un bucle sin salida: corrección corregida por una corrección... Para romperlo hay que producir un corte donde mejor convenga. De hecho, eso supone dejar sin considerar (sea calcular o medir) una corrección residual desconocida pero que hasta cierto punto es posible acotar.

Así surge, de forma natural, una primera definición de incertidumbre:

La incertidumbre de la medida es una cota superior del valor de la corrección residual.

Debe quedar claro que la corrección residual es un valor desconocido y para considerarlo acotado ha de admitirse la idea intuitiva de que al incorporar las sucesivas correcciones a la lectura inicial (o bruta) de un instrumento aplicado sobre determinado mensurando, el valor resultante converge hacia un valor ideal que suele denominarse valor verdadero de la magnitud medida.

Por la misma manera de introducirlo, este valor verdadero, si es que existe, es como si no existiera, pues no se podría identificar al no poseer la certeza de haber introducido todas las correcciones necesarias. Sin embargo, es muy importante contar con él como norte hacia el que dirigir los esfuerzos. Su entidad física es equivalente a la de un sistema de medida perfecto. En la práctica, es sufi-

ciente con acumular información que permita reconocer cuando se está bastante cerca del valor verdadero. El valor en el que se decide interrumpir la aplicación de sucesivas correcciones suele denominarse valor convencionalmente verdadero o valor resultante de la medida (x) lo que permite establecer la siguiente definición:

La incertidumbre de medida (U) es el valor de la semiamplitud de un intervalo alrededor del mejor valor disponible (el valor mejor corregido) para el resultado de la medida.

Dicho intervalo representa una estimación plausible (ni audaz ni exageradamente prudente) de una zona de valores entre los cuales es “casi seguro” que se encuentre el valor verdadero del mensurando.

Por consiguiente, el resultado de la medida se expresa mediante:

$$x \pm U$$

Este planteamiento es coincidente con la siguiente definición de incertidumbre que incorpora el Vocabulario Internacional de Metrología ¹ (VIM) tomándola de la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida ²:

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

Cuando se analizan en detalle las causas de error inherentes a cualquier medición, es decir las causas por las que resulta necesario introducir correcciones, suele ser habitual atribuir las a los siguientes elementos:

- a) instrumento o equipo de medida
- b) mensurando
- c) operador o sistema de adquisición de datos
- d) otras causas

En realidad, el último grupo es un cajón de sastre que incorpora todo lo que no se considera en los otros grupos. En particular, en él se recogen todas las *magnitudes de influencia*, que son aquellas magnitudes que no constituyen el objeto directo de la medida pero que inevitablemente están presentes durante la medición y la perturban. Las magnitudes y factores de influencia actúan, de hecho, a través de los grupos a), b) y c), pero suelen considerarse separadamente para poner de manifiesto que aunque se imagine idealmente una situación en la que los tres primeros grupos no sean influyentes, en sí mismos, la medición podría verse afectada por perturbaciones del tipo d) que afectasen a aquellas. Simétricamente, una situación en la que el grupo d) no resulte significativo no implica, necesariamente, que los otros tres grupos tampoco lo sean. Asimismo, en el grupo d) se incluyen las correcciones introducidas para mejorar el modelo correspondiente al método de medida adoptado.

Cuando se pretenden medidas de gran calidad es necesario controlar el campo de variabilidad de las magnitudes de influencia. Sin embargo, el control de las magnitudes de influencia no puede ser total, en el sentido de reducir a cero su variabilidad, y hay que aceptar un compromiso entre la calidad de las medidas y la implantación de aquel control.

La imposibilidad de conseguir un control total sobre todas las causas de error indicadas, determina que en la corrección residual esté presente un ruido de fondo, que se manifiesta cuando se trabaja con la resolución adecuada, y que determina que los resultados de las medidas adquieran naturaleza estadística. En efecto, al reiterar medidas sobre lo que, en principio, cabe considerar como un mismo mensurando, la inevitable variabilidad de las magnitudes y factores de influencia existentes es causa de que las indicaciones obtenidas presenten una cierta dispersión. Esta variabilidad contribuye a la imposibilidad de corregir totalmente las correcciones tomadas en consideración y, por ello, debe incluirse en la incertidumbre del resultado, junto con la incertidumbre que incorpora el valor medio de la corrección residual y las incertidumbres procedentes de la aplicación de las correcciones significativas calculadas sobre los valores medios de las magnitudes de influencia.

Existen procedimientos para apreciar y combinar las distintas componentes que intervienen en la evaluación de la incertidumbre de las medidas ^{[2] [3] [4]}.

III. INCERTIDUMBRE Y CALIDAD DE LAS MEDIDAS.

Se ha indicado que siempre es posible elegir el momento de detener el proceso de correcciones sucesivas y dejar que la corrección residual se convierta en incertidumbre, pero eso no es enteramente cierto.

En la práctica, es muy frecuente que el proceso se agote a causa de la imposibilidad de calcular nuevos valores para la corrección, por falta de datos suficientemente fiable.

La detención voluntaria se impone cuando proseguir deja de ser económico. En teoría, una medida es tanto mejor cuanto más se aproxime al valor verdadero, pero no se olvide que cada corrección

supone un coste adicional, al exigir más tiempo, trabajo e instrumentación, lo que no siempre está justificado.

En esta materia intervienen los grandes principios generales que rigen en una buena política de calidad donde hay que valorar no solamente el beneficio sino también el riesgo y equilibrarlos en lo posible.

Que hay un riesgo en toda incertidumbre es casi evidente pero, en el campo de la producción industrial dicho riesgo puede cuantificarse. Como paso previo, antes de entrar en ello se puede advertir que cuando se ha hablado de detener el proceso de corrección no se ha excluido la posibilidad de hacerlo en su primer paso, es decir, no corregir la lectura bruta. Este caso no es singular o, si lo parece, para llevarlo a la normalidad basta con aceptar la corrección nula como uno más de los valores normales. Lo importante es comprender que la corrección nula de ninguna manera implica incertidumbre nula, en todo caso sería al contrario. Y esta observación vale lo mismo para una corrección calculada que para una “impuesta” (o derivada de la falta de interés en refinar el resultado).

De todo lo cual se desprende lógicamente que se acepte la expresión del resultado sin que conste el valor de las correcciones aplicadas, pero en cambio no se puede admitir que se omita la incertidumbre.

Bien entendido que la expresión de la incertidumbre puede tomar diferentes formas y no necesariamente tiene que hacerse por medio del valor del semiintervalo mencionado en su definición o, por lo menos, la mención puede ser algo indirecta.

Se exprese como se exprese, no cabe duda de que cuanto menor sea la incertidumbre de la medida, mejor es ésta.

El valor de la incertidumbre es el primer índice de la calidad de una medida, que es tanto mayor cuanto menor es aquella.

Inmediatamente se plantea la cuestión de decidir cuál es la calidad necesaria para las medidas, lo que no tiene sentido dentro de la metrología como disciplina básica en la que un objetivo legítimo es perfeccionar los métodos de medida existentes y desarrollar nuevos métodos que permitan una disminución progresiva de las incertidumbres.

Sin embargo, es imprescindible disponer de un criterio al efecto cuando las medidas no constituyen la finalidad última sino un medio para conseguir otros fines. Tal es el caso de la metrología en la industria y de ello se ocupa el siguiente aparato.

IV. INTERVALO DE TOLERANCIA E INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

Las magnitudes significativas de los productos industriales se especifican habitualmente mediante tolerancias que son, como es bien conocido, los intervalos de valores admisibles que para la magnitud en cuestión se prescriben en cada caso. Las tolerancias surgen en el diseño de cualquier elemento de cierta responsabilidad y determinan el rechazo de los producidos con valores fuera del intervalo de tolerancia.

La especificación mediante tolerancias es compatible con el principio de intercambiabilidad que, desde la Revolución Industrial, constituye la base de la fabricación en serie ^[5]. El diseño se

efectúa de forma que las tolerancias especificadas aseguren la intercambiabilidad de elementos análogos en conjuntos más complejos sin alterar la funcionalidad de los mismos. Desde un planteamiento clásico, no es necesario que para ello se establezcan unos valores "exactos" para las magnitudes críticas (por ejemplo, diámetros de ejes y casquillos que deban acoplarse) sino que es suficiente que dichos valores vengan obligados a pertenecer a un intervalo de tolerancia, de mayor o menor valor según la aplicación y el grado de responsabilidad correspondientes.

Tolerancia de una magnitud es el intervalo de valores en el que debe encontrarse dicha magnitud para que se acepte como válida.

Sin embargo, un enfoque algo diferente ha ido extendiéndose durante la última década, como consecuencia de los espectaculares resultados conseguidos; se trata del *modelo japonés*, especialmente difundido por G. Taguchi, en el que se establece un valor objetivo dentro del intervalo de tolerancia, que minimiza la función de pérdidas elaborada con criterios de calidad total ^[6]. En ambos casos, y con más incidencia en el segundo, es imprescindible conocer la incertidumbre de los instrumentos o sistemas de medida.

Por otra parte, la especificación por tolerancia en los sectores industriales no es exclusiva de los propios productos que se fabrican. En muchos procesos de fabricación no es posible verificar continuamente si el producto ha alcanzado los valores prescritos para concluir su actuación sobre él; las comprobaciones se hacen al finalizar determinadas fases o etapas y, mientras tanto, sólo cabe actuar mediante el control de los medios de producción, lo que suele concretarse en la exigencia de que determinadas variables se

sitúen dentro de sus intervalos de tolerancia, o se separen lo menos posible de sus valores objetivo. La verificación de la bondad de la fabricación se efectúa de manera indirecta, a través de la observación y vigilancia de las variables de proceso (desplazamientos relativos de piezas y herramientas, valores de tiempo, presión, temperatura, concentración, etc.).

Una situación similar a la que acaba de describirse se presenta en relación con la seguridad de las personas y la preservación del medio ambiente en determinadas industrias: tal es el caso de las plantas químicas, centrales de producción de energía eléctrica mediante fisión nuclear, etc., donde una imprecisión excesiva en el conocimiento de las variables del proceso puede acarrear consecuencias desastrosas.

La recepción de materias primas y componentes con los que se inicia la actividad productiva en la industria, también debe someterse a prescripciones técnicas que suelen cuantificarse mediante las adecuadas tolerancias. El trabajo del control de recepción en muchas empresas se ha visto reducido en los últimos años como consecuencia de las certificaciones de organismos independientes en relación con los sistemas de calidad de los suministradores de componentes o productos semielaborados. Esta reducción es especialmente acusada para aquellos grandes compradores que han establecido sistemas de aprobación de suministradores, llegando a exigirles la implantación y utilización de sistemas de calidad que los grandes compradores comprueban mediante las correspondientes auditorías.

Asimismo, cierta gama de productos son objeto de verificación de características o de comprobación funcional, una vez acabados, para poner de manifiesto el nivel de prestaciones realmente conseguidas sobre los mismos. Estas operaciones constituyen lo que se conoce con el nombre de ensayo, especialmente cuando se realizan según métodos o procedimientos ampliamente aceptados.

Por consiguiente, las prescripciones técnicas sobre los productos industriales se establecen en todas las etapas del proceso productivo mediante intervalos de valores admisibles o tolerancias, para las diferentes magnitudes que influyen en su nivel de calidad. Pero cada vez que hay que decidir si el valor concreto de una magnitud está dentro de tolerancia, es preciso medir, y si la medida no se asegura con la calidad necesaria (incertidumbre) aquella decisión puede ser errónea. De aquí la necesidad de la metrología industrial y la imposibilidad de establecer planes de calidad en las industrias que no aseguren adecuadamente sus medidas.

De acuerdo con todo lo dicho, cuando el intervalo de incertidumbre está contenido en el intervalo de tolerancia, se está en condiciones de afirmar (casi con seguridad) que el valor verdadero del mensurando es admisible.

Análogamente, cuando los intervalos de incertidumbre y de tolerancia son disjuntos, hay seguridad total en rechazar el mensurando.

Finalmente, cuando los intervalos de incertidumbre y de tolerancia se solapan en parte (poseen una parte común y otra no común), la determinación de aceptación o rechazo es dudosa. Si bien es cierto que en este último caso podría hablarse en términos de probabilidad, ello exigiría la adopción de funciones de distribución concretas para los valores del mensurando dentro del intervalo de tolerancia y de las indicaciones del instrumento dentro del intervalo de incertidumbre. Como la metrología trata de establecer criterios generales, y siempre que sea posible independientes de la distribución real de las correspondientes variables aleatorias, no se continuará por aquél camino.

En la práctica, suele optarse por un criterio de seguridad que consiste en rechazar cualquier mensurando en situación dudosa, lo que resulta adecuado siempre que el intervalo de incertidumbre sea varias veces inferior al de tolerancia. Esto equivale a definir como

intervalo de decisión para los valores medidos el correspondiente a $T-2U$ (tolerancia efectiva), limitando el valor del cociente de ambos intervalos (tolerancia e incertidumbre). En medidas dimensionales, por ejemplo, suele ser frecuente considerar admisible:

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

pues valores mayores que diez exigirían medios de medida muy costosos, y la reducción del límite inferior por debajo de tres supondría un rechazo importante de elementos correctos y, también, costes adicionales apreciables. Es decir, la relación anterior suele proporcionar un equilibrio razonable entre el coste de la medida y la adecuación de la misma al valor de la tolerancia a verificar.

La práctica industrial habitual en la fabricación mecánica utiliza patrones que materializan el intervalo de tolerancia (calibres de límite *pasa / no pasa* y que permiten decidir, sin instrumentos, si el mensurando pertenece o no al intervalo de tolerancia. Esto no invalida los razonamientos anteriores pues, si se tiene en cuenta que los patrones también deben fabricarse con especificaciones más severas que las de las piezas a comprobar (tolerancias más estrechas) que, a su vez, han de ser verificados por calibres más precisos o mediante instrumentos de medida directa, siempre se acaba enfrentando una tolerancia a una incertidumbre.

V. TRAZABILIDAD DE LAS MEDIDAS: CALIBRACIÓN

El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) ^[1], establece la siguiente definición:

Trazabilidad es la propiedad del resultado de una medida o de un patrón que le permite relacionarlo con referencias determinadas, generalmente nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones todas ellas con incertidumbres determinadas.

que adolece de algunas imprecisiones, como la de no asegurar ninguna relación operante entre las medidas que resultan trazables según dicha definición.

Aún con la mejora que supone el haber incluido el conocimiento de la incertidumbre de cada comparación respecto de la definición de la primera edición del VIM, para que la definición actual resulte completa habría de aclararse lo que se entiende por “relacionar con referencias determinadas”, lo que podría denominarse referibilidad. Es posible establecer un criterio de equivalencia entre todas las medidas trazables a un mismo patrón ^[7] ^[8] mediante la siguiente definición:

El resultado de una medida es referible a un patrón determinado si el intervalo de incertidumbre expandida de aquélla incluye o recubre totalmente el intervalo de incertidumbre del valor de aquél patrón.

Cuando los intervalos de incertidumbre de una serie de medidas no recubren totalmente el intervalo de incertidumbre del patrón de referencia, los resultados de aquellas medidas no pueden considerarse equivalentes o compatibles.

Es evidente que todas las medidas pueden considerarse compatibles si se aumentan convenientemente sus intervalos de incertidumbre expandida, pero esto conlleva una disminución de la calidad de las medidas que puede hacerlas inservibles.

Lo ideal es conseguir medidas compatibles y con incertidumbres pequeñas, pero la decisión del valor aceptable de la incertidumbre depende de la utilización que vaya a hacerse del resultado de la medida.

Por consiguiente, en la industria deben emplearse resultados de medida que sean compatibles (equivalentes) y cuya incertidumbre no supere un cierto valor máximo que depende del uso previsto de las medidas.

Cuando se aplica el concepto de referibilidad indicado, todas las medidas trazables a un patrón resultan automáticamente trazables a otro patrón si el primer patrón es trazable (referible) al segundo, lo que permite ampliar las cadenas de trazabilidad de forma congruente.

En cualquier caso, los intervalos de incertidumbre indicados deben deducirse de valores de incertidumbre ampliada o extendida que confieran una seguridad similar a la caracterización de los correspondientes mensurandos.

En la práctica, y como ello no siempre puede conseguirse, se recurre a trabajar con la incertidumbre típica compuesta (incertidumbre resultante equivalente a una desviación típica) y a multiplicar por un mismo factor de recubrimiento o inclusión que WECC (actualmente EAL) ha propuesto con valor 2. Esto quiere decir que si la incertidumbre típica compuesta corresponde a una variable alea-

toria cuya función de densidad es “acampanada” y no se aleja mucho de una normal, el nivel de confianza no diferirá mucho del 95%.

Al precisar la definición de trazabilidad en la forma indicada, se hace posible trabajar localmente con un patrón de referencia admitido como tal para una serie de actividades, asegurando la equivalencia de las medidas trazables al mismo, lo cual es bastante en algunas aplicaciones en las que no es fácil disponer de patrones primarios universales.

La transitividad que se deduce con la definición indicada, permite ampliar las cadenas de trazabilidad hacia los patrones primarios de las unidades básicas del SI a medida que en dicho dominio metrológico se vayan perfeccionando los medios y métodos de medida.

En todo caso, la mejor forma de asegurar la trazabilidad de un sistema de medida es mediante la medición con el mismo de un patrón conocido (es decir, un patrón con trazabilidad). Esta operación, denominada calibración, permite determinar la corrección de calibración que debe aplicarse al equipo de medida cuando trabaja en condiciones similares a las de calibración.

No obstante, cuando se opera en condiciones que se alejan de las de calibración es preciso introducir correcciones adicionales y sus correspondientes incertidumbres que pueden llegar a ser importantes.

El Vocabulario Internacional de Medida (VIM) ^[1] incluye la siguiente definición:

Calibración es el conjunto de operaciones que establecen, en unas condiciones determinadas, la relación que existe entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento o sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los correspondientes valores de la magnitud realizados por patrones.

La finalidad de la calibración es poner de manifiesto las discrepancias existentes entre el instrumento o patrón que se calibra (calibrando) y un elemento de referencia con características metrológicas suficientemente estables y conocidas.

Para poder apreciar la incertidumbre de las medidas, es esencial que los instrumentos de medida y patrones se sometan, periódicamente, a la operación de *calibración*, enfrentándolos a otros de valor e incertidumbre conocidos (trazables) y que, normalmente, poseen mejores características metrológicas.

Es importante que el elemento a calibrar trabaje durante la calibración en la forma en que lo hace habitualmente, obteniéndose como resultado de la misma una primera corrección a aplicar a las indicaciones o valor del elemento calibrado, y la correspondiente componente de incertidumbre. Existen procedimientos para la asignación de incertidumbres a los elementos objeto de calibración, que se detallan en otras publicaciones ^{[9] [10]}, siempre de acuerdo con los principios básicos recomendados por el CIPM ^{[11] [12] [13]}.

La determinación de la incertidumbre de las medidas de un instrumento no puede hacerse con verdadero sentido metrológico si el instrumento no se calibra periódicamente. La idea fundamental que preside la correcta valoración metrológica de un instrumento de

medida es el reconocimiento de que sus indicaciones (*indicaciones brutas*) pueden no corresponder al valor verdadero de la magnitud medida (*mensurando*), por lo que es preciso introducir correcciones a las indicaciones brutas para obtener los valores corregidos, lo que determina siempre la aparición de las correspondientes incertidumbres puesto que no es posible asegurar exactamente los valores de las correcciones mencionadas. Es preciso insistir en el hecho de que cualquier corrección considerada, incluso si su valor resulta nulo, introduce una componente de incertidumbre ya que, en dicho caso, se trataría de un cero *inexacto*.

En cualquier caso, si el certificado de calibración no incluye todos los datos precisos para calcular la incertidumbre en algunas circunstancias, el usuario deberá apreciar, con su mejor criterio, la información adicional necesaria.

La calibración es una operación imprescindible para establecer la trazabilidad de los elementos de medida aunque, en general, la información de calibración debe ser complementada con otra relativa a las condiciones de utilización del instrumento o patrón para asignar la incertidumbre final de los resultados de medida.

Al avanzar por la cadena de trazabilidad hacia los patrones primarios no puede olvidarse que estos tampoco aseguran la correspondiente unidad con un valor exacto. Los patrones primarios que permiten realizar las unidades básicas del SI responden actualmente a fenómenos físicos, excepto en un caso, lo que determina que varios centros en el mundo puedan dotarse con las instalaciones necesarias y adquieran la experiencia precisa para establecer la correspondiente unidad. Cuando se cumplen estos requisitos, ninguna de aquellas realizaciones es preferida respecto de las restantes, y la incertidumbre de la unidad se determina a partir de los resultados de intercomparaciones entre dichos centros.

Lo dicho también es aplicable al caso del único patrón genuino que todavía subsiste en el SI: el kilogramo, pues numerosos facto-

res determinan una variabilidad del patrón y del equipo de transferencia que no debe ignorarse y que es la causa de la incertidumbre con la que se arranca en la cadena de trazabilidad de masa.

A medida que se descende por las cadenas de trazabilidad (alejándose del patrón primario) la incertidumbre de las correspondientes medidas va aumentando. Si se respeta la definición de trazabilidad ampliada con la de referibilidad, todas las medidas resultan equivalentes. Sin embargo, otra cuestión diferente es la idoneidad de dichas medidas respecto de la finalidad de las mismas.

Efectivamente, la equivalencia establecida debe entenderse como metrológicamente necesaria pero no operativamente suficiente, pues resultados compatibles con aquél criterio pueden ser inadmisibles desde un punto de vista práctico. Se vuelve de nuevo a la necesidad de acotar la incertidumbre expandida respecto de la tolerancia a verificar, única forma de asegurar que las medidas compatibles sean, además, adecuadas a la finalidad pretendida con la medición.

Por este motivo es importante limitar la longitud de las cadenas de trazabilidad y arrancar en su origen con la menor incertidumbre posible. Precisamente, ambos objetivos son los que estimulan continuamente la investigación básica en la metrología científica y provocan, con cierta frecuencia, la actualización de las definiciones de las unidades SI.

La asignación de incertidumbres no está exenta de un cierto grado de subjetividad, y dado que las calibraciones que materializan las cadenas de trazabilidad no permiten recoger la gran diversidad de situaciones de medida que después de su calibración se imponen a un instrumento o sistema de medida, y habida cuenta de que dichas cadenas se ramifican por los diferentes países y servicios de calibración a partir de los diversos patrones primarios, es conveniente comprobar que las medidas de determinados grupos de usuarios son realmente equivalentes y de la calidad pretendida. Para

ello, se realizan comparaciones que refuerzan “horizontalmente” la trazabilidad diseminada “verticalmente” mediante calibraciones. Estas comparaciones son obligatorias para los laboratorios de calibración acreditados y es cada vez más frecuente extender estas intercomparaciones a centros de medición y ensayo industriales.

El resultado de una calibración se recoge en un documento que suele denominarse certificado de calibración. En sentido estricto, la incertidumbre se predica del resultado de la medición por lo que resulta apropiado señalar en un certificado de calibración la corrección e incertidumbre resultantes de la calibración de un patrón, pues lo que realmente se está facilitando en este caso es el valor convencionalmente verdadero del patrón y la incertidumbre de dicho resultado. sin embargo, cuando se calibra un instrumento de medida también es frecuente indicar en el certificado de calibración la incertidumbre del instrumento; en este caso, debe entenderse que lo que se proporciona es la incertidumbre a asignar a las medidas que se realicen con el instrumento en unas condiciones determinadas. En este sentido, se emplea la expresión capacidad óptima de medida para referirse a las mejores condiciones de utilización de elemento calibrado.

No obstante, y dado que estas cuestiones suelen ser frecuentemente motivo de discusión o planteamientos alternativos, los certificados de calibración deberían ser extremadamente cuidadosos con la terminología e información facilitadas.

Cuando se calibran equipos de cierto nivel metrológico, el certificado de calibración debe recoger los parámetros significativos en cada uno de los puntos de calibración seleccionados. En todo caso, y con independencia de que el laboratorio de calibración asigne una incertidumbre global sobre todo el campo de medida de un instrumento, se deberá incluir en el certificado de calibración la información necesaria por si decide aplicar otros criterios distintos del indicado.

En algunos equipos puede ser conveniente la determinación de una línea o curva de calibración, por ejemplo en instrumentos con un gran campo de medida y, sobre todo, cuando el objetivo de la calibración es la determinación de la relación existente entre una magnitud de entrada y otra de salida. Este es el caso de gran número de sensores como, por ejemplo, las termorresistencias empleadas como medidores de temperatura de elevada precisión. En estas condiciones, el laboratorio de calibración podría facilitar, además de los parámetros en cada punto de calibración, la correspondiente curva de regresión pero, en este caso, también debería incluir una estimación de la incertidumbre asociada al empleo de dicha curva.

En todo caso, el usuario de un instrumento de medida ha de tener presente que para asegurar la trazabilidad de los resultados de medida es imprescindible utilizar instrumentos calibrados, pero la mera utilización de los mismos no garantiza que aquellos resultados sean trazables ^[14].

La calibración de los instrumentos es *condición necesaria* pero *no suficiente* para asegurar la trazabilidad de las medidas efectuadas con los mismos pues la incertidumbre de dichas medidas no depende sólo de la incertidumbre de calibración.

Además, las decisiones que se adoptan en la industria con las medidas de los instrumentos calibrados pueden ser incorrectas si no se establece un límite a la incertidumbre de aquellas (epígrafe 3).

Estos extremos se recogen en las normas básicas de los sistemas de calidad, como es el caso de la serie ISO 9000:

- “Para demostrar la conformidad de los productos con los requisitos especificados, el suministrador deberá controlar, calibrar y realizar el mantenimiento de los equipos de inspección, medición y ensayo, propios o facilitados por el comprador” (ISO 9001).

- “Debe conocerse la incertidumbre de medida de los aparatos y su utilización debe ser compatible con la precisión de las medidas requeridas” (ISO 9001).

Las normas ISO 9002 y 9003 recogen especificaciones similares.

La relación

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

indicada en el epígrafe 3 y empleada desde hace varios años en el área dimensional ^[15], ha sido recientemente incorporada en la norma ISO 10012-1 ^[16] sobre confirmación de equipos de medida cuando establece, refiriéndose a la calibración de los instrumentos, que:

- “El error atribuible a la calibración debería ser lo más pequeño posible. En la mayor parte de las áreas de medición, no debería ser mayor que un tercio, y preferiblemente un décimo, del error admisible del equipo confirmado cuando se utilice”.

VI. EVOLUCIÓN DE LOS PATRONES PRIMARIOS DE LONGITUD.

El actual Sistema Internacional de unidades (SI) tiene sus orígenes en el Sistema Métrico decimal que fue implantado en Francia entre el final del siglo XVIII y principios del XIX, por el esfuerzo de un competente grupo de ingenieros y científicos que desarrollaron el mandato de la Asamblea Constituyente acordado pocos meses después de la toma de la Bastilla en 1789.

Con objeto de impulsar la utilización internacional del Sistema Métrico, se constituyó en París, en 1870, una Comisión Internacio-

nal, cuyo Comité Permanente, presidido por el coronel español D. Carlos Ibáñez e Ibañez de Ibero, prosiguió los trabajos de unificación durante 1873 y 1874 y, finalmente, el Gobierno francés convocó la Conferencia Diplomática del Metro que se reunió en París en 1875 y aprobó la creación de Oficina o Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), órgano científico y permanente, con sede en París, supervisado por un Comité Internacional (CIPM), dependiente de una Conferencia General (CGPM).

La 1ª Conferencia General de Pesas y Medidas se celebró en 1889 para aprobar las nuevas definiciones de metro y del kilogramo y sancionar las ecuaciones de comportamiento de los treinta y un patrones a trazos del metro y de los cuarenta y tres kilogramos fabricados en platino iridiato.

Estableció que el prototipo del metro escogido por el CIPM (precisamente el número 6), a la temperatura del hielo fundente, representara en adelante la unidad métrica de longitud. Era el patrón de trazos diseñado por Tresca con sección en equis asimétrica que permaneció en vigor durante más de setenta años.

El Sistema Internacional de unidades fue establecido por acuerdo de la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas en 1960 y se estructura a partir de siete unidades básicas: metro (longitud), kilogramo (masa), segundo (tiempo), amperio (intensidad de corriente eléctrica), candela (intensidad luminosa) y mole (cantidad de materia o sustancia).

La definición actualmente en vigor para el metro es la siguiente:

METRO (m):

Longitud recorrida por la luz en el vacío durante $1/299792458$ s.

Esta definición fue adoptada por la 17ª CGPM (1983) y presupone la consideración de la velocidad de la luz en el vacío (c) co-

mo constante universal exacta, sin incertidumbre, con valor 299 792 458 m/s.

Las sucesivas definiciones del metro y la incertidumbre de su realización o primera diseminación han sido las siguientes:

Año	CGPM	Incertidumbre	Observaciones
1799	-	10 μm	Metro de los Archivos, de platino, prismático con sección rectangular.
1889	1 ^a	0,2 μm	Patrón único hasta 1960; de platino iridiado y sección en "X" asimétrica.
1960	11 ^a	4 nm	Lámpara de kriptón 86: 1650 763,73 longitudes de onda, en el vacío, de la transición $2p_{10}$ a $5d_5$.
1983	17 ^a	1nm 10^{-11} m	Definición actual. Según últimas recomendaciones de operación (CIPM, 1993).

En la actualidad El CIPM recomienda que el metro se realice por alguno de los siguientes procedimientos:

- a) Onda electromagnética plana en el vacío, midiendo

$$t \Rightarrow l = c \cdot t$$

- b) Onda electromagnética plana en el vacío, midiendo $f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f}$

- c) Utilización de radiaciones recomendadas para emplear con valores e incertidumbres especificados de λ ó f , si se realizan de acuerdo con las especificaciones. Estas radiaciones son:

- c.1) De láseres estabilizados con rayas de absorción saturada (uno de CH₄ y cuatro de I₂).
- c.2) De lámparas espectrales de Kr (primario en definición anterior) ó Kr, Hg, Cd (secundarios en definición anterior.)

El Laboratorio de Metrología y Metrotecnica (LMM) del Departamento de Física Aplicada de la E.T.S. de Ingenieros Industriales (UPM) dispone de tres láseres de uno de los cinco tipos c.1) con los que se han efectuado cuatro comparaciones internacionales entre 1991 y 1995 ^[17]. Concretamente se trata de láseres de ¹²⁷I₂, transición 11-5, R(127), componente ι , con:

$$f = 473612214,8 \text{ MHz}$$

$$\lambda = 632991398,1 \text{ fm}$$

Con estos láseres el LMM mantiene la trazabilidad necesaria para calibrar láseres comerciales de utilización industrial, siendo el único laboratorio acreditado por ENAC para este tipo de calibraciones.

La actualización de las definiciones de las unidades básicas del SI no es caprichosa. El deseo de profundizar en el conocimiento de las leyes físicas y la necesidad de fabricar con tolerancias cada vez más reducidas, obliga a mediciones con menores incertidumbres. Como la diseminación de las unidades desde los patrones fundamentales hasta los instrumentos de medida empleados en la investigación y en la metrología industrial siempre se concreta en una serie de sucesivas calibraciones o comparaciones que, inevitablemente, incrementan la incertidumbre, sólo hay dos formas de disponer de métodos de medida más ajustados y precisos: comenzar con menores incertidumbres o reducir el número de calibraciones necesarias en la cadena de trazabilidad desde el instrumento al patrón fundamental.

De hecho, las sucesivas definiciones de las unidades básicas del SI se introducen para conseguir ventajas de ambas situaciones, y porque su empleo permite métodos operativos de más fácil difusión. Así, por ejemplo, la incertidumbre con la que se podía transferir el metro de los Archivos era del orden de $10\mu\text{m}$, que se redujo con el metro de platino iridiado de 1889 a unos $0,2\mu\text{m}$ pero la diseminación a los patrones secundarios exigía la construcción de complejos comparadores de empleo bastante laborioso.

Durante el primer cuarto del presente siglo se perfeccionaron los comparadores y sistemas de división para la diseminación del metro, y se concibieron las primeras máquinas medidoras con escalas graduadas. Después de la 1ª Guerra Mundial, se podían realizar mediciones con estos instrumentos con incertidumbres del orden de $1\mu\text{m}$.

En 1937, el BIPM advirtió que con las escalas de trazos que fabricaba la Sociedad Ginebrina de Instrumentos de Física (GSIP) se derivaban mediciones más precisas que las deducidas del prototipo patrón y encargó a dicha compañía el rectificado y redivisión de patrones secundarios, con tan buen resultado que recomendó aplicar el procedimiento a los patrones nacionales depositados en los respectivos países.

En aquella época, ya se habían realizado numerosas medidas interferométricas con objeto de decidir si la longitud de onda de una radiación luminosa era susceptible de utilización como patrón primario de longitud. Las primeras experiencias se efectuaron en el BIPM, con la participación del propio Michelson que trasladó allí su interferómetro, y se centraron en la medida de la longitud de onda de la raya roja del cadmio. Aunque observaron que la radiación no era suficientemente monocromática para servir como patrón primario de longitud, sus trabajos permitieron establecer un patrón muy preciso que durante unos sesenta años fue la referencia de todos los trabajos espectroscópicos y de las dimensiones atómi-

cas. Posteriormente se comprobó que la definición del ångström (1907) a partir de la raya roja del cadmio le atribuía un valor ligeramente diferente a $0,000\ 000\ 0001\ \text{m}$, lo que no alteró los valores relativos de las diferentes rayas espectrales que se establecían mediante comparaciones.

Sin embargo, la situación empezó a ser preocupante después de la 2ª Guerra Mundial al perfeccionarse los métodos espectroscópicos y disponerse de fuentes espectrales cada vez más precisas, lo que llevaba de hecho a la existencia de dos patrones diferentes para la unidad de longitud. después de varios años de verificaciones sobre diferentes elementos, se decidió volver a un patrón directamente reproducible de la naturaleza que establecía el metro a partir del kriptón 86 (1960) en la forma antes indicada. Con ello se avanzó en precisión al alcanzarse mediante métodos interferométricos incertidumbres relativas de hasta 4 nanómetros ($0,004\ \mu\text{m}$) en la longitud de onda patrón. Al mismo tiempo, se impulsó la diseminación de las unidades pues prácticamente la totalidad de los países desarrollados utilizaron interferómetros para trasladar la unidad de longitud a los patrones materiales más precisos (bloques patrón longitudinales). En el máximo nivel de precisión interferométrica, las comparaciones internacionales proporcionaron, a partir de la reproducibilidad de sus resultados, una incertidumbre mucho más operativa y ajustada que con los anteriores métodos de comparación y división.

A pesar de las ventajas reseñadas, la nueva definición del metro nació con plomo en las alas. En los años sesenta comenzaron las aplicaciones de los láseres y al principio de la década siguiente la estabilización a largo plazo de láseres de helio-neón permitió disponer de longitudes de onda muy monocromáticas que pudieron medirse por interferometría con una resolución muy superior a la del patrón de kriptón y con incertidumbres relativas unas diez veces menores. Al mismo tiempo, fue posible determinar las frecuencias de algunos de estos láseres con incertidumbres relativas de algunas

partes en diez mil millones, por lo que la determinación del valor de la velocidad de la luz pudo realizarse multiplicando la frecuencia por la longitud de onda del láser. Aún admitiendo como incertidumbre de la longitud de onda la correspondiente a la definición en vigor, los valores de la velocidad de la luz resultaron con incertidumbres unas trescientas veces menores que las mejores determinaciones anteriores. Todo ello condujo a la adopción de un valor convencionalmente exacto para dicha velocidad, igual a 299 792 458 m/s, y la redefinición del metro en 1983.

Dado que el valor de la velocidad de la luz se establece por convenio, cabría pensar que una decisión más racional hubiese sido la de redondearlo a 300 000 000 m/s. Sin embargo, ello habría vulnerado el principio de continuidad que se aplica desde hace varios siglos para la actualización de los sucesivos patrones. El prototipo internacional de platino iridiado (1889) fue el metro nº 6 de los treinta y uno construidos porque resultó el más concordante con el metro de los Archivos (1799). El número de longitudes de onda de la radiación de kriptón (1960) se decidió para que el valor del nuevo metro se correspondiera con la longitud entre trazos del metro de platino iridiado, dentro del intervalo de incertidumbre de dicho prototipo. Finalmente, la adopción de 299 792 458 m/s para la velocidad de la luz asegura la continuidad, pues con ese valor las mejores determinaciones disponibles en 1983 para la longitud de onda o la frecuencia en el interior del mejor intervalo de incertidumbre conseguido con la lámpara de kriptón.

VII. EL LÁSER EN METROLOGÍA DIMENSIONAL¹

Un láser es una fuente de energía luminosa, tal y como se desprende del origen del acrónimo LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Las características que distinguen a los láseres de otras fuentes luminosas son su gran monocromaticidad (capacidad para emitir luz de un solo color) y su emisión enormemente direccional caracterizada por un haz muy poco divergente (el haz luminoso es prácticamente cilíndrico).

El interés de la metrología dimensional por el láser se debe fundamentalmente a su monocromaticidad pues la capacidad de emitir luz en un intervalo muy pequeño de longitudes de onda, $\Delta\lambda$, permite emplear el láser como referencia o patrón de longitud. El grado de monocromaticidad permite diferenciar dos clases de láseres: los de menor calidad (no estabilizados) y los de mayor calidad (estabilizados). La monocromaticidad puede cuantificarse mediante la variabilidad en la longitud de onda del láser ($\Delta\lambda$) respecto de su valor medio (λ): Así, el cociente $\Delta\lambda / \lambda$ puede variar desde 10^{-6} en un láser sin estabilizar hasta valores del orden de 10^{-12} , o incluso menores, en láseres estabilizados del tipo de los que se utilizan como patrones primarios de longitud.

Un valor reducido del ángulo de divergencia también es de interés en metrología dimensional porque permite que el haz láser recorra distancias apreciables sin pérdidas excesivas en la intensidad de la señal. Los valores de este ángulo son del orden de 0,1 mrad frente a valores cien veces mayores a la luz solar.

La medida de longitudes mediante láser puede realizarse por alguno de los tres procedimientos siguientes:

¹ Este epígrafe y los restantes se han preparado adoptando como referencia la tesis doctoral de D. Jesús de Vicente y Oliva^[18]

- Emitiendo un pulso o paquete de ondas que se refleje en el punto cuya distancia quiere conocerse y midiendo el tiempo que tarda en llegar el pulso reflejado. Este método sólo es aplicable a distancias grandes, de tipo astronómico, siendo el ejemplo clásico la medición de la distancia Tierra-Luna. Puede considerarse que el patrón empleado es la distancia recorrida por la luz en un segundo (*segundo-luz*).
- Para distancias entre varios metros y algunas decenas de kilómetros, se utiliza un tren de impulsos en forma de onda modulada en amplitud, midiéndose la variación de fase entre el tren emitido y el reflejado para dos o más frecuencias de modulación. Un método similar al de los excedentes fraccionarios de la interferometría estática permite obtener la distancia requerida. Los patrones utilizados en este caso son las longitudes de onda de la modulación (λ -modulante).
- Dentro de este método se incluye la denominada “telemetría láser” que está sustituyendo a los métodos clásicos de triangulación en aplicaciones cartográficas, geodésicas y militares.
- En distancias inferiores a unas decenas de metros, las técnicas interferométricas proporcionan las menores divisiones de escala, típicamente $\lambda/4$, siendo λ la longitud de onda de la radiación empleada. Para un láser He-Ne rojo, de $\lambda=633$ nm, la división de escala es $0,16 \mu\text{m}$, que puede reducirse algo más mediante métodos electrónicos. El patrón empleado es la longitud de onda de la radiación utilizada (λ -láser).

Este método es el que más ampliamente se emplea en las aplicaciones industriales de metrología dimensional.

También existen algunas aplicaciones basadas en patrones λ -láser que no son interferométricas.

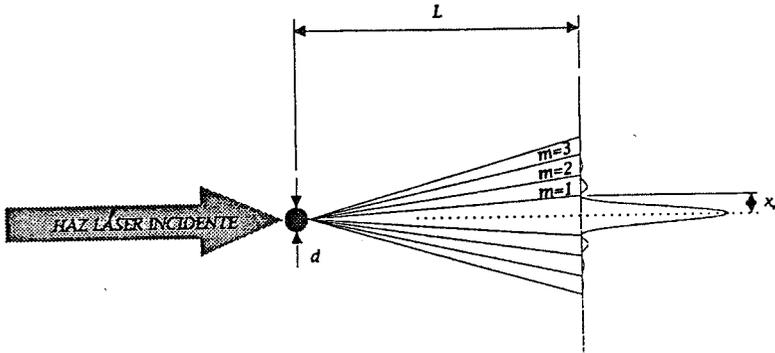


Figura 1: Difracción de Fraunhofer.

Por ejemplo, la medida de piezas o elementos de pequeño tamaño (inferior a una décima de milímetro) puede efectuarse mediante técnicas difractométricas. Por ejemplo, al incidir un haz láser sobre una varilla cilíndrica de diámetro muy reducido (un hilo o un cable) se produce un espectro de difracción (de Fraunhofer) que puede observarse sobre una pantalla normal al haz y analizarse digitalmente si se sustituye la pantalla por una cámara de video lineal (serie lineal de fotodiodos). El tamaño de la figura de difracción (figura 1) es directamente proporcional a la distancia de la varilla a la pantalla e inversamente proporcional al diámetro de la varilla, por lo que es posible determinar dicho diámetro.

También es posible comparar longitudes de onda mediante medidores de longitud de onda con dispositivos como un interferómetro de Twyman-Green doble, lo que podría permitir la calibración sencilla de longitudes de onda con incertidumbres relativas del orden de 10^{-8} , aplicación que podría ser de interés para calibrar diodos láser estabilizados cuyas incertidumbres están en uno o dos órdenes de magnitud superior (figura 2).

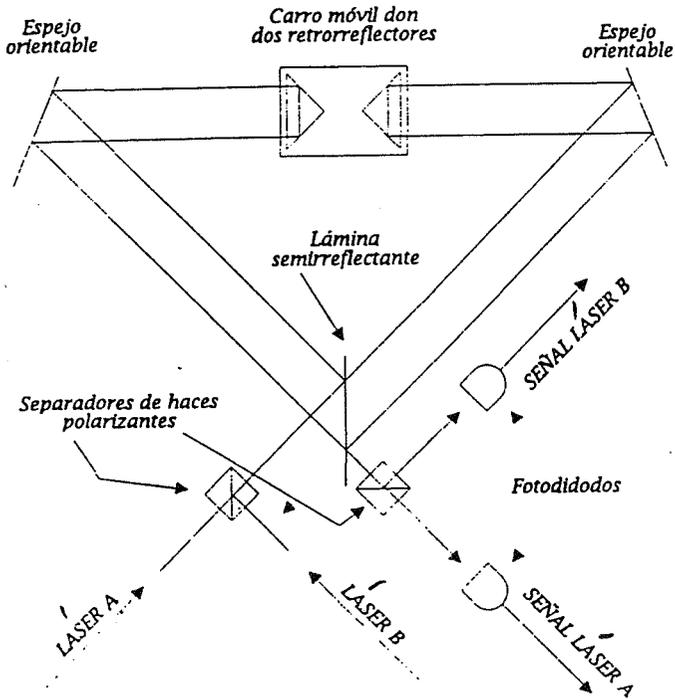


Figura 2: Comparador de longitudes de onda.

Asimismo, también existe una gama de instrumentos de metrología dimensional en los que el láser se utiliza como elemento auxiliar, pero no es la referencia de longitud. Un ejemplo típico es el denominado micrómetro láser en los que un haz láser, reflejado por un espejo giratorio crea una cortina láser en la que se coloca el objeto cuyo espesor se desea medir (figura 3). El fotodiodo que recoge la señal procedente de la cortina produce una señal en la que la relación entre los tiempos de sombra y la luz es proporcional al espesor del objeto. Por tanto, el grado de uniformidad en la fabricación del espejo y en su rotación condicionan de forma importante la incertidumbre del instrumento.

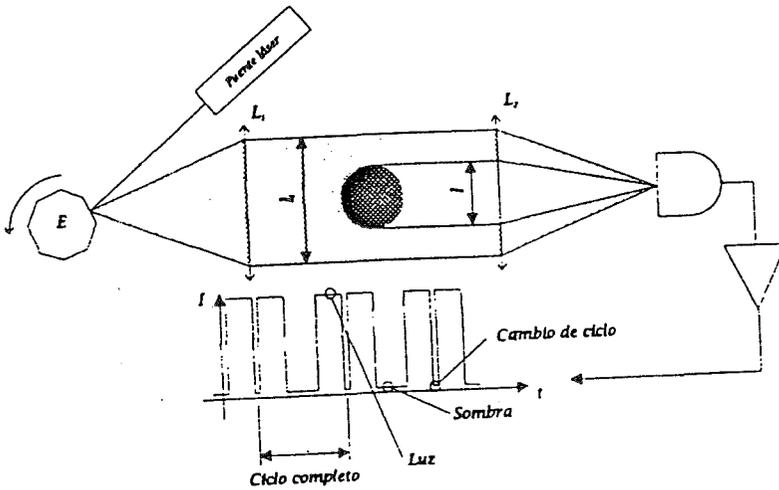


Figura 3: Micrómetro láser

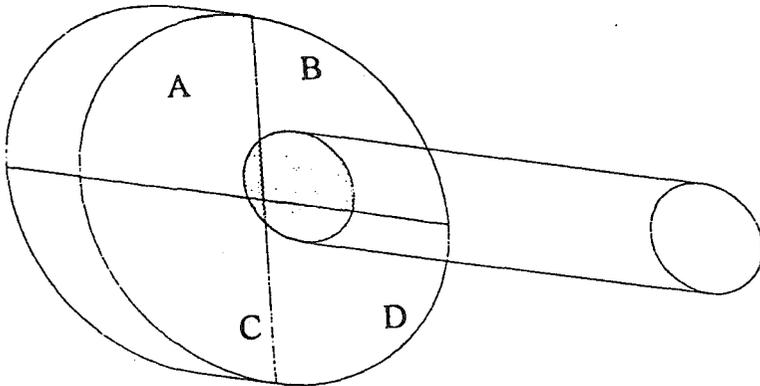


Figura 4: Fotodiodo cuádruple para control de alineamiento.

Otros instrumentos en los que el láser no interviene como patrón de longitud son los basados en fotodiodos múltiples para verificación de alineamientos o rectitudes. Las señales eléctricas que provienen de cada uno de los sectores de un fotodiodo cuádruple (figura 4) permiten conocer el desplazamiento del centro del haz respecto del centro del fotodiodo.

En todo caso, las aplicaciones mayoritarias del láser en metrología dimensional emplean variantes del interferómetro clásico de Michelson y utilizan el denominado batido de frecuencias, por lo que se resume lo esencial de ambas cuestiones en el apartado siguiente.

VIII. EL INTERFERÓMETRO DE MICHELSON Y EL BATIDO DE FRECUENCIAS

Se presenta un esquema del interferómetro de Michelson en la figura 5. En este sistema la fuente de luz monocromática es un láser (L) que dirige el haz sobre un separador (S), que puede ser un espejo semirreflectante, dos espejos planos (R, M) y un detector que, en este caso, no es una simple pantalla sino un fotodetector (F) conectado a un contador electrónico.

El separador de haz permite que parte del haz incidente lo atravesase (del orden del 50%) y el resto se refleje como en un espejo ordinario. Por consiguiente, la luz emitida por la fuente llega al detector por uno de los siguientes caminos:

- 1) Fuente-separador-espejo R-separador-fotodetector (longitud ℓ_R).
- 2) Fuente-separador-espejo M-separador-fotodetector (longitud ℓ_M).

Por consiguiente, los haces que recorren ambos caminos llegan al detector con una diferencia de fase que puede expresarse en función de la diferencia de caminos ópticos $\ell_R - \ell_M$ mediante la expresión:

$$I = K_1 \left[1 + K_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\ell_R - \ell_M) \right] (0 \leq K_2 \leq 1)$$

La señal de interferencia resultante alcanza un máximo cuando ambos haces están en fase, es decir, cuando $l_R - l_M = 2n\lambda/2$ (n entero). La señal presenta un mínimo cuando ambos haces están en oposición de fase, lo que ocurre cuando $l_R - l_M = (2n+1)\lambda/2$ (n entero).

Cuando el interferómetro se emplea para medir el desplazamiento de un elemento móvil, una de las aplicaciones industriales más frecuentes, el espejo M es móvil y R está fijo.

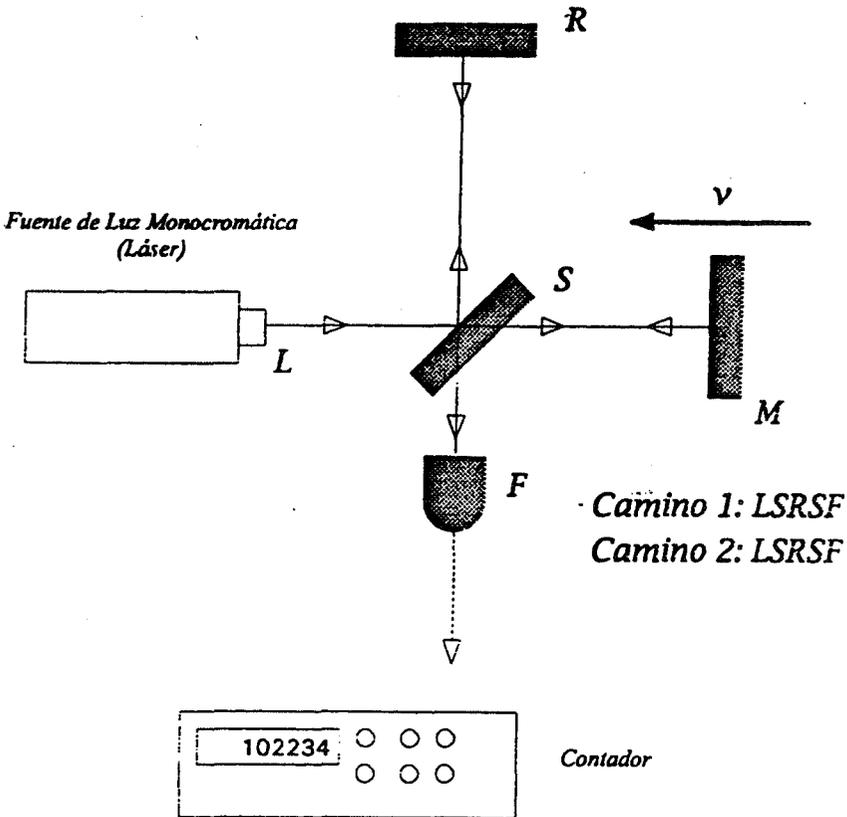


Figura 5: Interferómetro de Michelson

Si el espejo móvil se acerca al separador con velocidad uniforme v , se verifica

$$\ell_M = \ell_{MO} - 2vt; \ell_R = \ell_{RO} = cte.$$

$$I = K_1 \left[1 + K_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\ell_{RO} - \ell_{MO} + 2vt) \right] =$$

$$I = K_1 \left[1 + K_2 \cos \left(2\pi 2f \frac{v}{c} t - \varphi \right) \right]$$

por lo que la frecuencia de la señal que sale del detector tiene una frecuencia de $2fv/c$ que coincide con la diferencia de frecuencias Δf entre los dos haces, de frecuencias f y $f + \Delta f$, como consecuencia del efecto Doppler que introduce el movimiento del espejo M.

Para que los fotodetectores proporcionen una señal de frecuencia, ésta debe ser inferior a un valor límite (algunas decenas de GHz), pues si supera dicho valor los fotodetectores no podrían medirla. A este proceso se le denomina *batido de frecuencias*.

En resumen, un contador electrónico a la salida del fotodetector puede determinar el número de longitudes de onda en $\ell_R - \ell_M$ contando los máximos de intensidad de la señal que recibe. En el caso de los interferómetros comerciales para medida de desplazamientos la determinación de $\Delta f (\approx 2 \text{ MHz})$ permite obtener la velocidad del elemento móvil aunque no es posible la determinación directa del sentido de desplazamiento o signo de la velocidad.

IX. LOS INTERFERÓMETROS LÁSER COMERCIALES

Los interferómetros láser comerciales para medidas de desplazamiento suelen ser del tipo hererodino y utilizan un interferómetro de Michelson con algunas particularidades:

- La fuente luminosa es un emisor láser de dos frecuencias (o lo que es lo mismo, de dos longitudes de onda). La diferencia entre ambas (aproximadamente 2 MHz) es muy pequeña frente a la frecuencia media de las dos ($474 \text{ THz} = 474 \cdot 10^6 \text{ MHz}$) y menor que la incertidumbre de dicha frecuencia media ($\approx 20 \text{ MHz}$). Los haces correspondientes a estas dos frecuencias están polarizados linealmente y en direcciones perpendiculares.
- El separador de haz tiene un diseño especial que permite que una de las frecuencias lo atraviese totalmente sin reflejarse, mientras que la otra frecuencia se refleja totalmente. El separador discrimina las frecuencias en función de su diferente dirección de polarización.
- En muchos casos se sustituyen los espejos planos por reflectores en forma de “esquinas de cubo” (triedros trirrectángulos).

Un esquema de este tipo de interferómetros, con las modificaciones indicadas, se recoge en la figura 6.

El láser emite dos frecuencias próximas f_1 y f_2 polarizadas en direcciones perpendiculares. Un espejo semirreflectante convencional desvía una pequeña parte del haz hacia el fotodetector (F_R) de referencia que recibe dos señales superpuestas con ambas frecuencias. Por tanto, la señal de salida del fotodetector es proporcional a la diferencia $f_1 - f_2$.

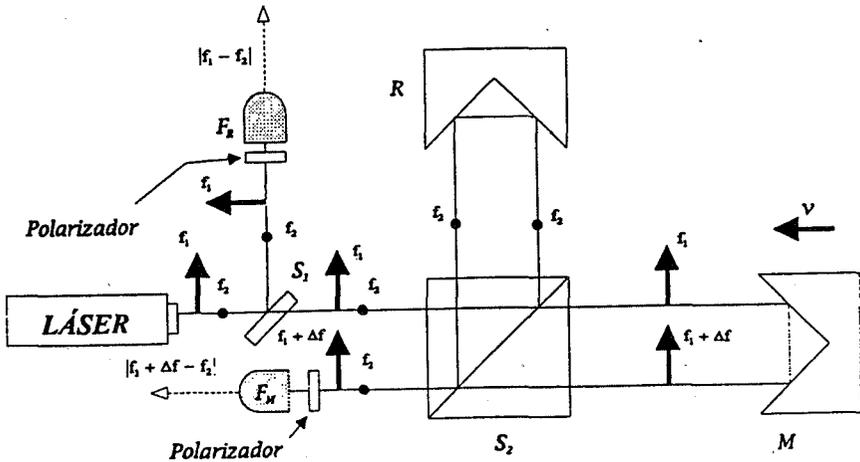


Figura 6: Interferómetro comercial heterodino.

La mayor parte del haz atraviesa el primer separador y se dirige al segundo (S_2) que separa las dos frecuencias: la radiación de una frecuencia (f_2) se dirige al reflector fijo o de referencia mientras que la otra radiación (f_1) incide sobre el reflector móvil (M) que se está acercando al separador (S_2) con velocidad v (figura 6).

Debido al movimiento del reflector móvil (M), la señal reflejada por éste llega al detector (F_M) con una frecuencia $f_1 + \Delta f$ después de mezclarse con la señal de frecuencia f_2 en el separador (S_2) (que ahora realiza la función inversa). Por consiguiente, en el fotodetector (F_M) se produce un batido de frecuencias que determina una salida de frecuencia $|f_1 + \Delta f - f_2|$ donde $\Delta f = 2f v/c$ como se vio en el epígrafe 8.

Con objeto de separar el término Δf se lleva a la entrada de un contador electrónico la diferencia de las señales de los fotodetectores F_M y F_R , con lo que los pulsos netos contabilizados son debidos exclusivamente a Δf . Es decir:

$$\Delta n = \int_{t_0}^{t'} \left(|f_1 + \Delta f - f_2| - |f_1 - f_2| \right) dt = \int_{t_0}^{t'} \Delta f dt = \int_{t_0}^{t'} 2f \frac{v(t)}{c} dt$$

$$\Delta n = \frac{2}{\lambda} \int_{t_0}^{t'} v(t) dt = \frac{2}{\lambda} (l - l_0) = \frac{2}{\lambda} \Delta l$$

$$\Delta l = \frac{\lambda}{2} \Delta n$$

por lo que la resolución natural del sistema es $\frac{\lambda}{2}$.

Normalmente la frecuencia de los detectores se multiplica electrónicamente por un factor Q que suele situarse entre 16 y 64. Los pulsos resultantes se corresponden con una frecuencia de Q veces mayor y la resolución se reduce en la misma proporción a un valor $\frac{\lambda}{(2Q)}$. Para un láser rojo con $\lambda = 633 \text{ nm}$, la resolución oscila entre $633 / (2.64) \approx 5 \text{ nm}$ y $633 / (2.16) \approx 20 \text{ nm}$.

El sentido del desplazamiento se obtiene de forma automática pues si el reflector móvil se acerca al separador, es $\Delta f > 0$ y $|f_1 + \Delta f - f_2| > |f_1 - f_2|$ y el contador incrementa su cuenta. Cuando el reflector se aleja del separador es $\Delta f < 0$ y $|f_1 + \Delta f - f_2| < |f_1 - f_2|$ y el contador incrementa su cuenta. Cuando el reflector se aleja del separador es $\Delta f < 0$ y $|f_1 + \Delta f - f_2| < |f_1 - f_2|$ y el contador decremента sus indicaciones (para ello es necesario que $|f_1 - f_2| > |\Delta f|$ lo que operativamente siempre se satisface).

X. LOS REFLECTORES DE LOS INTERFERÓMETROS.

Los reflectores son elementos esenciales para el buen funcionamiento del sistema. No se emplean espejos planos porque poseen gran dificultad de alineamiento y de mantenimiento del haz en la dirección correcta. En la mayor parte de las aplicaciones los fotodetectores se encuentran físicamente en las proximidades del emisor láser, integrados en la misma carcasa que protege el tubo láser. Es por ello que las direcciones de los haces emitido y reflejado son paralelas, debiendo regresar el haz reflejado a la cabeza emisora con un desplazamiento de unos pocos milímetros respecto del haz emitido para que incida sobre el fotodetector.

Para cumplir estos requerimientos suelen emplearse reflectores en forma de “esquinas de cubo” (triedros trirrectángulo) que poseen además otras propiedades geométricas de interés para el mantenimiento de la dirección del haz reflejado. A continuación se analizan estas propiedades para un reflector bidimensional (diédrico) en el que aquellas se comprueban con facilidad. Las propiedades que se presentan pueden generalizarse para reflectores tridimensionales.

1ª propiedad: El haz reflejado es paralelo al incidente.

En la figura 7 se recuerda la expresión del ángulo de dos rectas coplanarias en función de los formados al cortarse con una tercera $\gamma = \alpha + \beta - \pi$

Con ayuda de la figura 8 se aplica la relación anterior al reflector, resultando:

$$\alpha = \pi - 2\delta_i ; \beta = \pi - 2\delta_r$$

$$\gamma = (\pi - 2\delta_i) + (\pi - 2\delta_r) - \pi = 2\pi - 2\frac{\pi}{2} - \pi = 0$$

porque δ_i y δ_r son complementarios.

Por consiguiente, ambos haces son paralelos.

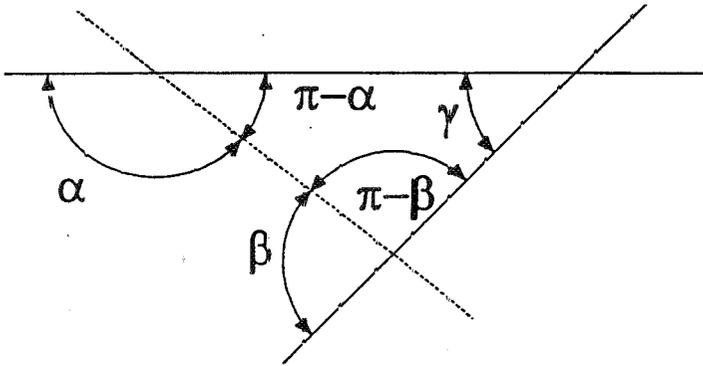


Figura 7: Ángulo entre dos rectas

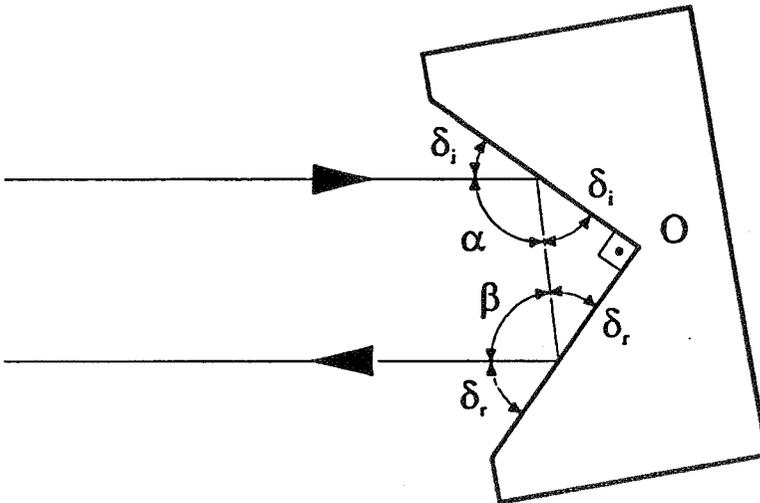


Figura 8: Primera propiedad

2ª propiedad: La línea contenida en el plano de los ejes de ambos haces y equidistante de aquellos pasa por la arista del diedro.

En la figura 9 la recta OM es paralela a los ejes de ambos haces y corta a la arista del diedro en O .

Por consiguiente los triángulos BMO y CMO son isósceles, verificándose $\overline{BM} = \overline{MO}$ y $\overline{CM} = \overline{MO}$. Por tanto $\overline{BM} = \overline{MC}$, y la línea OM resulta equidistante de los ejes de los haces.

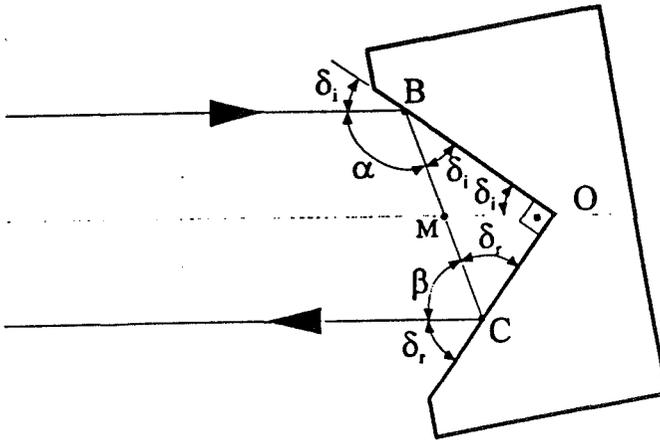


Figura9: Segunda propiedad.

3ª propiedad: Al girar el reflector sobre la arista del diedro, la distancia recorrida por el haz desde el emisor hasta el receptor permanece constante.

En la figura 10 el triángulo Bef es isósceles por ser iguales los ángulos adyacentes en O y, en consecuencia, $\overline{Be} = \overline{Bf}$. El triángulo eOf también es isósceles porque su altura es mediatriz, por lo que $\overline{fO} = \overline{eO}$. Pero, por la 2ª propiedad $\overline{gO} = \overline{fO}$. Por tanto, los triángulos COe y COg son iguales por poseer dos lados iguales ($\overline{gO} = \overline{eO}$ y \overline{CO} común) y un ángulo igual (δ_r), por lo que $\overline{eC} = \overline{Cg}$. En resumen:

$$\text{longitud } ABCD = \overline{AB} + \overline{Be} + \overline{eC} + \overline{CD} =$$

$$\overline{AB} + \overline{Bf} + \overline{gC} + \overline{CD} = \overline{2O'O} = \text{cte.}$$

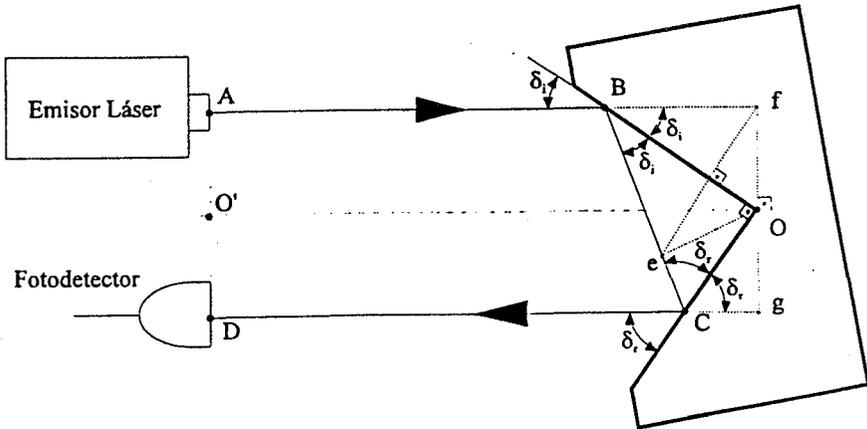


Figura 10: Tercera propiedad

4ª propiedad: Al desplazarse el reflector una longitud e perpendicularmente al haz incidente, el haz reflejado se desplaza $2e$.

En la figura 11 se aprecia el desplazamiento e , verificándose

$$d' + d' = d + d + f; f = 2(d' - d) = 2e$$

porque $d' - d = e$.

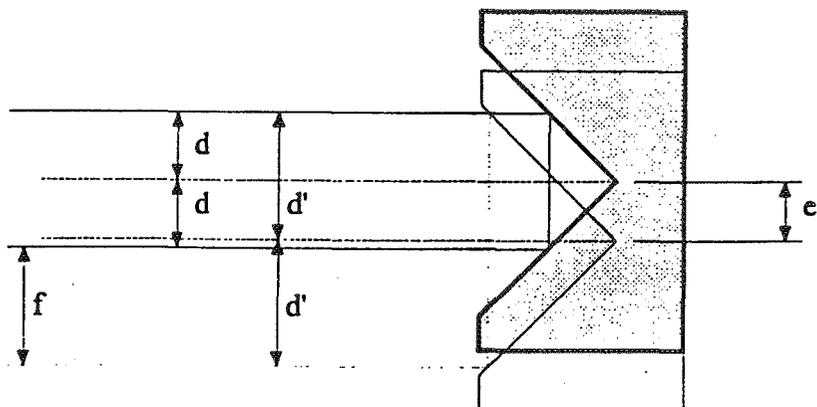


Figura 11: Cuarta propiedad.

XI. APLICACIONES TÍPICAS DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA LÁSER

Una de las aplicaciones más difundidas es la verificación en vacío de máquinas-herramienta, mesas móviles automatizadas y similares. Es muy común su empleo en la calibración de comparadores, proyectores de perfiles, máquinas de coordenadas y otros muchos instrumentos que suelen estar presentes en los laboratorios de metrología y salas de metrología industrial. Como ya se ha indicado, permiten medir con relativa facilidad desplazamientos y velocidades de elementos móviles y con montajes especiales pueden detectar variaciones angulares que les permiten detectar desviaciones de rectitud, paralelismo, perpendicularidad, etc.

De hecho, una de sus mayores limitaciones es la posibilidad de fijación adecuada de las ópticas (separador y reflectores) en el sistema de verificar. Asimismo, la disponibilidad de diferentes conjuntos ópticos permite ampliar sus posibilidades de trabajo. A continuación se comentan algunas ópticas especiales para aplicaciones de interés industrial.

1) Interferómetro angular

Se utiliza un bloque en el que se integran los dos reflectores, que ahora son móviles. El separador de haz lleva acoplado un prisma a 45° con lo que se consigue que los haces separados por su diferente frecuencia resultan paralelos y no perpendiculares como el separador visto con anterioridad.

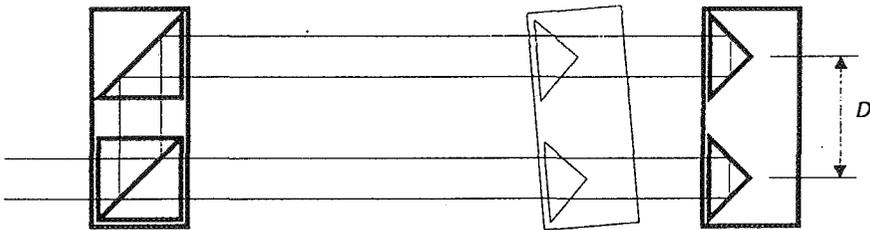


Figura 12: Ópticas para medida de ángulos

Un desplazamiento en la dirección del haz provoca un mismo incremento en los caminos ópticos de ambos brazos del interferómetro, pero una inclinación como la indicada en la figura 12 determina que el incremento del camino del brazo superior resulte mayor que el del inferior. Así, el instrumento detecta un desplazamiento relativo proporcional al ángulo girado (para los pequeños valores angulares con los que es operativo el sistema) y a la distancia que separa los vértices de los reflectores.

Con las ópticas de medidas de ángulos, los interferómetros láser sustituyen ventajosamente a los clásicos niveles de medida con burbuja en trabajos específicos como la calibración de grandes mesas de planitud. Para ello se fija el bloque reflector a una base de tres patas en las que dos patas, separadas una distancia L , son las patas de medida. En la mesa de planitud se establece una retícula cuadrangular en la que los cuadrados elementales tienen lados de longitud L . El bloque móvil se va desplazando a lo largo de las di-

ferentes líneas de retícula, de forma que sus patas de medida siempre se apoyan en los vértices de cuadrados elementales.

En esencia, se trata de medir la pendiente α_i de cada tramo, lo que permite obtener la variación de altura entre sus extremos $\Delta h_i = h_i - h_{i-1} = \alpha_i \cdot L$ (figura 13). La altura h_i respecto de un plano de referencia se obtiene sumando los incrementos de cada uno de los tramos anteriores del mismo perfil $h_i = \sum_{k=1}^i \Delta h_k = \sum_{k=1}^i \alpha_k \cdot L$.

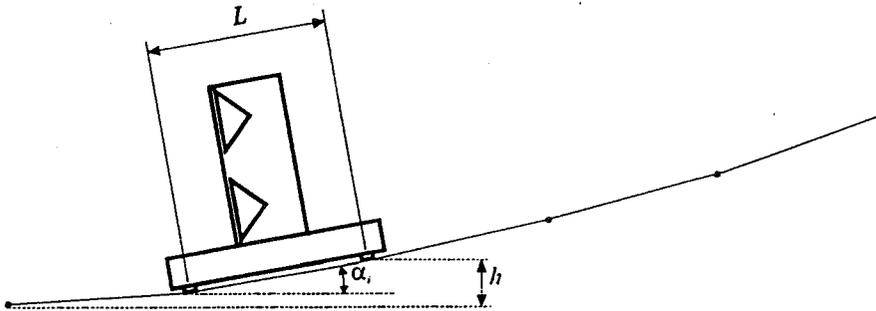


Figura 13: Esquema para la medición de planitudes

Después de obtener los perfiles de la retícula se precisa un ensamblado de todos ellos, lo que es ciertamente laborioso de forma manual, pero puede obtenerse automáticamente si los valores de cada tramo se capturan por un computador en el que se haya introducido el correspondiente programa de cálculo.

2) Interferómetro para medida de rectitudes.

Otra variante del interferómetro básico de Michelson permite medir desviaciones de rectitud. En la figura 14 se presenta el esquema del separador y reflectores.

El separador de haz (prisma de Wollaston) consigue que los haces emergentes formen un pequeño semiángulo θ con la dirección inicial y que se reflejen en la misma dirección por incidir nor-

malmente sobre los reflectores que son planos y forman entre sí un ángulo $\pi - 2\theta$ con bisectriz coincidente con el eje del haz inicial.

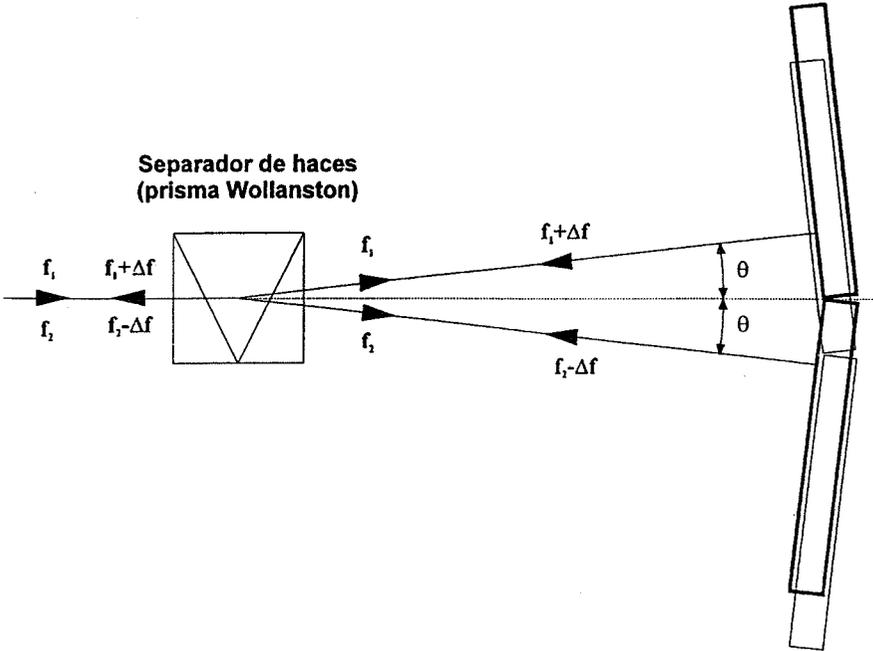


Figura 14: Ópticas para medida de rectitudes.

El interferómetro es insensible a desplazamientos del conjunto reflector en la dirección del haz inicial, pero un desplazamiento perpendicular provoca un acortamiento de un brazo del interferómetro y un alargamiento del otro con lo que puede cuantificarse la desviación de rectitud.

Con algunos elementos adicionales, este montaje permite analizar desviaciones de perpendicularidad.

XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP y OIML: “International vocabulary of basic and general terms in metrology”, ISO, 2ª edición, 1993, ISBN 92-67-01075-1, 59 págs.

Existe una traducción de este documento al español, realizada por el CEM, y publicada como “Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología”, 1ª edición, 1994, ISBN 84-606-2193-6, 57 págs.

- [2] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML: “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, ISO, First Edition, 1993, corrected and reprinted, 1995, ISBN 92-67-10188-9, 101 págs.

- [3] Seminario sobre “Metrología y Calibración”, MINER (SCI), Plan Nacional de Calidad, Laboratorio de Metrología y Metrotecnica, ETSII-UPM, Madrid, ocho ediciones, 1993 y 1994.

- [4] Seminario sobre la “Guía ISO para la expresión de incertidumbres de medida”, impartido por el Laboratorio de Metrología y Metrotecnica, ETSII-UPM, en el Laboratorio Oficial de Metrología, Parque Tecnológico de Galicia, Orense, 14-15 diciembre, 1995.

- [5] Sánchez Pérez, A.M.: “La metrología y el desarrollo científico y técnico”, Discurso en la entrega de diplomas de la promoción 133, ETSII-UPM, Madrid, junio, 1990, 40 págs.

- [6] Sánchez Pérez, A.M.: “La metrología como soporte básico de los sistemas de calidad industriales”, Conferencia plenaria como ponente invitado en el VI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Santiago, Chile, 7-10 nov., 1994. Actas del Congreso, págs. 3-14.

- [7] Granados, C.E. y Sánchez Pérez, A.M.: “Some metrological aspects of the industrial quality”, documento remitido al WECC/SC3 en mayo de 1992.
- [8] Sánchez Pérez, A.M. y Granados. C.E.: “On the traceability of measurements as an element of the quality”, XIII IMEKO World Congress, Torino (Italia), sept. 5-9, 1994, Actas del Congreso, págs. 2221-2225.
- [9] Sánchez Pérez, A.M. y Carro, J.: “La determinación de incertidumbres de medida, Novamáquina, nº 111, mayo, 1985, págs. 45-48.
- [10] Sánchez Pérez, A.M. y Carro, J.: “La incertidumbre de un instrumento de medida”, Anales de Ingeniería Mecánica, año 4, nº 1, diciembre, 1986, págs. 249-254.
- [11] Recommendation INC-1 (1980): Procès Verbaux des Séances, CIPM, tome 49, Session 70, 1981, págs. A11-A12.
- [12] Recommendation 1 (CI-1981): Procès Verbaux des Séances, CIPM, tome 49, Session 70, 1981, pág. 26.
- [13] Recommendation 1 y 2 (CI-1986): Procès Verbaux des Séances, CIPM, tome 54, Session 75, 1986, págs. 35-36.
- [14] Sánchez Pérez, A.M.: “Calibración: necesidad o exigencia”, VI congreso Nacional de la Calidad, Asociación Española para la Calidad (AECC), Madrid, 24-26 de mayo, 1995. Ponencia publicada en “Calidad por y para el Hombre”, Ed. Gestión 2000, S.A., Barcelona, 1995, ISBN 84-8088-082-1, págs. 539-543.
- [15] Carro de Vicente-Portela, J. y Sánchez Pérez, A.M.: Curso de actualización para Profesores de Enseñanzas Prácticas de Metal de Centros de Formación Profesional, sesión T1, ICE-UPM, Dpto. de Tecnología Mecánica, Madrid, mayo de 1982.

- [16] ISO 10012-1 Quality assurance requirements for measuring equipment – Part 1: Metrological confirmation system for measuring equipment (UNE-EN 30012-1).
- [17] De Vicente, J., Sánchez Pérez, A.M. y Bertinotto, F.: “Comparison of He-Ne lasers from the LMM and the IMG C stabilized on $^{127}\text{I}_2$ at 633 nm, *Metrologia*, vol. 30, 1993-94, págs. 503-506.
- [18] De Vicente y Oliva, J.: “La trazabilidad de los sistemas láser en metrología dimensional”, Tesis doctoral, Laboratorio de Metrología y Metrotecnica, E.T.S. Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 1994, 228 págs. más tres anexos.