

**Subdirección de Metrología Física**

**Guía: Calibración de Tacómetros Ópticos**

Elaboró: Nelson Bahamón Cortés<sup>1</sup> Liz Catherine Hernández Forero<sup>2</sup>

**1. Introducción.**

El tacómetro óptico es un instrumento de uso común en diferentes organizaciones. Se ilustra su calibración haciendo énfasis en el modelo matemático el cual involucra entre otras cosas un chequeo del tipo de distribución de probabilidad de salida. En términos generales el modelo matemático es muy transversal y aplicable en otros tipos de calibraciones.

Dada la sencillez de este dispositivo así como del sistema de calibración se dan unas explicaciones técnicas cortas y puntuales, pues se espera que el lector ya tenga los conocimientos básicos relacionados con el instrumento a calibrar (tacómetro) así como con el instrumento o sistema patrón o que en su defecto se pueda familiarizar fácilmente haciendo las respectivas consultas.

**2. Alcance.**

Esta guía explica el método de calibración de tacómetros ópticos.

**3. Terminología y símbolos.**

Tacómetro óptico: Dispositivo que mide velocidad de rotación. Su operación se basa en un sistema emisor-receptor de radiación, la cual es reflejada por el sistema en rotación y un sistema de conteo de los pulsos recibidos para computar la frecuencia de rotación.

Intervalo de cobertura: Intervalo que contiene el conjunto de valores verdaderos de un mensurando con una probabilidad determinada, basada en la información disponible.

Probabilidad de cobertura: Probabilidad de que el conjunto de los valores verdaderos de un mensurando esté contenido en un intervalo de cobertura especificado.

**4. Generalidades de la calibración.**

Las unidades habituales en que se utilizan los tacómetros son RPM (revoluciones por minuto). Pese a no ser parte de las unidades del sistema internacional (SI) son unidades muy aceptadas. Es recomendado utilizar en un certificado de calibración las unidades en que el instrumento se utiliza.

---

<sup>1</sup> Físico. Profesional Especializado Instituto Nacional de Metrología.

<sup>2</sup> Físico. Profesional Especializado Instituto Nacional de Metrología.

El modelo matemático que describe la calibración es el modelo del error. De esta manera el resultado final de la calibración será el error reportado con su respectiva incertidumbre. Este es un punto que no siempre se tiene muy presente; en un certificado de calibración la incertidumbre reportada corresponde a la incertidumbre del error.

Se sugiere prestar especial atención al tema de la dominancia en la sección 7; para el caso de tacómetros ópticos es frecuente que la componente de incertidumbre por resolución sea dominante.

## 5. Método de calibración.

El montaje para la calibración se ilustra en la siguiente figura:

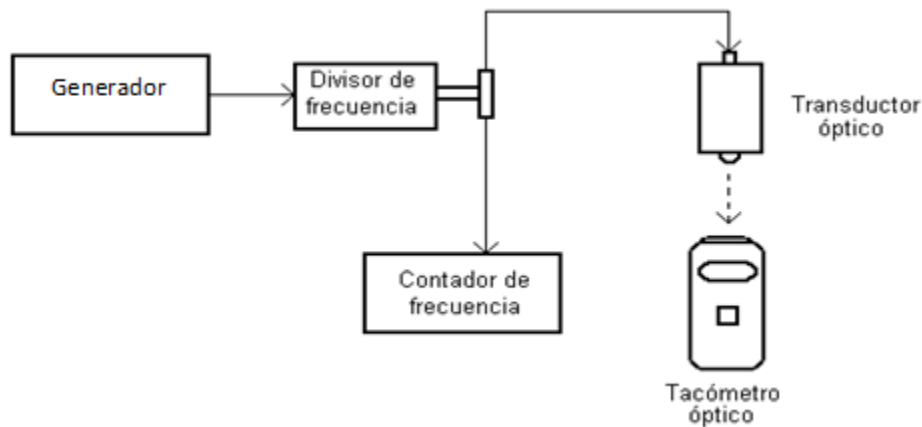


Figura 1. Montaje para la calibración de un tacómetro óptico

Se tiene un generador de frecuencia; este permitirá colocar los valores de los puntos de frecuencia que se desea calibrar. En caso de que el generador tenga un intervalo que no contenga valores pequeños de frecuencia que se desea calibrar se puede utilizar un divisor de frecuencia.

La salida del generador de frecuencia o del divisor se conecta a un transductor óptico que se encarga de convertir la señal eléctrica en pulsos de luz para que puedan ser medidos por el tacómetro. Este transductor es un bombillo que se puede incrustar en algún tipo de funda que permita colimar mejor la luz en la dirección del tacómetro.

Opcionalmente se puede conectar un contador de frecuencia que permita hacer un chequeo de los valores de frecuencia.

El instrumento patrón será el generador el cual debe tener un certificado de calibración. En caso de usar un divisor de frecuencia, este tendrá que caracterizarse para tener en cuenta su aporte a la incertidumbre; en tal caso el sistema patrón será el conjunto generador-divisor. Por otra parte también es válido utilizar el contador como patrón; en este caso el generador con o sin divisor

constituirían solamente un medio de transferencia y la incertidumbre del patrón será la del certificado del contador.

## 6. Resultados de la medición.

Teniendo en cuenta lo comentado en la sección 4. El resultado final de la calibración será el error. Se tiene:

$$E = f_I - f_P \quad (1)$$

Donde:  $f_I$  = Frecuencia medida por el instrumento bajo calibración.  
 $f_P$  = Frecuencia patrón.

La frecuencia medida por el instrumento será el promedio de las indicaciones obtenidas. Se tiene:

$$f_I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (2)$$

Donde:  $f_i$  = Indicación  $i$  tomada por el instrumento bajo calibración.  
 $n$  = Número de mediciones.

## 7. Estimación de la incertidumbre.

Teniendo en cuenta lo comentado en la sección 4, la incertidumbre que se debe obtener es la incertidumbre del error.

La expresión general para la incertidumbre combinada es la siguiente:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u_i^2} \quad (3)$$

Donde:  $u_i$  = Componente  $i$  de incertidumbre.  
 $c_i$  = Coeficiente de sensibilidad.

En este caso se tienen tres componentes de incertidumbre: componente por repetibilidad, componente por resolución del instrumento y componente debida al patrón. Cada una se obtiene de la siguiente manera:

Repetibilidad del instrumento:

$$u_{repeI} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Donde:  $S$  = Desviación estándar de las indicaciones del instrumento bajo calibración.

Resolución del instrumento:

$$u_{resol} = \frac{reso}{\sqrt{12}} \quad (5)$$

Donde:  $reso$  = Resolución del instrumento bajo calibración.

Incertidumbre patrón:

$$u_{patrón} = \frac{U_{expaP}}{k_p} \quad (6)$$

Donde:  $U_{expaP}$  = Incertidumbre expandida del instrumento o sistema patrón.  
 $k_p$  = Factor de cobertura del instrumento o sistema patrón.

Por otra parte y teniendo en cuenta la ecuación (1) los coeficientes de sensibilidad estarán dados por:

$$c_I = \frac{\partial E}{\partial f_I} = 1 \quad (7)$$

Donde:  $c_I$  = Coeficiente de sensibilidad con respecto a  $f_I$ .

$$c_P = \frac{\partial E}{\partial f_P} = -1 \quad (8)$$

Donde:  $c_P$  = Coeficiente de sensibilidad con respecto a  $f_P$ .

Las componentes de incertidumbre por repetibilidad y resolución del instrumento bajo calibración están asociadas a  $f_I$  mientras que la componente del patrón está asociada a  $f_P$ . Entonces la ecuación (3) queda escrita de la siguiente manera:

$$u_C = \sqrt{c_I^2 (u_{repeI}^2 + u_{resol}^2) + c_P^2 u_{Patrón}^2} \quad (9)$$

Nótese que la expresión se puede simplificar teniendo en cuenta los valores de los coeficientes de sensibilidad. Se sugiere sin embargo, en las plantillas de cálculo tenerlos en cuenta como una manera de tener presente el origen e importancia de estos coeficientes que en otros contextos podrán tomar otros valores.

Teniendo en cuenta el Teorema del Límite Central y el comportamiento de la distribución normal, se tiene que  $u_c$  tendrá una probabilidad de cobertura aproximada del 68%. Se busca entonces obtener una incertidumbre expandida con una probabilidad mayor. Se tiene:

$$U = ku_c \quad (10)$$

Donde:  $k$  = Factor de cobertura.

Nótese el uso de “u” mayúscula para la incertidumbre expandida.

Para la obtención de  $k$  es muy importante tener un criterio para evaluar como es el comportamiento de la distribución de salida, es decir la distribución de probabilidad asociada a  $u_c$ . En este sentido hay dos posibilidades que se explican a continuación:

- Distribución de salida aproximadamente normal: Se da cuando se satisfacen las condiciones del teorema del límite central. Es una posibilidad que frecuentemente se da por sentada sin hacer ningún chequeo.
- Distribución de salida aproximadamente rectangular: Se da cuando una de las distribuciones de entrada (de las componentes de incertidumbre) es rectangular y resulta dominante; es decir que no solamente es mayor que las demás sino que es tan mayor que impone su propia distribución. Realmente esto se puede dar con cualquier distribución diferente a la normal, pero lo habitual es que se trate de una distribución rectangular.

El siguiente esquema ilustra el proceso de estimación de incertidumbre:

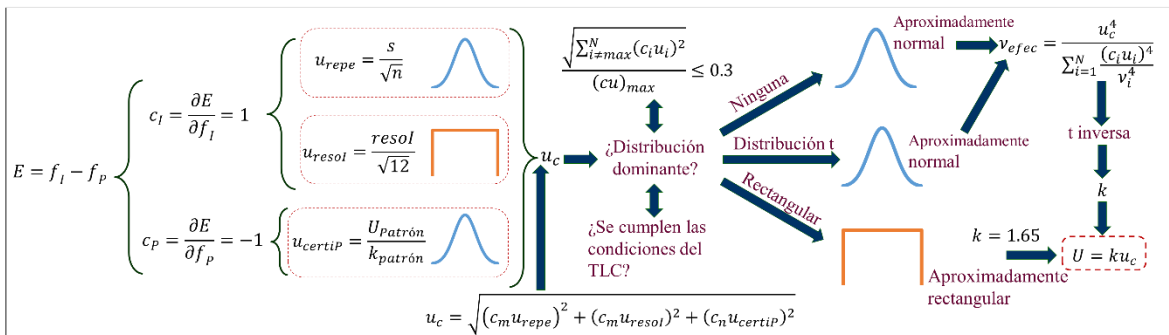


Figura 2. Proceso de estimación de incertidumbre

Si la distribución de salida es aproximadamente normal se aborda como una distribución  $t$ . Se calculan los grados efectivos de libertad y se obtiene la  $t$  inversa para tener el valor de  $k$ . Si la distribución de salida es rectangular se toma directamente el valor de  $k$  asociado a dicha distribución.

Nota 1: Puede suceder que la incertidumbre expandida sea menor que la resolución. Esto puede resultar extraño en una primera aproximación pero resulta perfectamente comprensible si la componente de incertidumbre por resolución se entiende como asociada a la resolución del

indicador. En sí, el menor valor que puede llegar a tomar la incertidumbre expandida es de media resolución; este caso se da justamente cuando la componente de incertidumbre por resolución es dominante. Dicha situación es más frecuente de lo que muchos experimentadores supondrían.

Nota 2: Como se mencionó en la sección 1 el modelo matemático utilizado en esta calibración es bastante general y transversal; considera las tres componentes de incertidumbre que como mínimo deben considerarse. En algunas calibraciones se incluye como componente adicional, la resolución del instrumento patrón; para los autores de este documento ese enfoque no es pertinente dado que la resolución del patrón es una componente que ya está incluida en la incertidumbre del certificado respectivo.

Nota 3: Es importante utilizar la información del certificado patrón para ver si el instrumento se encuentra dentro de sus especificaciones. Una vez se tiene esto, es una práctica válida utilizar como componente de incertidumbre el intervalo de cobertura dado por especificaciones en vez del valor dado por el certificado.

Explicar cómo es la componente  $u_p$  del patrón.

## 8. Presentación de los resultados.

La presentación de resultados debe hacerse teniendo en cuenta los lineamientos de [1].

Lo primero que se debe considerar es que en cálculos intermedios no debe hacerse ningún tipo de redondeo. El redondeo se hará solamente cuando se tenga el resultado definitivo, es decir el error con su respectiva incertidumbre siendo esta última la primera que debe ajustarse ya que de esta forma determinará con cuantos dígitos puede presentarse el error.

Teniendo en cuenta los lineamientos de [1] la incertidumbre debe expresarse con una o máximo dos cifras significativas. En general es de interés utilizar dos para tener mayor información. Sin embargo puede suceder que la incertidumbre expandida sea menor que la resolución del instrumento; en este caso se sugiere dejar una sola cifra significativa.

El valor del error debe ajustarse según la incertidumbre; es decir, el error no debe considerar dígitos de un orden de magnitud menor. Una posibilidad es dejarlo hasta el dígito cuyo orden de magnitud coincida con el dígito de menor orden de magnitud de la incertidumbre. Si bien esto es lo más natural, este enfoque podría significar que el error se exprese con dígitos más pequeños que la resolución del instrumento; en principio esto sería válido ya que la obtención del error implicó un promedio de indicaciones sin embargo en aras de no confundir al usuario puede ser más conveniente en estos casos redondear el error según la resolución y no la incertidumbre. En esta última situación la incertidumbre tendrá un orden de magnitud menor que el dígito menos significativo del error.

Posiblemente esta sección se haga más clara mediante el estudio de los ejemplos que se presentan en el anexo 1.

Junto con los datos de error e incertidumbre debe presentarse el valor medido por el instrumento ( $f_i$ ) también la probabilidad de cobertura y el valor del factor  $k$  de cobertura para cada punto. Si bien no existe un lineamiento general sobre este último, se sugiere presentarlo con dos cifras decimales en aras de no perder información.

En diversas calibraciones es común presentar en los resultados el valor del patrón ( $f_p$ ); en vez de esto, se sugiere en esta guía incluir la ecuación que describe la calibración, es decir la expresión (1).

## 9. Referencias.

- [1] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections). Disponible en: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>, recuperado: 7 de julio de 2016
- [2] International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition) JCGM 200:2012 (JCGM 200:2008 with minor corrections). Disponible en: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>, recuperado: 7 de julio de 2016
- [3] EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing. European co-operation for Accreditation. EA-4/16. Disponible en: <http://www.european-accreditation.org/publication/ea-4-16-g-rev00-december-2003-rev>, recuperado: 5 de diciembre de 2017.

**Anexo 1. Ejemplo**

Medida	f (rpm)
1	6.0
2	6.0
3	6.0
4	6.0
5	6.0
6	6.0
7	6.0
8	6.0
9	6.0
10	6.0
$f_I$	6.0

Siguiendo sistemáticamente los pasos de la sección 7 se tiene:

$$E = 6.0 \text{ RPM} - 6.0 \text{ RPM} = 0.0 \text{ RPM}$$

$$u_{repet} = \frac{0 \text{ RPM}}{\sqrt{9}} = 0 \text{ RPM}$$

$$u_{resol} = \frac{0.1 \text{ RPM}}{\sqrt{12}} = 0.0289 \text{ RPM}$$

$$u_{patrón} = \frac{\left(4.5 \times 10^{-8} \frac{\text{Hz}}{\text{Hz}}\right) (6 \text{ RPM})}{2} = 1.35 \times 10^{-6} \text{ RPM}$$

$$u_c = 0.00287 \text{ RPM}$$

Como la componente por resolución es dominante se debe tomar un  $k = 1.65$  que corresponde al factor de cobertura de una distribución rectangular al 95.45% de probabilidad de cobertura. Tomando este valor se tiene:

$$U = 0.00477 \text{ RPM}$$

Como resultados finales se tiene:

$E \text{ (RPM)}$	$U \text{ (RPM)}$
0.00	0.005