

Estimación de incertidumbre de medida bajo condiciones “*on shop floor*” en centro de mecanizado de 5 ejes

Guillermo González-Marín¹, Brayán Eduwars Medina-Guibovich¹, Naiara Ortega-Rodríguez², Soraya Plaza-Pascual², Gaizka Gómez-Escudero¹

¹Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA), Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España. Email:

guillermo.gonzalezm@ehu.eus, brayaneduwers.medina@ehu.eus, gaizka.gomez@ehu.eus

²Grupo de fabricación de alto rendimiento, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España.

Email: naiara.ortega@ehu.eus, soraya.plaza@ehu.eus

Resumen

En este trabajo se describe la metodología empleada para garantizar la trazabilidad de las mediciones bajo condiciones “*on shop floor*” en un centro de mecanizado de cinco ejes. Para ello, se presentan los resultados de la medición de varias características de una pieza prismática junto a su correspondiente balance de incertidumbres según la norma ISO 15530-3:2011. Asimismo, se presenta un desglose del peso de cada una de las componentes que afectan a la estimación de estas incertidumbres permitiendo conocer la influencia de las diferentes fuentes de error que pueden influir en los resultados.

Palabras clave: Medición en MH, trazabilidad, incertidumbre.

Abstract

This paper describes the methodology used to ensure the traceability of measurements under “*shop floor*” conditions in a five-axis machining center. For this purpose, several characteristics of a prismatic workpiece were measured. The results of this measuring process together with their respective uncertainty budget are provided, according to ISO 15530-3:2011 standard. A breakdown of the weight of each of the components that affect the estimation of these uncertainties is also reported, allowing to discretize the influence of the error sources that may influence the results.

Keywords: On MT measurement, traceability, uncertainty.

1. Introducción

A raíz de la “Industria 4.0” se ha impulsado la integración de las operaciones de medición a la línea de fabricación. Es común que las máquinas-herramienta (MH) cuenten con al menos una sonda de medición integrada que permita realizar controles de calidad empleando la propia cinemática del equipo como si de una máquina de medir por coordenadas (MMC) se tratase. La integración de los procesos de medición en MH permite realizar controles de calidad de las piezas en el mismo equipo en el que se han mecanizado, “*on machine surface metrology*”,

evitando operaciones logísticas que no aportan valor añadido al producto (Figura 1). Este mismo concepto, permite realizar mediciones entre etapas de mecanizado, pudiendo detectar defectos en fases tempranas de la fabricación. De esta manera, se pueden tomar acciones correctivas a tiempo con el fin de alcanzar el objetivo de los cero defectos, cero desperdicios y cero retrasos. Sectores como el aeronáutico o el eólico, donde se demandan componentes personalizados de gran precisión, encuentran en la medición en máquina una serie de ventajas realmente atractivas.

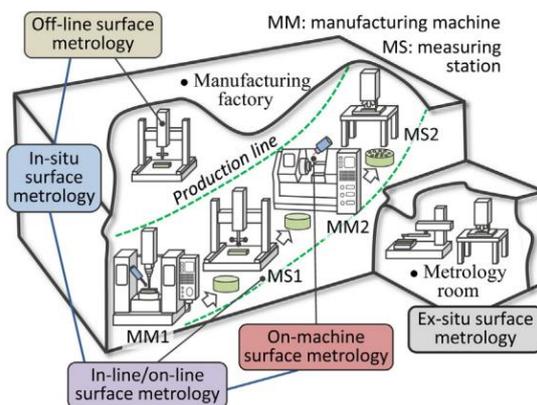


Figura 1. Terminología en función del lugar de medición. Fuente: [1]

A diferencia de la medición “*ex-situ*” que solo actúa en la fase final de la fabricación, la implementación de los sistemas de medición en máquina-herramienta permite monitorizar y controlar las distintas fases del proceso de fabricación (Figura 2) [2].

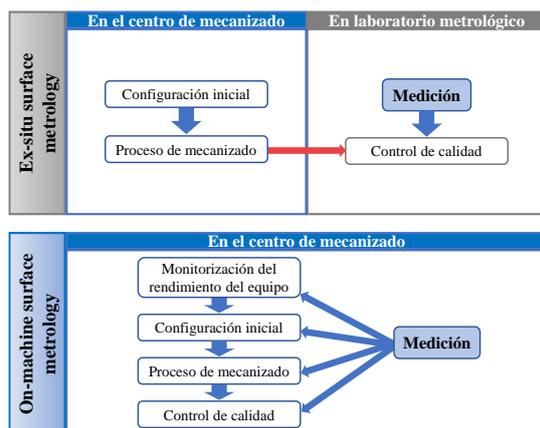


Figura 2. Comparativa entre la medición “*ex-situ*” y la medición “*on-machine*” en función de las fases de fabricación donde actúan.

El medir en la propia MH en la que se fabrica el componente en vez de emplear un equipo externo proporciona las siguientes ventajas [3]:

1. Monitorizar la geometría de la MH: La medición de un patrón dimensional con una sonda de medición implementada en la propia MH permite conocer y cuantificar los errores geométricos de la propia máquina a lo largo del tiempo. Esto permite realizar autocalibraciones periódicas del equipo [4].
2. Alineamiento de la pieza en MH: Alinear la pieza mediante un sistema de coordenadas preciso es de vital importancia para poder fabricar sin defectos. Los sistemas metroológicos integrados en MH facilitan la generación de los alineamientos definiendo la

localización y orientación de las piezas en el sistema de coordenadas máquina.

3. Proceso de mecanizado: La principal ventaja de la integración de los sistemas metroológicos en MH es la capacidad de medir entre procesos empleando la misma atada y alineamiento usado durante la fabricación. Gracias a la medición *on-shop floor* es posible detectar defectos de cotas críticas en fases tempranas y así tomar acciones correctivas a tiempo. Este procedimiento es más eficaz que realizar un único control de calidad una vez terminada la pieza, donde el margen de actuación es mucho más limitado.

4. Validación de la pieza en MH: Medir y validar las cotas críticas de la pieza una vez se ha finalizado la fabricación permite asegurar la bondad de la pieza y asegurarse de que no sea rechazada en el control de calidad posterior realizado fuera de la MH.

Sin embargo, no todo son ventajas. Al realizar tanto las operaciones de mecanizado como las de medición en la misma MH, ambos se ven afectados por los mismos errores geométricos originados en la propia MH, lo que complica su detección y posterior compensación [5]. Para evitar esta limitación Schmitt et al. [6] plantean dos alternativas: realizar una calibración volumétrica del equipo o la implementación de un sistema metroológico externo que controle la posición de la punta de herramienta de la MH en todo momento.

Además, a diferencia de las mediciones en laboratorio metroológico donde se controla el entorno, las mediciones en MH se ven afectadas por agentes externos como variaciones en la temperatura ambiente o la presencia de taladrinas que afectan negativamente a la repetitividad de las mediciones. Estas variaciones en la temperatura son la principal limitante de la precisión de las MH, sobre todo las de gran volumen de trabajo, donde garantizar una precisión inferior a 0,1mm en todo el volumen de trabajo a lo largo del tiempo resulta muy complicado. Se emplean modelos de principio [7] o empíricos [8] con el objetivo de predecir y minimizar la influencia de estos errores causados por las variaciones de temperatura., pero implementarlos correctamente es complicado.

Por todo ello la trazabilidad de la medición en MH sigue suponiendo un reto. Para poder garantizar dicha trazabilidad, en la actualidad se contemplan las mismas normas y recomendaciones que son aplicadas en MMC las cuales quedan recogidas en la Norma ISO Guide 98-3:2008 de la GUM. Basándose en esta norma, se valoran tres aproximaciones para la estimación de incertidumbre de medida:

- ISO 15530-3: Este procedimiento basado en el método de sustitución requiere de una pieza patrón

similar a la pieza objetivo. Las incertidumbres de medida se estiman comparando los resultados de la calibración de la pieza con los obtenidos mediante la medición en MH. Este procedimiento es adecuado para piezas pequeñas o de tamaño medio.

- ISO 15530-4: Este procedimiento iterativo se basa en la simulación para la estimación de incertidumbre. Aun así, es necesario identificar todas las fuentes de error que afecten a la medición y su peso para tener un buen punto de partida.
- Guía VDI 2617-11: Este método estudia la influencia de cada uno de las fuentes de error de manera independiente y estima como afectan a cada una de las mediciones. Esta aproximación resulta interesante para casos donde es imposible disponer de una pieza patrón.

En este trabajo se estima la incertidumbre de medida en MH bajo condiciones “on shop floor” siguiendo un procedimiento basado en la norma ISO 15530:3. Como pieza patrón se empleó la misma pieza que se midió en MH, realizando su calibración en una MMC [9].

2. Metodología

Este apartado describe el procedimiento llevado a cabo en este estudio. En primer lugar, se define la estrategia de medición, tanto del sistema de coordenadas empleado como de los mensurandos a evaluar. A continuación, se describe el procedimiento seguido para la estimación de incertidumbre, tanto para MH como para el equipo de “calibración” (MMC).

2.1. Estrategia de medición

Se empleó una pieza de Aluminio 7075 (aproximadamente 100mm x 100mm x 50mm) como objeto de medición. La pieza se alineó mediante los

siguientes elementos geométricos:

1. La línea intersección entre los planos A y B (eje X).
2. La línea intersección entre los planos B y C (eje Z).
3. El punto intersección entre los planos A, B y C (punto con coordenadas [-50mm, -50mm, 50mm]).

Tanto estos elementos geométricos como el resto de elementos medidos se muestran en la Figura 3.

Estos elementos geométricos se emplearon para definir los siguientes mensurandos: cinco tolerancias dimensionales (referencia 101-105), siete errores de forma (referencia 201-207), cinco tolerancias de orientación (referencia 301-305) y tres de posición (referencia 401-403). Estas tolerancias junto a sus valores nominales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los mensurandos estudiados.

Ref.	Descripción	Nom.
101	Ø C1	40mm
102	Distancia A-D	15mm
103	Distancia B-E	100mm
104	Distancia C-F	100mm
105	Ángulo A-B	75,000°
201	Planitud A	0mm
202	Planitud B	0mm
203	Planitud C	0mm
204	Planitud D	0mm
205	Planitud E	0mm
206	Planitud F	0mm
207	Cilindricidad C1	0mm
301	Paralelismo D (respecto A)	0mm
302	Paralelismo E (respecto B)	0mm
303	Paralelismo F (respecto C)	0mm
304	Perpendicularidad C1 (respecto A)	0mm
305	Perpendicularidad C (respecto B)	0mm
401	Posición Inter. A-C1 (X)	0mm
402	Posición Inter. A-C1 (Y)	0mm
403	Posición Inter. A-C1 (Z)	37mm

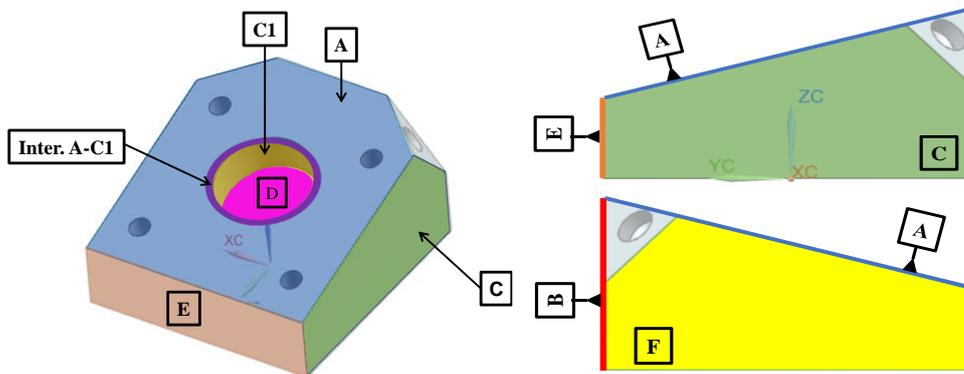


Figura 3. SC y elementos geométricos medidos.

2.2. Procedimiento de estimación de incertidumbre

La medición en MH se llevó a cabo en un centro de mecanizado de cinco ejes *Ibarmia THR16 Multiprocess* (Figura 4) empleando una sonda de contacto *Renishaw PMP-600R* (repetitividad $1\mu\text{m}$) y un conjunto vástago-bola de rubí *A5000-3709* (50mm de longitud y 6,048mm de diámetro). El proceso de medición se repitió en 10 ocasiones con el fin de estudiar su repetibilidad y minimizar la influencia de posibles valores atípicos (*outliers*).



Figura 4. Medición en MH con sonda de contacto *Renishaw PMP-600R*.

La incertidumbre expandida asociada al proceso de medición (U_{MP}) se estimó siguiendo el proceso descrito en la norma ISO 15530-3 (con un factor de cobertura de $k = 2$) (Ecuación 1):

$$U_{MP} = k \cdot \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2} \quad (1)$$

Donde u_{cal} es el componente de la incertidumbre del proceso de medición asociada a la calibración de los valores de referencia, u_p es el componente asociado a la repetibilidad del proceso y u_b es el componente asociado a la corrección de los errores sistemáticos.

Existen diferentes métodos para evaluar la contribución a la incertidumbre del *bias* (b). Si esta componente se repite a lo largo de las mediciones, puede considerarse un error sistemático y los resultados de la medición pueden ser corregidos directamente empleando la Ecuación 2.

$$b = \bar{y}_{cal} - \bar{y} ; Y_{MP} = y_{MP} - b \pm U_{MP} \quad (2)$$

Donde \bar{y}_{cal} es el valor promedio del mensurando medido en un equipo calibrado; \bar{y} es el valor promedio del mensurando medido en MH; y_{MP} es el valor medido en MH sin corregir y Y_{MP} el valor corregido. En caso contrario, debe estudiarse la influencia del *bias* como fuente de incertidumbre adicional. En este estudio se optó por la primera opción ya que esta componente presenta valores muy estables en todas las repeticiones de la misma característica. Por lo tanto, el componente asociado a la corrección de dicho error sistemático únicamente se ve afectado por la temperatura media de la pieza T , la incertidumbre del coeficiente de expansión térmica del material u_α , ($4,70225E-06$ para este caso) y la longitud de la medida L (Ecuación 3):

$$u_b = (T - 20^\circ\text{C}) \cdot u_\alpha \cdot L \quad (3)$$

La componente u_p , por otro lado, evalúa cuán repetitivo es el proceso de medición y se define como la desviación estándar de cada medición, siendo y_i el valor medido en la repetición i , \bar{y} el valor promedio del mensurando y n el número de repeticiones realizadas:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i ; u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

Por último, para estimar la componente u_{cal} asociada a la calibración de los mensurandos se midió la pieza en una MMC de 3 + 2 ejes *Mitutoyo CRYSTA Apex S9106* con las siguientes características:

$$MPE = A + B \cdot L \quad (5)$$

$$MPE_{pcorr} = MPE_p + \text{Max}(\sigma_i) \quad (6)$$

Siendo MPE el máximo error permitido, $A=1,7\mu\text{m}$, $B=0,003\mu\text{m/mm}$, L la longitud de la medición, MPE_p el máximo error de palpado con un valor de $1,7\mu\text{m}$ y σ_i la desviación estándar de calibración de la configuración de palpador empleado en cada elemento.

El árbol empleado se compone de un cabezal orientable *PH10MQ* (repetitividad de posición de $0,4\mu\text{m}$ a una distancia de 100mm), un módulo de exploración *SP25M*, un soporte del palpador *SM25-2* y un palpador *A-5000-7630* (bola de rubí de 5mm de diámetro), siendo todos ellos de la marca *Renishaw*. El valor de esta componente se estimó siguiendo un proceso derivado de la norma ISO 15530-2 [9]:

$$u_{cal} = \sqrt{u_E^2 + u_{geo}^2 + u_{rep}^2} \quad (7)$$

Donde u_E es la componente asociada a la calibración de la MMC, u_{geo} la componente asociada a la reproducibilidad del proceso de medida empleando

distintas configuraciones del cabezal y u_{rep} a la repetibilidad del proceso de medición.

El cálculo de la componente u_E depende del tipo de tolerancia que se evalúe. Teniendo en cuenta los mensurandos evaluados en este estudio (Tabla 1), se emplearon las siguientes expresiones [10]:

$$u_E = \frac{MPE}{\sqrt{3}} \text{ (Tol. dimensionales)} \quad (8)$$

$$u_E = 0 \text{ (Tol. de ángulo)} \quad (9)$$

$$u_E = \frac{MPE_{pcorr}}{\sqrt{3}} \text{ (Tol. de forma)} \quad (10)$$

$$u_E = \frac{2 * MPE}{\sqrt{6}} \text{ (Tol. de paralelismo)} \quad (11)$$

$$u_E = \frac{2 * A}{\sqrt{3}} \text{ (Tol. perpendicularidad)} \quad (12)$$

$$u_E = \frac{A}{\sqrt{3}} \text{ (Tol. de posición)} \quad (13)$$

La componente u_{geo} define la reproducibilidad de las mediciones y está relacionada con los errores geométricos de la MMC. Para evaluar dichos errores de forma independiente se midió la pieza en 4 configuraciones del cabezal diferentes (Figura 5) discretizando estos errores en función de cada eje. Esta componente u_{geo} se obtienen mediante la Ecuación 14, siendo n_2 el número de configuraciones del cabezal, $^j\bar{y}$ el promedio del valor medido en la orientación j e \bar{y} el promedio global de todas las mediciones:

$$u_{geo} = \sqrt{\frac{1}{n_2} \times \frac{1}{n_2 - 1} \times \sum_{j=1}^{n_2} ({}^j\bar{y} - \bar{y})^2} \quad (14)$$

Por último, la componte u_{rep} evalúa la repetitividad del proceso de calibración. Su valor se obtiene a partir

de la Ecuación 4, partiendo de los valores obtenidos en MMC en vez de los obtenidos en MH. En este caso el número de repeticiones fue de 20 (5 repeticiones por orientación).

3. Resultados

La incertidumbre de las mediciones se estimó mediante el método de sustitución. Para ello, se midió la pieza objeto en una MMC calibrada y los resultados de estas mediciones se emplearon como referencia en la medición posterior en MH. A continuación, se exponen los resultados de dichas mediciones en función del equipo en el que han sido realizadas.

3.1. Medición en MMC

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la medición en MMC junto a u_{cal} y los valores de las componentes empleadas para su estimación.

El peso de cada una de las componentes que contribuyen a la estimación de u_{cal} se presenta en la Figura 6. Se destaca un peso superior al 50% de la componente asociada a la calibración del equipo, a excepción de la tolerancia de ángulo ($u_E=0\mu\text{m}$ por definición) y las tolerancias de posición, donde la componente de la reproducibilidad de las mediciones cobra mayor peso.

Estas tolerancias de posición son a su vez las que mayores incertidumbres presentan, ($U_{cal}=6,1\mu\text{m}$ para la tolerancia de posición en Y) seguidas por las tolerancias de orientación. Los errores de forma estudiados presentan incertidumbres muy similares entre sí, siendo éstas cercanas a $2,7\mu\text{m}$ (Figura 7).

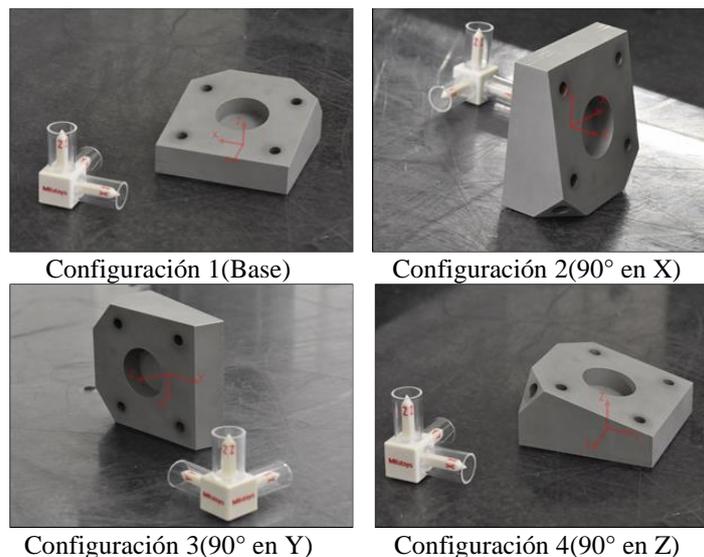


Figura 5. Medición en CMM en 4 orientaciones del cabezal diferentes.

Tabla 2. Resultados de la medición en CMM.

	Ref.	Nom.	\bar{y}_{cal}	u_E	u_{geo}	u_{rep}	u_{cal}
Dimensional	101	40mm	39,885mm	1,051 μ m	0,420 μ m	0,122 μ m	1,138 μ m
	102	15mm	15,104mm	1,007 μ m	0,742 μ m	0,200 μ m	1,267 μ m
	103	100mm	99,725mm	1,155 μ m	0,648 μ m	0,620 μ m	1,462 μ m
	104	100mm	99,330mm	1,155 μ m	0,804 μ m	0,806 μ m	1,622 μ m
	105	75,000°	75,912°	0,000''	1.7578''	0,875''	1,962''
Error de forma	201	0mm	0,013mm	1,241 μ m	0,299 μ m	0,374 μ m	1,330 μ m
	202	0mm	0,013mm	1,241 μ m	0,096 μ m	0,158 μ m	1,255 μ m
	203	0mm	0,011mm	1,409 μ m	0,171 μ m	0,187 μ m	1,431 μ m
	204	0mm	0,005mm	1,149 μ m	0,100 μ m	0,212 μ m	1,173 μ m
	205	0mm	0,004mm	1,149 μ m	0,115 μ m	0,173 μ m	1,168 μ m
	206	0mm	0,008mm	1,276 μ m	0,311 μ m	0,173 μ m	1,325 μ m
	207	0mm	0,009mm	1,149 μ m	0,245 μ m	0,173 μ m	1,187 μ m
Error de orientación	301	0mm	0,012mm	1,425 μ m	0,222 μ m	0,158 μ m	1,451 μ m
	302	0mm	0,016mm	1,633 μ m	0,212 μ m	0,538 μ m	1,732 μ m
	303	0mm	0,009mm	1,633 μ m	0,263 μ m	0,187 μ m	1,665 μ m
	304	0mm	0,003mm	1,963 μ m	0,404 μ m	0,447 μ m	2,053 μ m
	305	0mm	0,011mm	1,963 μ m	0,685 μ m	0,100 μ m	2,081 μ m
Error de posición	401	0mm	-0,563mm	0,981 μ m	1,103 μ m	1,310 μ m	1,974 μ m
	402	0mm	0,297mm	0,981 μ m	2,804 μ m	0,825 μ m	3,083 μ m
	403	37mm	37,350mm	0,981 μ m	2,484 μ m	0,949 μ m	2,834 μ m

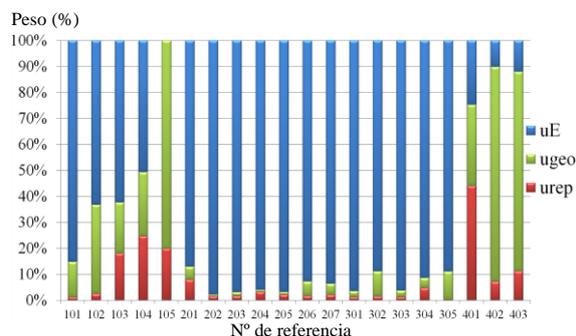


Figura 6. Distribución porcentual de las componentes de la incertidumbre (CMM).

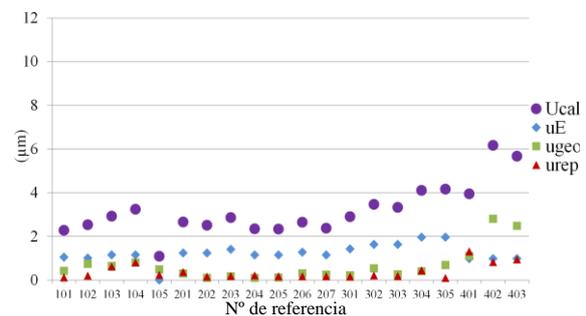


Figura 7. Componentes de la incertidumbre de calibración de la pieza.

3.2. Medición en MH

En este apartado se desarrollan los resultados de la medición en MH mostrados en la Tabla 3. La Figura 8 y la Figura 9 muestran la distribución porcentual de las componentes de la incertidumbre (MH). Se puede comprobar que el peso de la componente asociada a la repetibilidad del proceso de medición tiene mayor peso que en los resultados de MMC (Figura 6 y Figura 7), en algunos casos hasta del 90%. Esto se debe principalmente a las condiciones de medida en MH, como las perturbaciones en el ambiente (temperatura, taladrina, suciedad, etc.), cinemática del equipo, entre otras.

Por otro lado, la Figura 9 muestra un resumen de la estimación de incertidumbre del proceso de medición U_{MP} y sus contribuyentes. Al igual que en los resultados de MMC, la tolerancia 402 es la que mayor U_{MP} presenta (11,605 μ m). Las tolerancias dimensionales 103 y 104 también presentan valores cercanos a las 10 μ m. Estas tres tolerancias son las que han demostrado ser las menos repetitivas ($u_p=5,2\mu$ m para la 103). Las tolerancias 202, 203 y 206, sin embargo, presentan menor repetitividad que el resto de sus semejantes. En la Figura 10 se aprecia cómo en estas características una de las 10 repeticiones presenta una dispersión mayor al resto, aumentando así la componente u_p asociada a la repetitividad.

Tabla 3. Resultados de la medición en MH.

	Ref.	Nom.	\bar{y}	b	u_{cal}	u_p	u_b	U_{MP}
Dimensional	101	40mm	39,884 mm	-0,520 μ m	1,138 μ m	1,629 μ m	0,375 μ m	4,045 μ m
	102	15mm	15,092 mm	-11,720 μ m	1,267 μ m	1,560 μ m	0,912 μ m	4,414 μ m
	103	100mm	99,736 mm	11,350 μ m	1,462 μ m	5,225 μ m	0,912 μ m	11,004 μ m
	104	100mm	99,367 mm	37,760 μ m	1,622 μ m	4,136 μ m	0,884 μ m	9,059 μ m
	105	75,000°	75,920 mm	26,622''	1,962''	5,450''	0,497''	11,628''
Error de forma	201	0mm	0,010mm	-2,190 μ m	1,330 μ m	0,389 μ m	0,000 μ m	2,772 μ m
	202	0mm	0,012mm	-0,710 μ m	1,255 μ m	3,568 μ m	0,000 μ m	7,565 μ m
	203	0mm	0,012mm	1,090 μ m	1,431 μ m	3,208 μ m	0,000 μ m	7,026 μ m
	204	0mm	0,005mm	-0,290 μ m	1,173 μ m	0,129 μ m	0,000 μ m	2,359 μ m
	205	0mm	0,004mm	-0,340 μ m	1,168 μ m	0,201 μ m	0,000 μ m	2,370 μ m
	206	0mm	0,012mm	4,520 μ m	1,325 μ m	3,294 μ m	0,000 μ m	7,101 μ m
	207	0mm	0,011mm	2,130 μ m	1,187 μ m	1,444 μ m	0,000 μ m	3,739 μ m
Error de orientación	301	0mm	0,009mm	-2,770 μ m	1,451 μ m	0,494 μ m	0,000 μ m	3,065 μ m
	302	0mm	0,011mm	-4,790 μ m	0,866 μ m	0,178 μ m	0,000 μ m	1,768 μ m
	303	0mm	0,015mm	5,660 μ m	1,665 μ m	2,338 μ m	0,000 μ m	5,741 μ m
	304	0mm	0,005mm	2,480 μ m	2,053 μ m	0,397 μ m	0,000 μ m	4,176 μ m
	305	0mm	0,010mm	-0,590 μ m	2,081 μ m	2,557 μ m	0,000 μ m	6,593 μ m
Error de posición	401	0mm	-0,517mm	45,980 μ m	1,974 μ m	2,615 μ m	0,468 μ m	6,619 μ m
	402	0mm	0,344mm	47,270 μ m	3,083 μ m	4,893 μ m	0,468 μ m	11,605 μ m
	403	37mm	37,343mm	-7,090 μ m	2,834 μ m	2,090 μ m	0,343 μ m	7,076 μ m

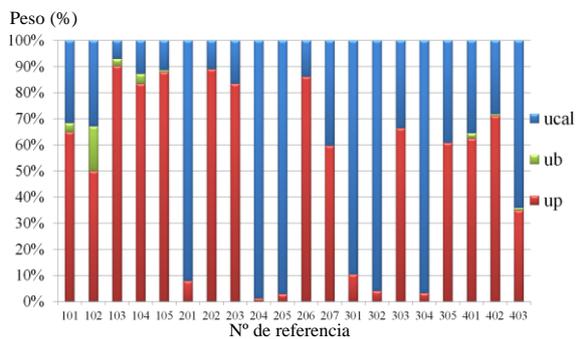


Figura 8. Distribución porcentual de las componentes de la incertidumbre (MH).

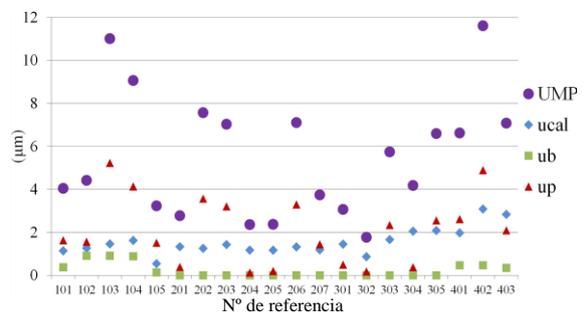


Figura 9. Componentes de la incertidumbre de medición en MH.

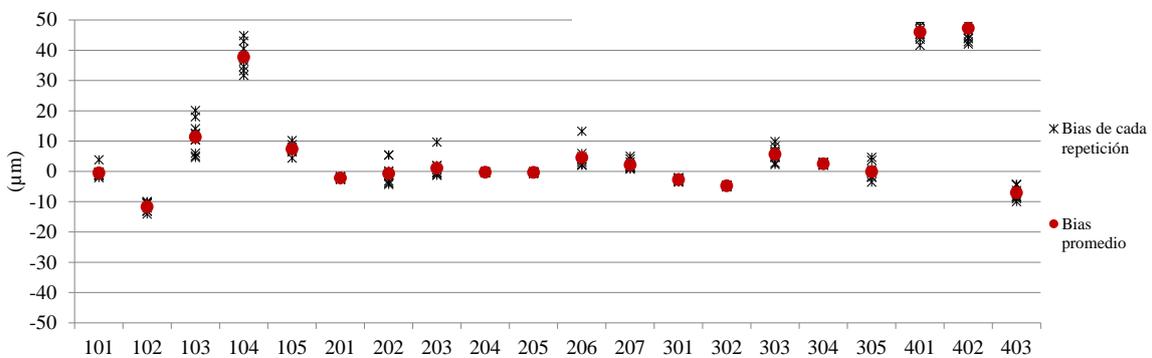


Figura 10. Dispersión del bias. En rojo, el bias promedio y en negro, el bias de cada una de las repeticiones.

4. Conclusiones

De la investigación realizada se establecen las siguientes conclusiones:

- Este estudio proporciona una visión general sobre la importancia de cada contribuyente de la incertidumbre del proceso de medición en MH de grandes dimensiones. Para ello, se aplica el procedimiento descrito en la norma ISO 15530-3:2011 en la medición de diferentes mensurandos de un componente prismático.
- Las pruebas experimentales llevadas a cabo muestran que la componente asociada a la repetibilidad del proceso de medición (u_{rep}) es el principal contribuyente de la incertidumbre expandida del proceso de medición en MH en condiciones “*on shop floor*”, llegando a suponer incluso el 90% de la incertidumbre en el caso del mensurando 103. La principal causa de esta falta de repetitividad en las mediciones es debido a que se trabaja en entornos no controlados, donde las variaciones de temperatura y humedad como la presencia de taladrina afectan negativamente a las mediciones.
- Por otro lado, en las mediciones en MMC la componente asociada a la calibración del equipo (u_E) es la que mayor peso presenta, exceptuando la tolerancia de ángulo (cero por definición) y las tolerancias de posición. Es lógico que las tolerancias de posición presenten mayor peso en las componentes asociadas a la reproducibilidad y repetibilidad de las mediciones, ya que dependen de un número mayor de elementos geométricos. Al recaer la mayor parte del peso de las incertidumbres en MMC en la componente asociada a la calibración se demuestra que la calibración de la pieza se realizó de forma correcta, ya que las mediciones han demostrado ser repetitivas y reproducibles en cualquiera de las cuatro configuraciones del cabezal empleadas.
- La componente asociada a la corrección de los errores sistemáticos u_b se mantiene por debajo de $1\mu\text{m}$ en todos los casos estudiados, por lo que puede considerarse prácticamente despreciable. Esto se debe principalmente a que las mediciones en MH se realizan con valores de temperatura cercanos a los $20\text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura utilizada en la medición en entorno controlado en MMC) y a que la pieza prismática medida es de pequeñas dimensiones. Sin embargo, esta componente podría representar una fuente de error importante en mediciones de piezas más voluminosas, con mayor variación de temperatura o cuando esta presente valores más alejados de $20\text{ }^\circ\text{C}$.
- A medida que el valor medido presenta una menor magnitud (errores de forma y tolerancias de orientación) el peso del *bias* aumenta, llegando a suponer hasta un 46,1% del valor medido (mensurando 304). Dado que este presenta valores similares para todas las repeticiones de la misma característica, es más apropiado especificar el *bias* fuera de la incertidumbre del proceso de medición (corrección del error sistemático), ya que en caso de no realizar esta corrección, la U_{MP} alcanzaría valores demasiado elevados, suponiendo una sobrestimación de la incertidumbre.
- Por lo general, los mensurandos que mayor incertidumbre de medida presentan son aquellos que menos repetitivos han resultado ser en las mediciones en MH (mensurandos 103, 104 y 402). En estos casos, u_p presenta valores cercanos a $5\mu\text{m}$

5. Agradecimientos

Se agradece al Departamento de Desarrollo Económico, sostenibilidad y Medio ambiente del Gobierno Vasco la financiación del proyecto "Ingeniería de Precisión para la mejora de los medios de fabricación" (KK-2021/00039).

Asimismo se agradece al grupo IT1573-22 del Gobierno Vasco por la financiación para realizar esta investigación.

6. Referencias

- [1] W. Gao, H. Haitjema, F. Z. Fang, R.K. Leach, C.F. Cheung, E. Savio, J.M. Linares. “On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing”. *CIRP Annals*, vol. 68, n.º 2, pp. 843-866, 2009. [PDF]. Disponible en: <https://bit.ly/3zbktZe>
- [2] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). [en línea] Disponible en: <https://www.ptb.de/emrp/ind62-home.html>
- [3] U. Mutilba, E. Gomez-Acedo, G. Kortaberria, A. Olarra, J.A. Yagüe-Fabra. “Traceability of on-machine tool measurement: a review”. *Sensors*, vol 17, n.º 7, pp. 1605, 2017. [en línea] Disponible en: <https://bit.ly/3PODFmq>
- [4] Ding, D., Zhao, Z., Li, Y., & Fu, Y. “Calibration and capability assessment of on machine measurement by integrating a laser displacement sensor”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 113, nº7, pp. 2301-2313, 2021. [en línea] Disponible en: <https://bit.ly/3U3NkZ1>

[5] Wang, S., Cheung, C., & Kong, L. “A Fiducial-Aided Reconfigurable Artefact for the Estimation of Volumetric Errors of Multi-Axis Ultra-Precision Machine Tools”. *Applied Sciences*, vol 12 n°4, pp. 1824, 2022. [en línea] Disponible en: <https://bit.ly/3Diqzec>

[6] R. Schmitt, M. Peterek. “Traceable measurements on machine tools-Thermal influences on machine tool structure and measurement uncertainty”. *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 576-580, 2015. [en línea] Disponible en: <https://bit.ly/3cKIOi2>

[7] Li, J. W., Zhang, W. J., Yang, G. S., Tu, S. D., & Chen, X. B. “Modeling of thermal error in complex physical systems: state-of-arts and future directions”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. vol 42, n°1, pp. 168-179, 2009. [en línea] Disponible en: <https://bit.ly/3eJ40VN>

[8] Fan, K., Yang, J., & Yang, L. “Orthogonal polynomials-based thermally induced spindle and geometric error modeling and compensation”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 65 n°9, pp. 1791-1800, 2013. [en línea] Disponible en: <https://bit.ly/3B8Y9Ax>

[9] J.A: Śladek, “Coordinate Metrology. Accuracy of systems and measurements”. [PDF]. Disponible en: <https://bit.ly/3BiOxVq>

[10] Y. Cheng, Z. Wang, X. Chen, Y. Li, H. Li, H. Li, H. Wang. “Evaluation and optimization of task-oriented measurement uncertainty for coordinate measuring machines based on geometrical product specifications”. *Applied sciences*, vol. 9, n.° 1, pp. 6, 2018. [en línea] Disponible en: <https://bit.ly/3PzSLfW>