

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2014

MEMORIA DEL PROYECTO Nº SV-14-GIJON-01-04

1. DATOS DEL PROYECTO

Título: Procedimiento de calibración “in-situ” de brazos de medir por coordenadas utilizando un patrón basado en características. Realización de ensayos de campo.

Investigador responsable: Braulio José Álvarez Álvarez

Tfno: 98 518 2443

E-mail: braulio@uniovi.es

Otros miembros del equipo investigador:

Eduardo Cuesta González, Daniel Álvarez Mántaras, Pablo Luque Rodríguez, Fernando Sánchez Lasheras, Daniel González Madruga (Universidad de León), Joaquín Barreiro García (Universidad de León), Susana Martínez Pellitero (Universidad de León)

Empresas o instituciones colaboradoras:

Hexagon Metrology, General Dynamics European Land Systems (GDELS), Zitrón, Delcam y Fundación Prointec, Intelmec, Noguera Maquinaria y Construcciones Mecánicas ELGO

2. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO

2.1 Resumen ejecutivo

El objetivo del proyecto de investigación es el desarrollo de una aplicación informática destinada a la realización práctica, y de tipo “in-situ”, de un nuevo procedimiento de calibración para Brazos Articulados de Medir por Coordenadas (BMCs o AACMMs). Los Brazos articulados de medir por coordenadas son máquinas portátiles de alta difusión y con un alto recorrido de implantación en la industria metalmecánica actual. Estos equipos son en realidad máquinas de medir por coordenadas tridimensionales de tipo portátil, de estructura no cartesiana y similar a un brazo robotizado dotado de posibilidad de giros que le confieren una gran flexibilidad, accesibilidad y portabilidad.

El proyecto incluye de forma muy importante la realización de “ensayos de campo” en un conjunto de empresas -de ámbito local y regional - interesadas. Empresas que ya manifestaron su interés en la investigación con cartas de apoyo a un proyecto de mayor entidad, concedido dentro del plan Nacional de investigación (ref. DPI2012-36642-C02-01) al mismo grupo de investigación que solicita este proyecto, y titulado “*Aseguramiento de la medición y representación del conocimiento en la medición con sistemas portátiles de medir por Coordenadas*”. El procedimiento de calibración que se ensayará ya ha sido desarrollado dentro del citado proyecto de investigación y, teniendo en cuenta el estado del arte actual puede considerarse totalmente novedoso. La novedad reside en utilizar un “patrón de características” para evaluar tanto el equipo como su forma de utilización. Este patrón es un patrón tridimensional dotado de un conjunto de características geométricas de precisión, distribuidas espacialmente de forma que la medición de las mismas, con multiposición alrededor del brazo de medir, permita no sólo evaluar el propio equipo sino también al operario que lo utiliza, la fuerza que realiza, la distribución de los puntos, la estabilidad en el contacto, etc. La primera parte de esta propuesta pretende implementar una aplicación informática, programable en Excel, Matlab o

similar, que permita realizar este procedimiento de calibración con el nuevo patrón de características, por parte de un operario (calibrador) que realice las mediciones.

Hay que tener en cuenta que la inspección de características dimensionales y geométricas es una tarea que no aporta valor al producto en sí sino que lo acepta como válido o no. Sin embargo la optimización de la eficiencia de la inspección es crucial por los recursos que se requieren: una elevada inversión, mantenimiento y personal especialmente formado. El presente proyecto tiene como principal objetivo la optimización de esta tarea por medio de la potenciación de los Brazos de Medir por Coordenadas, que suponen una drástica reducción de la inversión y del tiempo empleado en la inspección y un aumento de la flexibilidad de la empresa. Sin embargo, estos aparatos todavía carecen de la aceptación internacional en cuanto a la fiabilidad de sus medidas, debido principalmente a su relativa novedad y rápido desarrollo. De hecho, los BMCs están experimentando una gran expansión en la industria debido principalmente a su gran flexibilidad, portabilidad, fácil manejo y a su precio reducido comparado con las Máquinas de Medir por Coordenadas fijas (MMCs), instrumento tradicional de inspección. Además los BMCs se adecúan a piezas que no requieren una gran precisión, a piezas de gran tamaño o a piezas que incorporan formas de fabricación y ensamblaje complejas. A pesar de sus ventajas son todavía escasos los estudios existentes sobre estos instrumentos metrológicos, sobre la fiabilidad de sus mediciones y la precisión que pueden conseguir, que están claramente alejadas de las características de las MMCs, sobre todo por falta de repetibilidad.

2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Con respecto al objetivo general del proyecto de investigación, comentar que se ha cumplido satisfactoriamente en prácticamente su totalidad, en particular las tareas realizadas fueron:

- Diseño del procedimiento apartado para su implementación "in-situ".
- Elaboración de hoja de cálculo asociada.
- Implementación (Visual Basic®) de aplicación que sirva de nexo de unión entre software de control del Brazo de medir (PC-DMIS®) y la hoja de cálculo.
- Ensayo previo en laboratorio de metrología de la Universidad de Oviedo.
- Ensayos en empresas colaboradoras.
- Generación de informes de calibración/verificación para las empresas.

Tan solo mencionar que se están elaborando en estos momentos las publicaciones (al menos dos) donde se puedan difundir estas experiencias. Una publicación con respecto al propio procedimiento de calibración y otra con la comparativa entre las distintas empresas.

2.3 Tareas realizadas

Introducción. Calibración de Brazos portátiles de Medir por Coordenadas

Como se comentó anteriormente, se parte del conocimiento y materialización de un patrón de características que fue desarrollado como parte del proyecto de investigación mencionado (Plan Nacional, ref. DPI2012-36642-C02-01), durante las anualidades del 2013 y 2014. En el 2012 se desarrolló un primer prototipo de patrón de aluminio anodizado, que se calibró en un laboratorio de referencia (figura 1). Posteriormente, a primeros de 2014, se fabricó un segundo prototipo mejorado, basado en una estructura portante sobre las que se sitúan las características a medir, y realizado íntegramente de INVAR®. El INVAR es una aleación de Fe(64%)-Ni(36%) con un coeficiente de dilatación extremadamente bajo, entre 10 y 20 veces inferior al acero. La concepción de este

patrón esta especialmente indicada para calibraciones “in situ”, donde el procedimiento se realiza en muchas ocasiones fuera de temperaturas controladas.

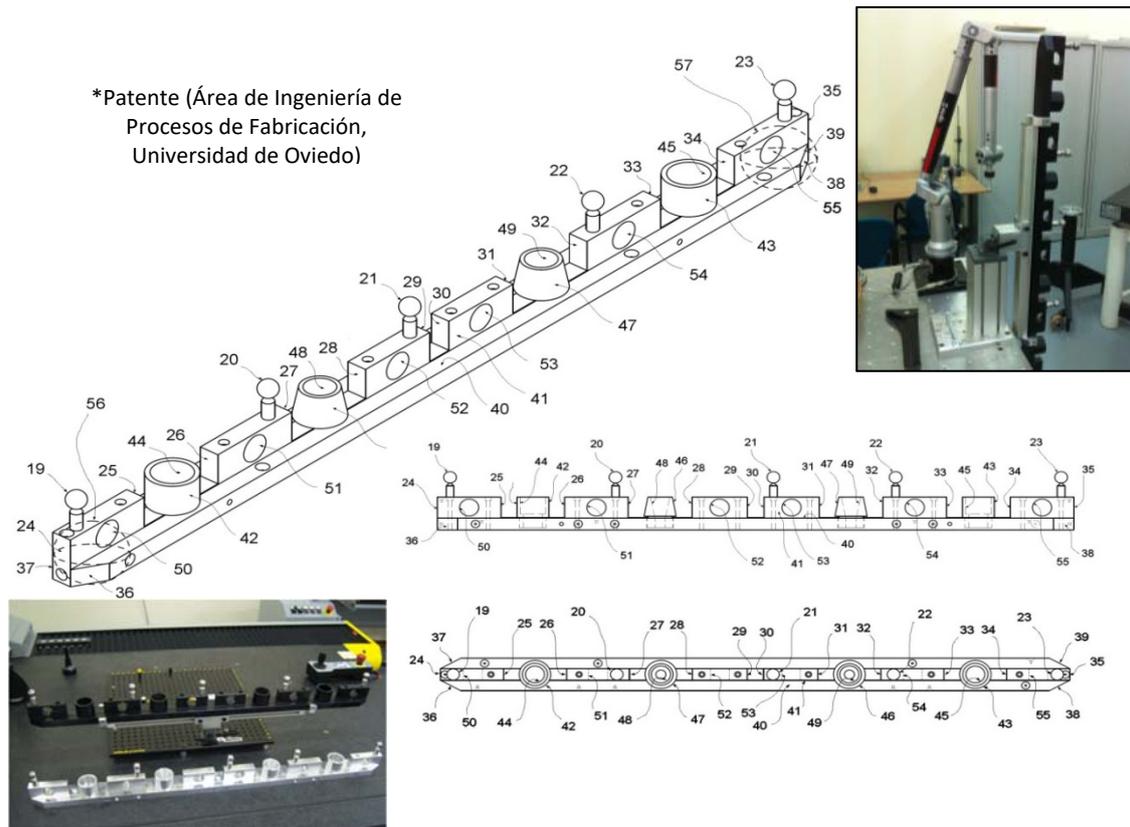


Figura 1. Concepto del Patrón inicial (aluminio anodizado) patentado (AACMM de Uniovi)

Además, y también como resultado parcial del proyecto de investigación del Plan Nacional, se había desarrollado un procedimiento de calibración basado en el patrón de características primario. Este procedimiento había sido probado en nuestro laboratorio con el patrón de aluminio.

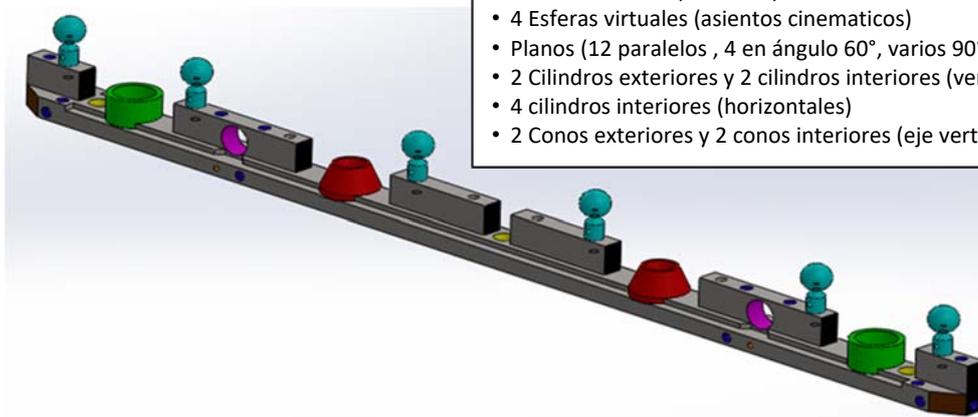
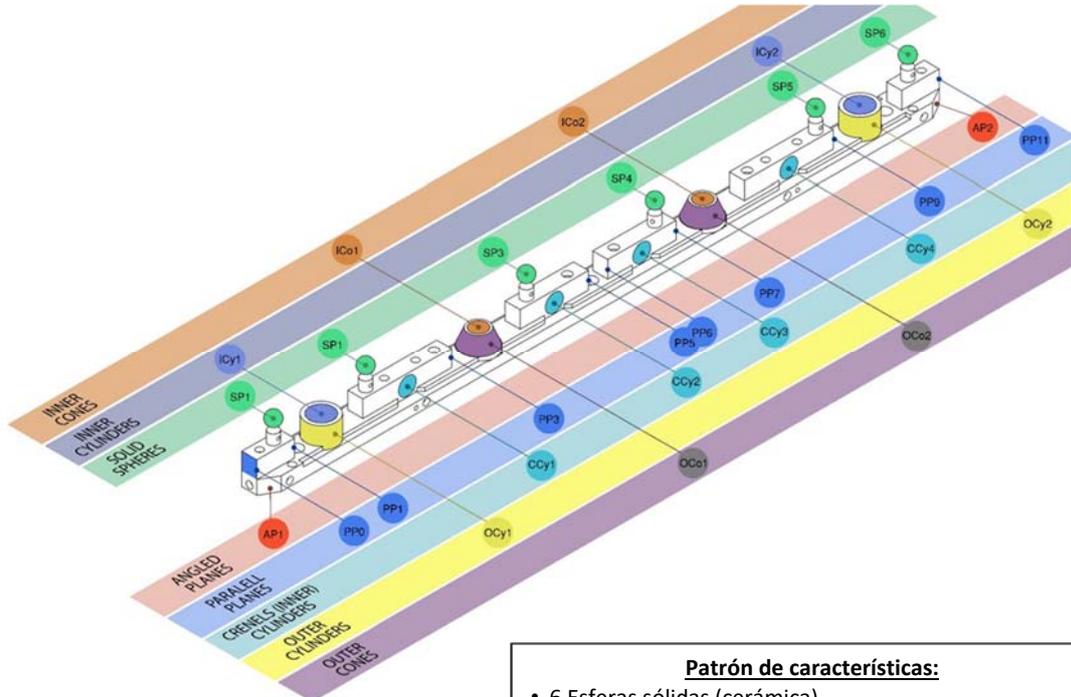
Con el nuevo patrón de INVAR y con la concesión del presente proyecto IUTA-2104, se estaba en disposición de repetir los ensayos, adaptándolos a la nueva geometría (pues incorporaba nuevas entidades), implementándolos en una hoja de cálculo específica y realizando los ensayos de campo pertinentes en las empresas interesadas. Sin duda, estos ensayos permitirían extraer una información muy precisa sobre cómo miden los operarios, sobre cómo se está comportando el brazo y en definitiva sobre el alcance, o la fiabilidad, que se obtienen con el uso de estos equipos eminentemente portátiles. Esta fiabilidad se estudia además en condiciones de medición de elementos muy variados (no sólo esferas, sino también cilindros, conos, planos, etc.) que en todo caso se encuentran habitualmente en inspección de elementos y componentes metal-mecánicos.

En la figura 2 se muestra un modelo CAD del patrón (prototipo avanzado) de INVAR con todas las características posibles para hacer la calibración de los brazos, entre las que se incluyen:

- 6 Esferas sólidas (cerámica, óxido de zirconio ZrO_2)
- 4 Esferas virtuales (cada uno formado por 4 asientos cinemáticos mecanizados sobre la estructura)
- Planos (12 paralelos que materializan distancias además de planitud de cada uno de ellos considerado individualmente , 4 de ellos formado ángulo 60° dos a dos y

situados en los extremos, al menos un par de planos a 90° para evaluar perpendicularidad)

- 2 Cilindros exteriores y 2 cilindros interiores (con eje vertical)
- 4 Cilindros interiores (con eje horizontal)
- 2 Conos exteriores y 2 conos interiores (con eje vertical)



- Patrón de características:**
- 6 Esferas sólidas (cerámica)
 - 4 Esferas virtuales (asientos cinemáticos)
 - Planos (12 paralelos, 4 en ángulo 60°, varios 90°)
 - 2 Cilindros exteriores y 2 cilindros interiores (verticales)
 - 4 cilindros interiores (horizontales)
 - 2 Conos exteriores y 2 conos interiores (eje vertical)

Figura 2. Concepto de patrón de características del nuevo patrón de INVAR

Como parte de las acciones de este proyecto del IUTA se comenzó midiendo el patrón de INVAR con una Máquina de Medir por Coordenadas (MMC), obteniendo los valores de referencia de todas las características implicadas (figura 3). Se realizaron 10 repeticiones para poder obtener no sólo los nominales sino también las incertidumbres de medición asociadas al patrón, que conllevan la consideración de la repetibilidad y reproducibilidad de sus medidas en la MMC.

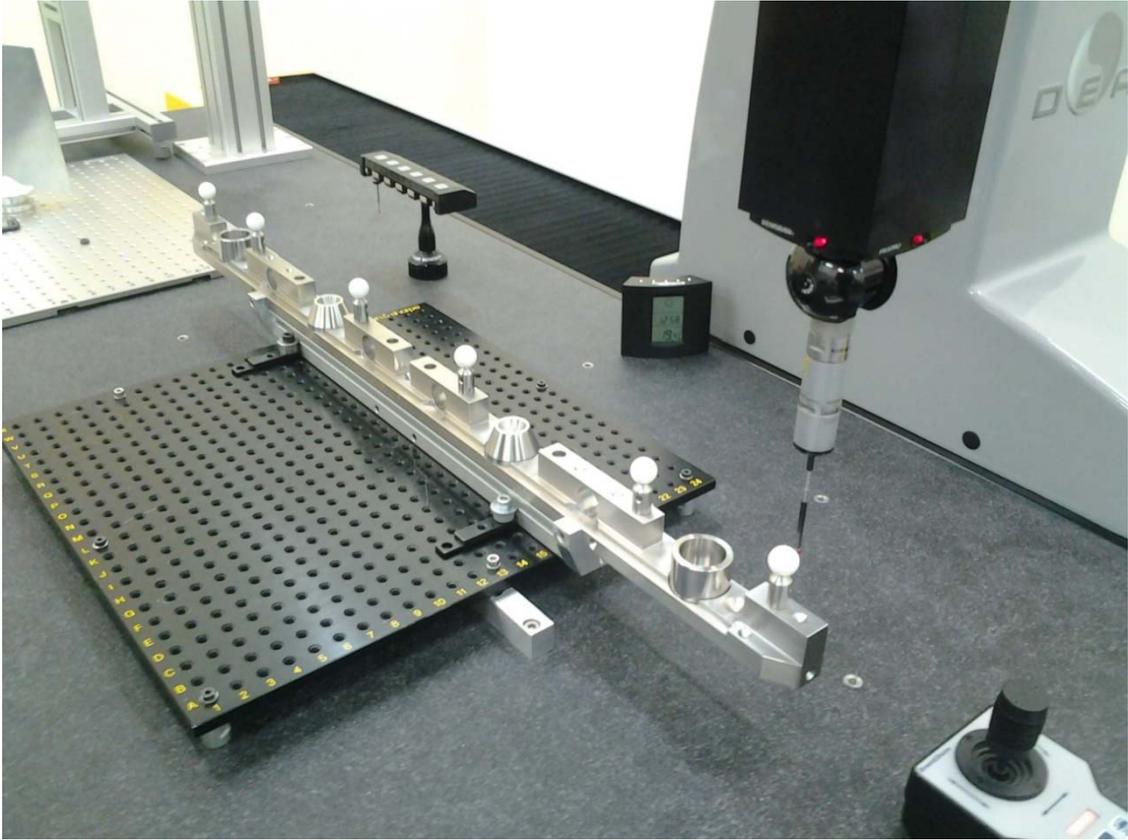


Figura 3. Materialización del patrón de INVAR y su medición de referencia sobre CMM

Dentro del proyecto del IUTA se hizo la reingeniería de un procedimiento de calibración ya disponible. El procedimiento implica la multiposición del patrón alrededor del volumen de trabajo del AACMM, con la correspondiente medición de las características en cada una de esas posiciones espaciales (figura 4). Las posiciones elegidas eran ocho, Cuatro de ellas con el patrón en posición horizontal, dos de ellas con el patrón inclinado (se suele coger 30° o 45°), y dos más con el patrón vertical.

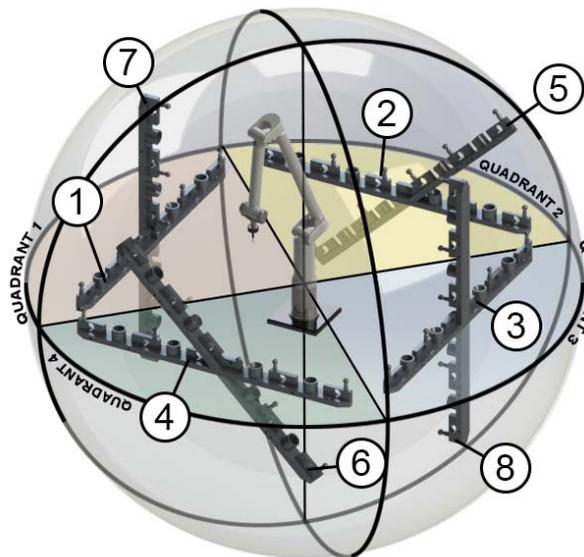


Figura 4. Posiciones establecidas para en el ensayo de calibración/verificación.

En cada una de las ocho posiciones espaciales se ejecuta un programa del BMC, programa elaborado específicamente según el tipo de patrón, que va guiando al usuario en cada una de las distintas características a medir. El programa incorpora las repeticiones necesarias e incluso ofrece la posibilidad de medir o no algunas de las características en función del tiempo, tipo o envergadura de la evaluación que desee el cliente. Esta modularidad es fundamental, pues permite adaptar el procedimiento a los requerimientos de “precisión” frente a “tiempo de calibración” que requiera cada usuario, adaptándolo también a la evaluación según unas características concretas. Por ejemplo permite evaluar cilindros exteriores, descartando los cilindros interiores, o viceversa. O permite evaluar solo esferas, realizar solo el test de esferas virtuales, evaluar distancias entre planos y distancias entre cilindros, evaluar tolerancia dimensionales y no las geométricas o viceversa, etc.

Dentro el proyecto del IUTA se ha tenido que adaptar (y reprogramar) el procedimiento tanto a la geometría del patrón antiguo como a la nueva geometría del patrón de INVAR (el más adecuado para ensayos “in situ”). Este patrón es algo más pequeño (1000 mm con sección 50×50 mm) que el original de aluminio anodizado, (1000 mm con sección 60×60 mm). Además el nuevo patrón dispone los puntos de amarre al utillaje separados una distancia distinta del patrón antiguo, lo que requirió un rediseño tanto del amarre como del utillaje multiposición disponible.

Procedimiento de calibración

El procedimiento que aquí se plantea trata de reflejar la medida natural por parte del operario, recogiendo así en sus resultados no solo los errores del equipo, sino también el quehacer del propio operario, permitiendo al mismo tiempo dejar patentes diferentes problemáticas que aparecen con frecuencia en la medición por contacto con BMC. De este modo, los elementos se miden siempre con distribuciones de puntos suficientes y con las orientaciones de sonda más adecuadas simulando la práctica cotidiana de la medición, sin tratar en este aspecto de limitar las combinaciones en las posiciones del BMA adoptadas por el usuario del equipo. En este punto puede verse cómo la utilización de una pieza patrón tan compleja hace que ésta se convierta en cierto modo en una pieza master genérica, que permite evaluar cómo trabajan en conjunto equipo y operario.

La tabla 1 define las diferentes posiciones tal y cómo finalmente se establecen. La figura 4 comentada anteriormente las muestra gráficamente, para una mejor comprensión. Puede verse que en todos los casos el patrón se sitúa tangencialmente al BMC. Al mismo tiempo se puede apreciar cómo la longitud del patrón es importante, y es capaz de cubrir el cuadrante del espacio de trabajo de un BMC convencional prácticamente al completo.

Tabla 1. Ocho posiciones definidas para el ensayo reducido, según orientación y cuadrante de trabajo

#	Cuadrante	Orientación	#	Cuadrante	Orientación
1	1	Horizontal	5	3	45°
2	2	Horizontal	6	4	45°
3	3	Horizontal	7	1	Vertical
4	4	Horizontal	8	2	Vertical

Debe tenerse en cuenta que en esta experiencia prototipo se han de evaluar equipos utilizados, en algunos casos, de forma cotidiana en la empresa, y por tanto puede que

no siempre sea posible realizar el ensayo completo, sino ciertas posiciones representativas. Sin embargo, se ha observado cómo los ensayos parciales mostraban la misma coherencia con los datos que los ensayos completos, aunque sí es cierto que los valores de dispersión están calculados a partir de muestras más pequeñas y son mucho más sensibles a los errores singulares.

Diseño de utillaje para posicionamiento

Dentro del proyecto se ha diseñado y fabricado un utillaje destinado a poder situar el patrón en las diferentes posiciones a ensayar. El utillaje se basa principalmente en la utilización de perfiles extrudidos de aluminio y de piezas diseñadas específicamente para permitir el soporte del patrón.

En primer lugar se diseñó una pieza soporte que permitiese ubicar el patrón en horizontal sobre una mesa multitaladrada, que permitiese al mismo tiempo que la barra soporte fuese agarrada por otros dispositivos, como pueden ser sargentos, en el caso de que el patrón se montase sobre una mesa sin taladros.

El segundo utillaje se diseñó para ubicar el patrón con una inclinación de 45° (figura 5). Al comienzo del proyecto se contaba ya con un utillaje diseñado para la colocación del patrón en diferentes ángulos tanto en el plano horizontal como en el plano vertical, pero se percibió que era especialmente sensible a la fuerza aplicada, y se adoptó una solución alternativa con el fin de reforzar la estructura y pasar de una sola columna a dos columnas (figura 6).



Figura 5. Piezas de sujeción para el patrón a 45° .

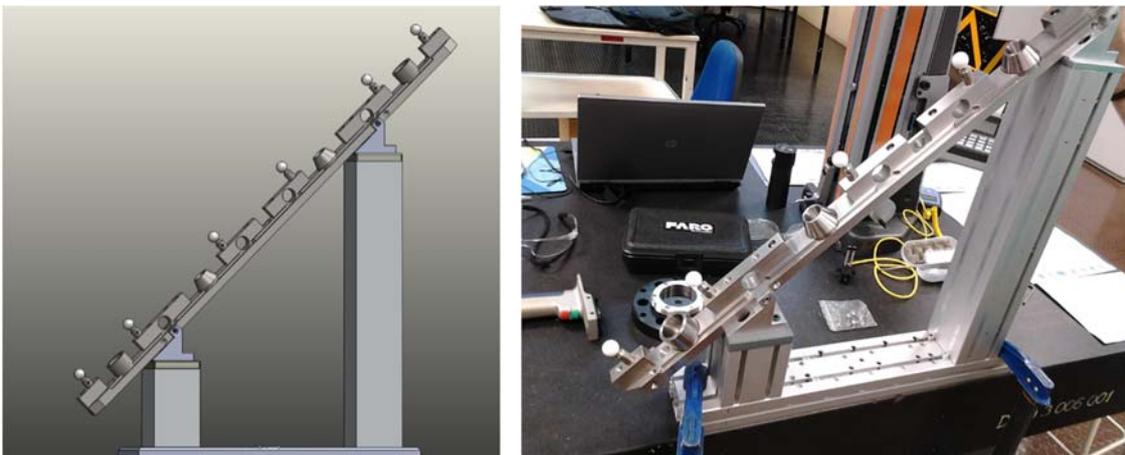


Figura 6. Montaje del patrón a 45° sobre dos columnas y ensayo con el accesorio.

Asignación de Incertidumbres

Al principio del proyecto, y de acuerdo al procedimiento establecido se elaboró un balance de incertidumbres acorde a la GUM, en el que se incorporan distintas contribuciones (tipo A y tipo B) para obtener unas incertidumbres típicas (estándar) que posteriormente se expanden dando lugar a incertidumbres expandidas pero no globales (para todo el brazo) sino parciales, para las distintas características a medir. De esta forma se obtienen incertidumbres expandidas para la medición de dimensiones (lineales, diámetros, etc.) y por otra parte para la medición de errores geométricos tanto de elementos individuales como combinados/relacionados (planitud, cilindricidad, paralelismo, etc.)

A modo resumen, en la tabla 2 se recoge un balance de incertidumbres, donde se reflejan todas las componentes de la incertidumbre final del equipo, con su denominación y distribución.

Tabla 2. Balance de incertidumbres para medición con CMA.

Contribución	Distribución		Fórmula
Repetibilidad de las medidas con CMA sobre la característica ji	u_{repji}	Normal	$\frac{S_{ji}}{\sqrt{n}}$
Contribución de la variabilidad en temperatura	$u_{\Delta T_{ji}}$	Rectangular	$\frac{\alpha L_{ji} \Delta T}{\sqrt{12}}$
División de escala	u_E	Rectangular	$\frac{E}{\sqrt{12}}$
Contribución del patrón de características	$u_{g_{ji}}$	-	$u_{g_{ji}}$

El índice j corresponde con el tipo de característica (esfera, cilindro exterior, cilindro interior, plano, cono exterior, etc.) y el índice i se corresponde con el número de orden de los distintos elementos de esa característica (plano 0, plano 1, ..., plano 11, etc.). Para obtener la incertidumbre de una determinada característica (j), estas contribuciones se agrupan cuadráticamente para obtener la incertidumbre típica final que se le asigna al equipo según la ecuación (1), aplicando la propagación cuadrática de varianzas.

$$u_{CMA_{ji}} = \sqrt{u_{repji}^2 + u_{g_{ji}}^2 + u_{\Delta T_{ji}}^2 + u_E^2} \quad (1)$$

Finalmente, como se tienen varias características de cada tipo y por tanto varias incertidumbres por característica, la incertidumbre global se asigna mediante un criterio totalizador, que aconseja tomar como incertidumbre a asignar la máxima de las obtenidas, y por tanto el valor final se obtiene como (ecuación 2):

$$u_{CMA_j} = \max \{ u_{CMA_{ji}} \} \quad (2)$$

Hoja de Cálculo desarrollada

Se ha desarrollado una hoja de cálculo en Microsoft Excel® con el fin de facilitar el cálculo de las incertidumbres y correcciones anteriormente indicadas. En ella se implementan las fórmulas de las diferentes componentes de incertidumbre así como la incertidumbre final combinada.

El empleo de un libro organizado de hojas de cálculo ofrece varias ventajas, sobre todo frente a futuras modificaciones en los datos. En primer lugar se ha elaborado una hoja en la que se incluye la información del patrón calibrado. En ella se anotan las dimensiones obtenidas del patrón con la MMC, obteniéndose de forma automática un valor de incertidumbre u_p basado en la repetibilidad de los resultados. Esto permite que se puedan incluir de forma sencilla posteriores calibraciones del patrón, quizás elaboradas con un equipo de mayor precisión, o bien certificado ENAC, obteniendo una actualización automática de los valores de incertidumbre que se atribuyen al patrón, sin verse afectada la validez de las mediciones ya realizadas con el BMC correspondiente. La parte principal del libro de cálculo se divide en dos secciones principales, cada una desarrollada en una hoja distinta. Estas secciones siguen los diferentes conceptos en los que se basa el ensayo: medición dimensional, medición de errores de forma y medición de tolerancias combinadas o relacionadas, siendo estos dos últimos grupos considerados dentro del grupo de tolerancias geométricas. Resumiendo, se cuenta con una hoja para valores dimensionales (figuras 7 y 8), donde se estudian los resultados obtenidos en medición de distancias, diámetros y ángulos; y una hoja para valores geométricos, donde se recogen los resultados de los errores de forma y errores de posición y orientación. Estas dos hojas de cálculo siguen distribuciones muy similares.

Debe tenerse en cuenta que PC-DMIS®, que es el software utilizado en la mayoría de equipos ensayados, permite ejecutar rutinas Visual Basic para automatización de ciertas funciones, siendo una de ellas la exportación de datos desde el propio PC-DMIS® hasta Microsoft Excel®. Dentro de este proyecto del IUTA se ha confeccionado un programa específico (Microsoft Visual Basic 6.0®) para rellenar la hoja de cálculo que aquí se presenta, facilitando enormemente la toma de datos así como el cálculo de las incertidumbres y de las correcciones correspondientes a los ensayos realizados (figuras 9 y 10).

Distancia entre Esferas																	
Xc	Esferas	POSICIONES DEL PATRÓN								[mm]	[mm]	[µm]	[mm]	[µm]	[µm]	[µm]	[mm]
		1H	2H	3H	4H	5I	6I	7V	8V	x_c	C_c	C_c	σ	U_d	U_{T1}	U_{CH1}	U_{CH2}
135.1452	1-2													3.10			
370.0331	1-3													4.12			
558.0619	1-4													5.10			
733.0411	1-5													5.89			
927.8558	1-6													6.62			
Corrección media										Incertidumbre expandida dist. Esferas				RMS máx			

Distancia entre Esferas virtuales																	
Xc	Esferas	POSICIONES DEL PATRÓN								[mm]	[mm]	[µm]	[mm]	[µm]	[µm]	[µm]	[mm]
		1H	2H	3H	4H	5I	6I	7V	8V	x_c	C_c	C_c	σ	U_d	U_{T1}	U_{CH1}	U_{CH2}
	1-2													3.10			
	1-3													5.89			
	1-4													6.62			
Corrección media										Incertidumbre expandida dist. Esf. virtuales				RMS			

Distancia entre Planos																	
Xc	Planos	POSICIONES DEL PATRÓN								[mm]	[mm]	[µm]	[mm]	[µm]	[µm]	[µm]	[mm]
		1H	2H	3H	4H	5I	6I	7V	8V	x_c	C_c	C_c	σ	U_d	U_{T1}	U_{CH1}	U_{CH2}
28.1758	5-6													2.72			
54.7351	0-1													2.81			
234.7339	0-3													3.80			
484.7331	0-5													4.61			
612.7715	0-7													5.08			
842.7606	0-9													5.39			
937.7155	0-11													6.54			
Corrección media										Incertidumbre expandida dist. Planos				RMS			

Distancia entre Cilindros exteriores																	
Xc	Cilindros	POSICIONES DEL PATRÓN								[mm]	[mm]	[µm]	[mm]	[µm]	[µm]	[µm]	[mm]
		1H	2H	3H	4H	5I	6I	7V	8V	x_c	C_c	C_c	σ	U_d	U_{T1}	U_{CH1}	U_{CH2}
788.0195	1-2													5.51			
	1-3																
	1-4																
Corrección media										Incertidumbre expandida dist. Cil. exteriores				RMS			

Figura 7. Hoja de cálculo para la información dimensional del ensayo.

TEST DE MEDICIÓN DIMENSIONAL																	
Distancia entre Esferas																	
Xo	Esferas	POSICIONES DEL PATRÓN								[mm]							
		H	2H	3H	4H	5	6	7V	8V	x	Co	Co	φ	U _h	U _h	U _h	U _h
135 1452	1-2	135 175	135 205	135 204	135 189	135 176	135 186	135 149	135 142	135 1722	0.0280	20.00	0.0263	3.10	0.00	10.00	0.0269
370 0921	1-3	370 160	370 200	370 210	370 140	370 160	370 091	370 103	370 137	370 1656	0.0525	52.49	0.0502	4.12	0.22	35.75	0.0567
558 0678	1-4	558 149	558 178	558 216	558 020	558 037	558 037	558 110	558 114	558 1078	0.0459	45.89	0.0719	5.10	0.33	51.13	0.0611
793 0411	1-5	793 010	793 178	793 185	792 993	793 039	793 039	793 067	793 094	793 0745	0.0234	23.42	0.0227	5.69	0.47	51.75	0.0517
927 8968	1-6	927 820	927 881	927 877	927 783	927 833	927 833	927 871	927 870	927 8709	0.0781	78.14	0.0722	6.52	0.95	51.46	0.0926
Corrección media 0.0250 mm 24.99 μm Incertidumbre expandida dist. Esferas 51.75 μm RMS																	
Distancia entre Esferas virtuales																	
Xo	Esferas	POSICIONES DEL PATRÓN								[mm]							
		H	2H	3H	4H	5	6	7V	8V	x	Co	Co	φ	U _h	U _h	U _h	U _h
135 0762	1-2	135 012	135 014	134 969	135 012	135 003	135 012	135 056	135 024	135 0762	0.0000	0.00	0.0204	3.10	0.11	14.00	0.0241
752 5200	1-3	753 007	752 767	752 975	752 840	752 922	752 840	753 016	752 996	752 5200	0.0000	0.00	0.0337	5.69	0.44	65.54	0.0365
947 8043	1-4	947 707	947 707	947 834	947 711	947 844	947 711	947 953	947 966	947 8043	0.0000	0.00	0.1114	6.52	0.56	79.00	0.0791
Corrección media 0.0000 mm 0.00 μm Incertidumbre expandida dist. Esf. virtuales 79.00 μm RMS																	
Distancia entre Planos																	
Xo	Planos	POSICIONES DEL PATRÓN								[mm]							
		H	2H	3H	4H	5	6	7V	8V	x	Co	Co	φ	U _h	U _h	U _h	U _h
26 1750	5-6	26 200	26 195	26 191	26 133	26 102	26 102	26 169	26 164	26 1659	-0.0050	-5.96	0.0206	2.72	0.02	20.96	0.0206
54 7951	0-1	54 920	54 901	54 972	54 909	54 909	54 909	54 780	54 822	54 9439	0.0467	46.73	0.0479	2.61	0.03	31.16	0.0312
284 7938	0-3	284 886	284 903	284 888	284 893	284 759	284 759	284 776	284 802	284 8332	0.0393	39.27	0.0548	3.90	0.17	45.96	0.0460
484 7791	0-5	484 911	484 929	484 890	484 873	484 800	484 800	484 774	484 806	484 8500	0.0717	71.65	0.0504	4.61	0.29	41.56	0.0416
612 7776	0-7	612 886	612 793	612 836	612 751	612 795	612 795	612 783	612 830	612 8885	0.0070	36.97	0.0410	5.08	0.36	39.42	0.0294
842 7606	0-9	842 819	842 801	842 795	842 709	842 761	842 761	842 764	842 844	842 7816	0.0210	21.02	0.0421	5.95	0.50	30.39	0.0304
967 7855	0-11	967 745	967 731	967 758	967 679	967 779	967 779	967 712	967 813	967 7496	0.0381	38.09	0.0425	6.54	0.59	30.00	0.0308
Corrección media 0.0251 mm 25.11 μm Incertidumbre expandida dist. Planos 45.96 μm RMS																	

Figura 8. Hoja de cálculo para la información dimensional del ensayo, con los resultados de las mediciones.

RESUMEN DE INCERTIDUMBRES										
DIMENSIONAL	L _c [mm]	U _{con} [μm]	HPC [mm]	Texto de las figuras	L _c [mm]	U _{con} [μm]	HPC [μm]	HPC TOTAL [mm]	HPC TOTAL [μm]	U _{con} [μm]
Distancia entre esferas	0.0061	7.90	0.019	Esferas sólidas	8.30	0.0078	1193	22.16	0.0222	12.01
Distancia entre esferas virtuales	0.0000	28.74	0.0385	Esferas virtuales	0.00	0.0297	38.95	52.16	0.0521	0.0206
Distancia entre planos	-0.0081	10.67	0.0262	Planos	-8.13	0.0107	26.80	49.87	0.0489	12.01
Distancia entre cilindros exteriores	-0.0290	7.29	0.0289	Cilindros exteriores	-28.03	0.0073	28.91	48.62	0.0468	12.01
Distancia cil. Interiores (almena)	-0.0006	9.39	0.0195	Cilindros interiores (almena)	-0.98	0.0094	11.46	22.00	0.0220	12.01
Distancia entre cilindros interiores	-0.0204	7.06	0.0204	Cilindros interiores	-20.37	0.0071	21.44	36.06	0.0361	12.01
Diámetro esferas	-0.0184	15.11	0.0383	Esferas sólidas	-19.37	0.0151	38.31	58.74	0.0587	23.88
Diámetro esferas virtuales	0.0000	67.47	0.0760	Esferas virtuales	0.00	0.0576	75.96	115.21	0.1162	23.88
Diámetro cilindros exteriores	-0.0225	18.08	0.0391	Cilindros exteriores	-22.53	0.0181	39.05	59.33	0.0593	23.88
Diámetro cil. interiores (almena)	0.0188	9.33	0.0237	Cilindros interiores (almena)	19.91	0.0099	23.74	51.07	0.0511	23.88
Diámetro cilindros interiores	0.0295	18.82	0.0435	Cilindros interiores	25.48	0.0188	43.51	65.96	0.0650	23.88
Ángulos Conos exteriores	-0.005*	0.027*	0.035*		-4.64*	0.0263*	0.035*	0.052*	0.052*	0.044*
Ángulos Conos interiores	0.010*	0.056*	0.126*		8.847*	0.0957*	0.126*	0.201*	0.201*	0.044*
Ángulos entre planos	0.003*	0.008*	0.031*		6.676*	0.0081*	0.031*	0.045*	0.045*	0.044*
DE FORMA	max. Dim.	57.4 μm								
Esferas	0.0032	14.15	0.0386	Esferas sólidas	9.25	0.0142	26.66	30.98	0.0370	13.18
Cilindros exteriores	0.0204	20.49	0.0388	Cilindros exteriores	20.38	0.0206	39.82	68.79	0.0688	13.18
Cilindros interiores	0.0132	9.09	0.0203	Cilindros interiores	13.23	0.0091	20.29	37.38	0.0374	13.18
Conicidad exterior	0.0094	8.55	0.0198	Conos exteriores	9.37	0.0088	16.82	24.20	0.0242	13.18
Conicidad interior	0.0204	21.39	0.0409	Conos interiores	20.44	0.0204	40.87	60.66	0.0607	13.18
Planitud	0.0014	5.42	0.0048	Planos	1.42	0.0054	4.83	8.73	0.0087	13.18
COMBINADAS	max. Form	21.39 μm								
Paralelismo de planos	0.0011	4.96	0.0082	Paralelismo de planos	1.07	0.0050	8.16	10.4	0.0101	11.81
Perpendicularidad de planos	0.0036	3.21	0.0046	Perpendicularidad de planos	3.57	0.0032	4.60	7.74	0.0077	11.81
Circularidad cilindros	0.0303	27.23	0.0539	Circularidad cilindros	30.32	0.0272	53.94	77.39	0.0774	11.81
max. Comb.		27.23 μm								

Figura 9. Hoja resumen de datos.

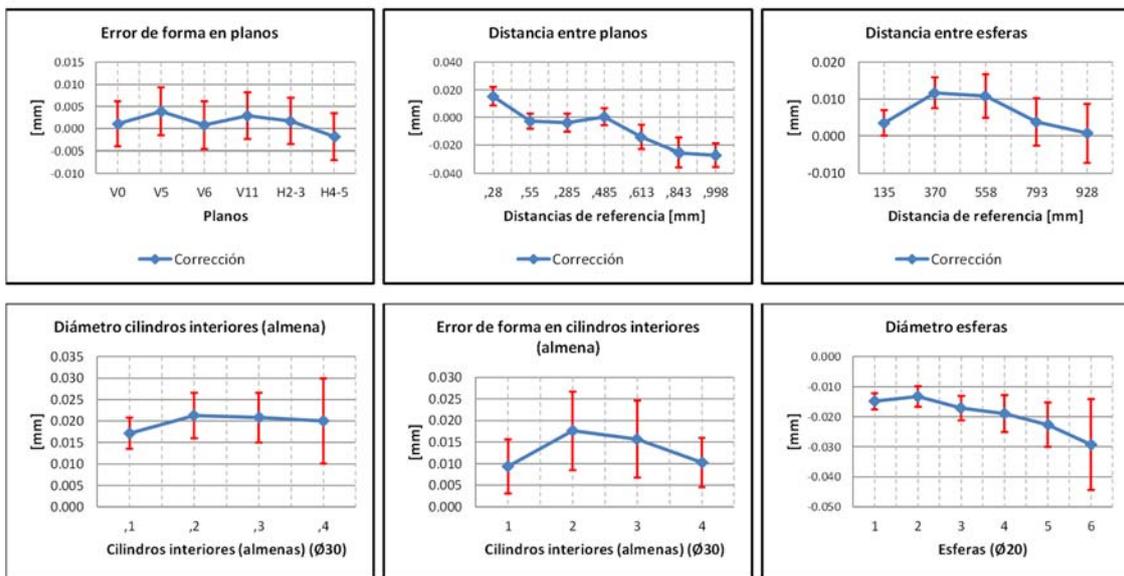


Figura 10. Gráficas de error de diferentes características geométricas evaluadas.

Ensayos de Campo

Durante el proyecto del IUTA se contactó con todas las empresas que habían manifestado su interés en la investigación. Algunas de ellas posibilitaron los ensayos “in-situ” según las líneas marcadas por la investigación (ensayo completo), otras permitieron llevar a cabo unas calibraciones más “reducidas”, bien en tiempo o con menos características, y otras simplemente no dispusieron de tiempo o declinaron el estudio. En la tabla 3 se resumen todos los ensayos de campo.

Tabla 3. Ensayos de campo realizados durante el proyecto.

Ensayo (empresa)	Nº de ensayos	Operarios/ ensayo	Tiempo (h)	Fabricante	Características medidas	Alcan ce del BMC (mm)	Nº ejes BMC
Uni. Oviedo	2	1	12	Romer Sigma	todas	1800	6
Uni. León	2	1	12	Romer Absolute	todas	2000	6
CIFP La Laboral	1	Varios	12	Romer Absolute	todas	2000	6
Fundación Prodimtec	1	Varios	5	Romer Absolute	todas	2500	7
ITMA	1	Varios	5	Romer MultiGage	todas (en volumen disponible)	1200	6
GDELS Sta. Bárbara	1	Varios	3	Faro Edge	Esferas, planos, y cilindros	3700	7

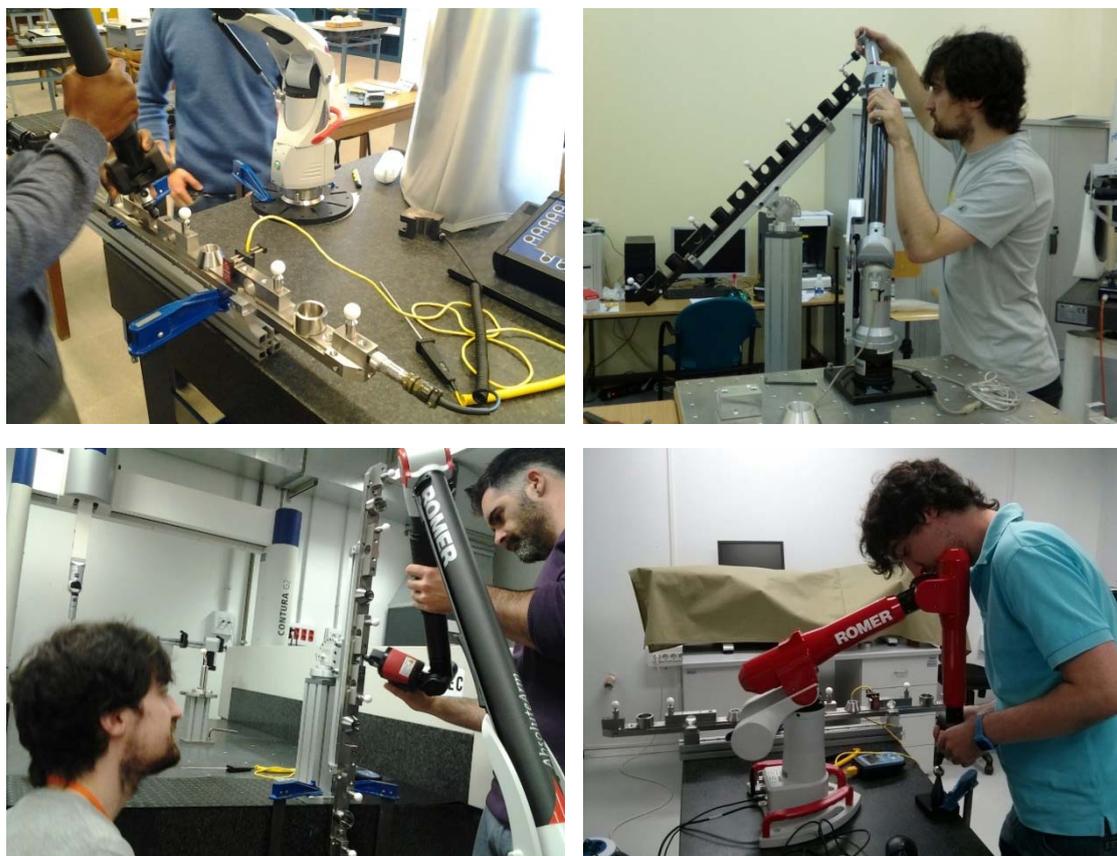


Figura 11. Diversas imágenes de los ensayos de campo realizados.

2.4 Resultados obtenidos

Como resultado de los ensayos “in-situ” realizados se rellenaron las hojas de cálculo, se calcularon las incertidumbres de cada equipo ensayado y se obtuvieron todos los informes respectivos de calibración de cada ensayo en particular (figura 12).

	CALIBRACIÓN DE BRAZO DE MEDIR POR COORDENADAS	Fecha	15/05/14
		Certificado	2

Nomenclatura de los resultados

C_c : corrección media, diferencia entre la media de las medidas obtenidas y el valor nominal.

U_{CMA} : incertidumbre expandida (K=2) para la medición con brazo de medir por coordenadas.

RMS: medida de dispersión similar a la desviación típica, que toma como referencia el valor nominal en lugar de la media aritmética de los resultados.

Los RESULTADOS obtenidos se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del procedimiento de calibración (corrección, incertidumbre y RMS).

Dimensional	C_c [mm]	U_{CMA} [μm]	RMS[mm]
Distancia entre esferas	0.0005	23.26	0.0239
Distancia entre esferas virtuales	0.0000	33.36	0.0284
Distancia entre planos	-0.0846	42.31	0.1586
Distancia entre cilindros exteriores	-0.0625	55.88	0.0789
Distancia cilindros interiores (almenas)	-0.0267	51.91	0.0601
Distancia entre cilindros interiores	-0.0345	63.08	0.0644
Diámetro esferas	-0.0110	6.50	0.0178
Diámetro esferas virtuales	0.0000	78.91	0.0683
Diámetro cilindros exteriores	-0.0691	36.61	0.0757
Diámetro cilindros interiores (almenas)	0.0507	18.85	0.0577
Diámetro cilindros interiores	0.0814	45.83	0.1001
Ángulo de conos exteriores	-0.050 °	0.052 °	0.073 °
Ángulo de conos interiores	-0.018 °	0.098 °	0.098 °
Ángulos entre planos	-0.021 °	0.008 °	0.042 °
Errores de forma	C_c [mm]	U_{CMA} [μm]	RMS[mm]
Esferas	0.0125	12.62	0.0184
Cilindros exteriores	0.0569	43.49	0.0757
Cilindros interiores	0.0329	24.42	0.0449
Conicidad exterior	0.0155	8.19	0.0176
Conicidad interior	0.0138	11.67	0.0174
Planitud	0.0055	7.26	0.0080
Tolerancias geométricas relacionadas	C_c [mm]	U_{CMA} [μm]	RMS[mm]
Paralelismo de planos	0.0105	9.24	0.0152
Perpendicularidad de planos	0.0100	5.89	0.0110
Coaxialidad en cilindros	0.0754	57.56	0.1105

Figura 12. Informe de calibración de un Brazo de Medir por Coordenadas.

Posteriormente se realizaron graficas de comparativas entre las distintas empresas (figura 13). Este tipo de graficas “globales” son sumamente interesantes y serán incorporadas a una o varias publicaciones de impacto en la próxima anualidad.

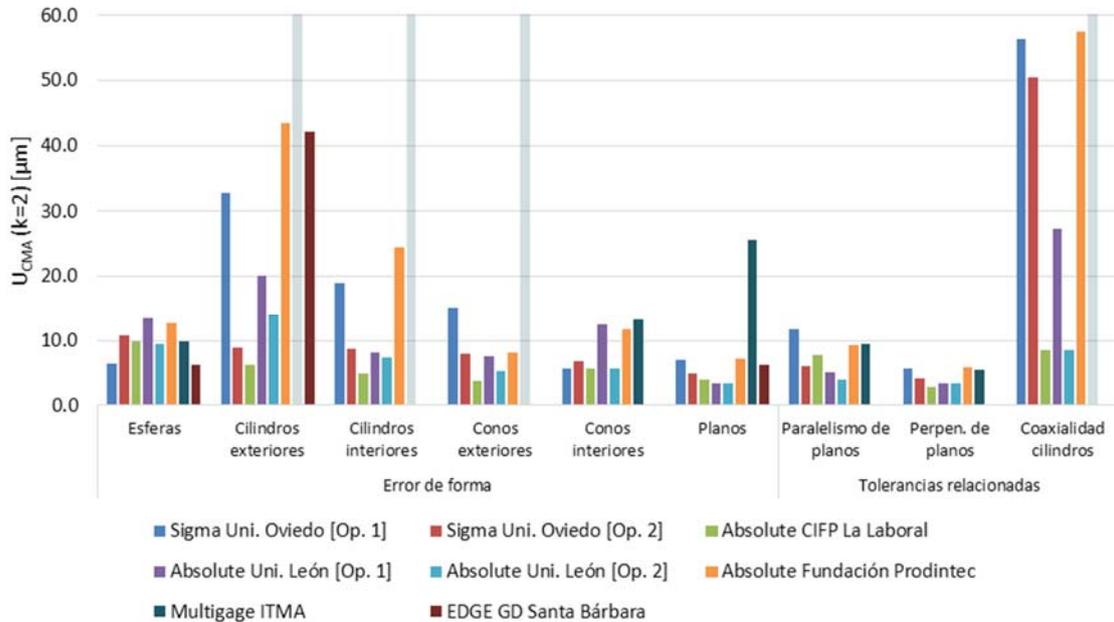


Figura 13. Comparativa entre todos los ensayos de campos realizados.

2.5 Trabajos o necesidades futuras

En esta línea de investigación se sigue necesitando la definición de un nuevo patrón de características orientado a la evaluación de equipos con laser de triangulación incorporados. Esto obliga a reconstruir el propio patrón, pues las superficies ópticamente idóneas no son las de buen acabado superficial, y a adaptar el propio procedimiento y sus incertidumbres asociadas al nuevo patrón. Afortunadamente, en la medición con laser la influencia del operario es mucho menor, por lo que no es necesario hacer ensayos de campo como los que se llevaron a cabo en este proyecto.

Desgraciadamente, las geometrías y los materiales de las características del patrón óptico no son fáciles ni baratas de obtener lo que implicará la realización de ensayos de mecanizado y pruebas ópticas para validación constantes. Esta nueva investigación será previsiblemente una línea específica que deberá ser explorada en el 2015 por el mismo grupo de investigación.

2.6 Divulgación de los resultados (publicaciones, artículos, ponencias...)

Como resultados y evidencias de ejecución de este proyecto de investigación pueden considerarse dos publicaciones muy relacionadas y en algunos casos ya aceptadas; en **revistas de máximo impacto** (JCR), como son:

- E. Cuesta, D. González-Madruga, B.J. Álvarez, J. Barreiro. *A new concept of feature-based gauge for Coordinate Measuring Arm evaluation*. Measurement Science and Technology, Vol. 25, 06004-13, 2014.
- D. González-Madruga, J. Barreiro, E. Cuesta, S. Martínez-Pellitero. *Influence of human factor in the AACMM performance: a new evaluation methodology*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. Vol.15 (7), 1283-1291, 2014.

Con respecto a **artículos indexados en ISI Wok y Congresos Internacionales**, pueden citarse:

- H. Patiño, D. González-Madruga, E. Cuesta, B.J. Álvarez, J. Barreiro, *Study of Virtual Features in the Performance of Coordinate Measuring Arms*, Procedia Engineering, Vol. 69, pp. 433-441. 2014.
- D. González-Madruga, J. Barreiro, E. Cuesta, B. González, S. Martínez-Pellitero, *AACMM Performance Test: Influence of Human Factor and Geometric Features*, Procedia Engineering, Vol. 69, pp. 442-448, 2014
- D. González-Madruga, E. Cuesta, H. Patiño Sánchez, J. Barreiro, S. Martínez-Pellitero, *The use of virtual circles gauge for a quick verification of Portable Measuring Arms*, Key Engineering Materials (Advances in Manufacturing Systems), Vol. 615, pp 70-75, 2014
- S. Martínez-Pellitero, E. Cuesta, J. Barreiro, H. Patiño, B.J. Alvarez, *Development of a KBE Model aimed at improving the accuracy with coordinate measuring arms*, Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014, 10-13 Sept 2014, Leiria Portugal, 183-186, 2014.

3. MEMORIA ECONÓMICA

Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-14-GIJÓN-1.	4.500 €			
Otras fuentes	Referencia proyecto/contrato				
Personal Becario	Nombre	HÉCTOR PATIÑO SÁNCHEZ			
	Tareas	<ul style="list-style-type: none"> - Confección del programa de calibración del BMC - Confección de las hojas de cálculo para el proceso de recogida de resultados y cálculo de incertidumbres - Programación de un programa de transferencia de resultados del software del BMC a las hojas de cálculo - Realización de ensayos de campo en las empresas colaboradoras - Análisis de resultados de medición - Confección de informes de calibración para cada ensayo de campo realizado 			
	Período	DEL 1 DE ABRIL AL 30 DE SEPTIEMBRE			

4. OTROS PROYECTOS O ACTIVIDADES FORMATIVAS CON FINANCIACIÓN EXTERNA

Título del proyecto	<i>“Aseguramiento de la medición y representación del conocimiento en la medición con sistemas portátiles de medir por Coordenadas”</i>
Referencia	DPI2012-36642-C02-01
Investigador/a/es principal/es	Eduardo Cuesta González
Equipo investigador	Braulio José Álvarez Álvarez. Daniel Álvarez Mántaras Pablo Luque Rodríguez Daniel González Madruga (Universidad de León) Joaquín Barreiro García. (Universidad de León) Susana Martínez Pellitero. (Universidad de León)
Periodo de vigencia	01-01-2013 al 31-12-2015
Entidad financiadora	Ministerio de Economía y Competitividad (M.E.C.)
Cantidad subvencionada	81.900 €