

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2017

MEMORIA DEL PROYECTO Nº SV-17-GIJON-1-14

1. DATOS DEL PROYECTO

Título: Evaluación metrológica de sensores Láser de Triangulación con patrón de características óptico

Investigador/a/es responsable/es: Braulio José Álvarez Álvarez, Eduardo Cuesta González.

Tfno: 985182443 - 985182136 **E-mail:** ecuesta@uniovi.es, braulio@uniovi.es

Otros investigadores: Agustín Castaño Rivero (Uniovi), Joaquín Barreiro García (Universidad de León), Susana Martínez Pellitero (Universidad de León), Pelayo Amantegui Fernández-Vega (becario Uniovi)

Empresas o instituciones colaboradoras: Ingeniería y Servicios de Medición Tridimensional, S.L (ISM3D), DSP Industrial, General Dynamics Santa Barbara Sistemas (GD BS)

2. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO

2.1 Resumen ejecutivo

El resumen ejecutivo del Proyecto debe ser una síntesis clara y concisa del trabajo realizado, describiendo brevemente los motivos que justifican su realización, los beneficiarios, los objetivos específicos y su grado de consecución, la metodología aplicada y los resultados obtenidos.

Extensión: unas 500-600 palabras (limitado a un máximo de 4000 caracteres, incluidos espacios).

El objetivo del proyecto de investigación era el desarrollo de un nuevo procedimiento de evaluación de sensores láser de triangulación montados en brazos de medir por Coordenadas. Este tipo de equipos son muy utilizados para aplicaciones de ingeniería inversa, donde la precisión del mismo quedaba en segundo lugar primando la portabilidad, la rapidez de captura y la alta densidad. La investigación pretende realizar una evaluación metrológica de este tipo de sensores, buscando obtener datos fiables, objetivos y trazables, sobre la precisión que este tipo de sensores son capaces de ofrecer. En concreto la evaluación se basa en estudiar el desenvolvimiento del equipo; esto es, la calidad de la nube de puntos capturada, en tareas de control dimensional y geométrico (GD&T).

Para ello se utiliza, además del sensor láser montado en un Brazo disponible (sensor GScan®, montado en brazo de medir Romer Sigma®), junto a un moderno patrón de características geométricas de tipo óptico (fig. 1). Tanto el concepto de patrón de características como el prototipo físico, fueron desarrollados (y patentados) dentro de investigaciones precedentes: un proyecto del plan Nacional (DPI2013-2015) y otro del IUTA (SV-16-GIJON-1-04); el primero dedicado a evaluación de Brazos de Medir por Coordenadas con patrón de características, y el segundo a evaluar equipos de fotogrametría por luz blanca estructurada.

Los usuarios finales de estos equipos de medida sin contacto, al igual que las empresas interesadas, están demandando métodos que permitan conocer cómo evaluar su rendimiento y fiabilidad. Ya en la memoria se mencionaban algunos de las razones que justificaban la investigación que se presenta, entre las que cabe comentar la inexistencia de normativa aceptada internacionalmente (aunque acaba de salir la ISO-10360-8:2017 para sensores laser en CMMs cartesianas, pero utiliza esferas patrón y el sensor midiendo verticalmente las mismas), y la variedad de materiales y acabados superficiales que se pueden considerar en el campo de la alta precisión por contacto y que no suelen ser aptos para sensores ópticos.

En este proyecto se pudieron comparar los resultados obtenidos en la cualificación de estos sensores de cortina láser (dispositivos de manejo manual), con los valores certificados de varias características geométricas de dicho patrón. La metodología partió de la identificación de las principales variables y factores de influencia gracias a unos ensayos previos que permitieron optimizar parámetros configurables del láser, determinar los mejores filtros, estrategias, etc. Posteriormente, se repitieron ensayos (12 repeticiones) para dotar de cierto análisis estadístico a los resultados obtenidos. Finalmente, utilizando un software de Ingeniería Inversa, se obtuvieron las entidades de mejor ajuste sobre las que fue posible “medir” sobre ellas. De esta forma, el resultado último no son solo los valores óptimos de los parámetros del sensor, las mejores estrategias de medición o el mejor método de reconstrucción y filtrado; sino que se obtienen finalmente valores fiables de la exactitud metrológica de los sensores láser montados en Brazos de Medir por Coordenadas.

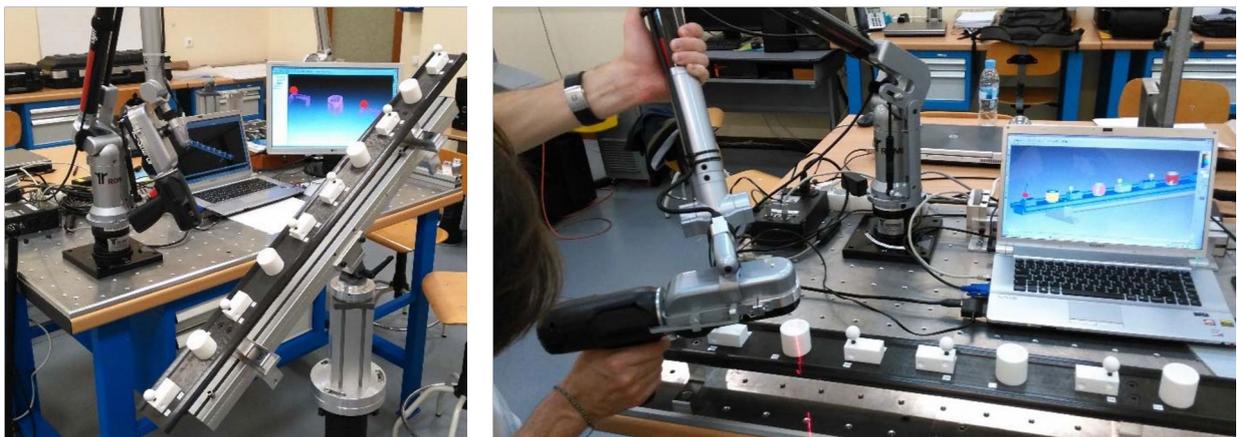


Fig. 1. Patrón de características óptico (elementos de referencia cerámicos) y detalle de un ensayo con láser de triangulación montado en Brazo de Medir por Coordenadas.

2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

El objetivo principal del proyecto es el desarrollo y validación de un nuevo método (procedimiento) de evaluación de equipos de medición por coordenadas con sensor de triangulación láser (Fig. 1). La evaluación se basa en utilizar un novedoso patrón de características de tipo óptico. Patrón que ya fue diseñado y materializado en proyectos precedentes (DPI2013-2015 e IUTA 2016). De hecho, ya ha sido utilizado para evaluar metrológicamente otro equipo de Ingeniería Inversa, un equipo de fotogrametría pro luz blanca estructurada; pero se necesita validarlo para el sensor laser del proyecto que se solicita.

Este procedimiento de verificación debe permitir asegurar la fiabilidad de las medidas realizadas de forma rápida y práctica, así como aportar información sobre las fuentes de error que afectan a sus mediciones. Como objetivos parciales, se consideran los siguientes:

- a) Desarrollar un procedimiento de verificación que partiendo del procedimiento general se adapte a equipos de medición por coordenadas dotados de un sensor de triangulación láser
- b) Definir condiciones, estrategias y consejos de uso del equipo de medición mencionado de cara a su uso por parte de los operarios y para su formación y entrenamiento.
- c) Obtener valores fiables de las medidas del sensor, en aplicaciones metroológicas, más allá de las típicas de Ingeniería Inversa.
- d) Indirectamente: asegurar, a partir de los resultados, que el patrón de características desarrollado es un elemento válido y adecuado para la verificación de estos equipos metroológicos en procesos de verificación y/o calibración.

Puede decirse que los objetivos iniciales se han cumplido prácticamente al 100%, pues tan solo falta la extensión del tercer objetivo, validando medidas con otros sensores o con sensores funcionando fuera de las condiciones controladas de los laboratorios de calibración.

2.3 Tareas realizadas

Las tareas realizadas se han visto retrasadas varios meses debido al retraso en el proceso de adjudicación del becario. Debe tenerse en cuenta que la convocatoria de ayudas económicas para el inicio a la investigación del IUTA se realizó durante el mes de septiembre (convocatoria de fecha 16 de agosto de 2017). Por lo que el becario se incorporó a finales del mismo mes, realizando el trabajo desde ese mes de septiembre hasta a diciembre del 2017.

Actividad programada	Grado de cumplimiento (comentarios)
1- Actualización del conocimiento	
Estudio y síntesis de la tecnología	100 % (septiembre-octubre 2017)
Estudio de la normativa aplicable	100 % (septiembre-octubre 2017)
2- Análisis de factores de influencia en metrología óptica	
Estudio de factores de influencia específicos en el escaneado con sensor de triangulación láser	100 % (octubre 2017)
3- Diseño de ensayos preliminares	
Análisis de los posibles métodos para minimizar errores de medida y para implementar acciones correctoras mediante la definición de reglas, estrategias, guías de buen uso, etc. (Abril-Mayo).	100 % (octubre 2107)
Diseño de los ensayos	100 % (octubre 2017)
Ejecución de los ensayos preliminares	100 % (noviembre 2017)
4- Análisis de resultados y definición del procedimiento final a seguir en el proceso de cualificación o verificación de los equipos	
Elaboración de la metodología de verificación y cualificación de los sensores ópticos	100 % (noviembre 2017)
Análisis de datos	100 % (noviembre - diciembre 2017)
Estudio estadístico Anova	90 % (diciembre 2017)
5- Ensayos de aceptación in situ	0 % (solo se realizaron ensayos de laboratorio, aunque estos de sustituyeron por análisis de repetibilidad muy completo, 12 ens. lab.)
6- Conclusiones	50 % (teniendo en cuenta que son

	conclusiones de ensayos de laboratorio, faltarían ensayos "in-situ", y de otras marcas de sensores)
7- Divulgación	10 % (se ha elaborado informe con formato muy similar a un artículo internacional para posterior divulgación. Previsiblemente 1er semestre 2018)

En la fig. 2, puede verse un diagrama con la Metodología desarrollada para la experimentación.

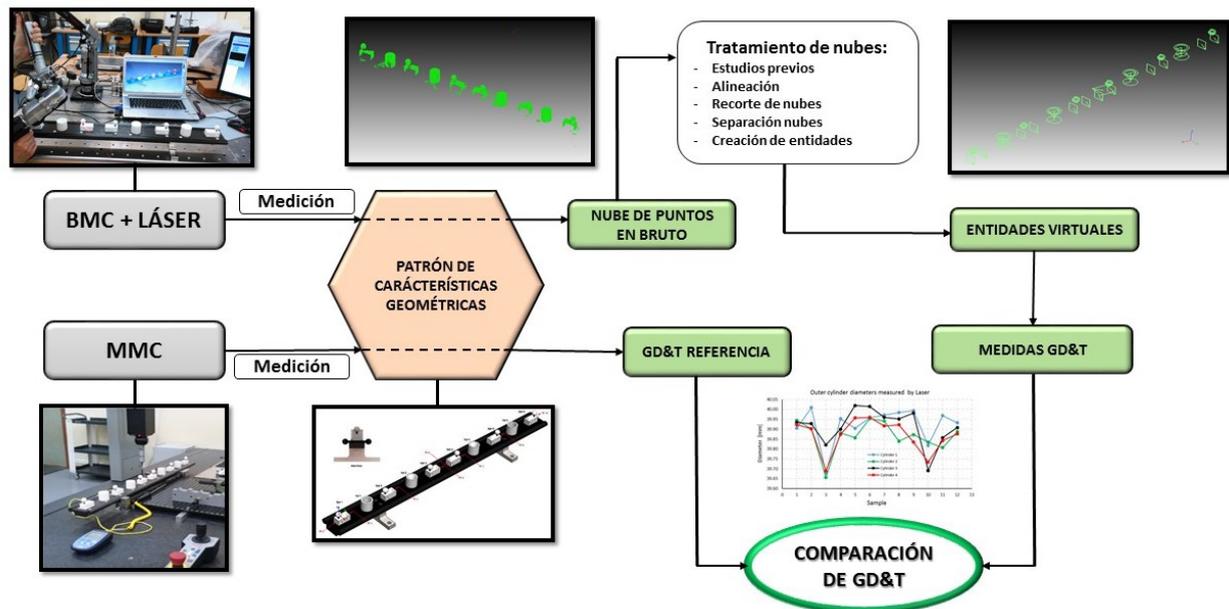


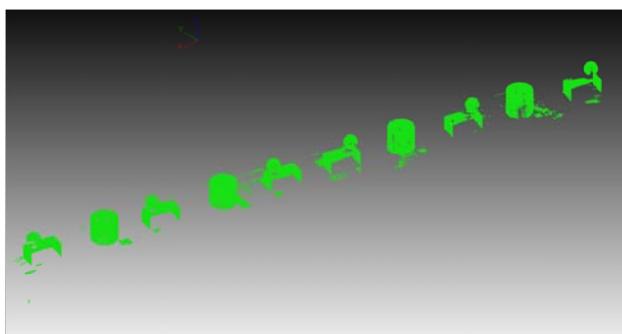
Fig. 2. Metodología para la Experimentación

De forma muy resumida la evaluación (fig. 2) se basa en medir una serie de características sobre el patrón. Características que son medidas primeramente con una Máquina de Medir por Coordenadas, obteniendo valores de referencia. Estas características permiten a su vez definir unas tolerancias evaluables, clasificables según grupos: Dimensiones de elementos (diámetros), Distancias, Errores de forma y tolerancias relacionadas o Combinadas:

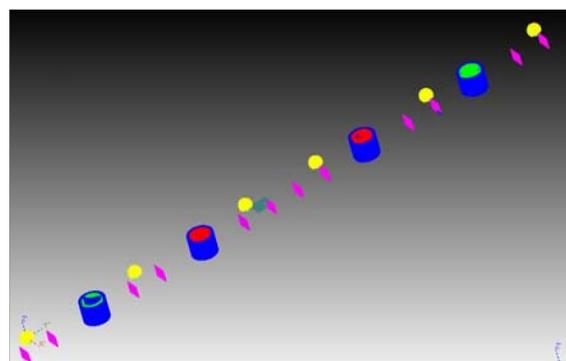
Tipo de evaluación	Evaluación/Entidad	Descripción
DIMENSIONAL	Esferas	6 Diámetro de esferas ($\square 20$ mm)
	Cil. Externos	4 Diámetros de cilindros externos ($\square 40$ mm)
	Cil. Internos	2 Diámetro cilindros internos ($\square 30$ mm)
	Conos internos	2 Ángulos de conos internos (48° mm)
DISTANCIAS	Esferas	5 distancias entre centros de esferas: de Esfera 1 a Esfera 2,3,4,5 y 6 [$200 \square 950$ mm]

	Planos	7 distancias: 6 del Plano 0 a planos 1,3,5,7,9 y 11 y una distancia del plano 5 al 6, [50 □ 990 mm]
	Cilindros externos	3 distancias: de Cil.Ext 1 a Cilindros externos 2, 3 y 4 [200 □ 700 mm]
	Cilindros internos	Cil. Interno 1 – Cil. Interno 4, [700 mm]
ERRORES DE FORMA	Esferas	Esfericidad
	Planos	Planitud (7 planos distintos)
	Cilindros externos	Cilindricidad (4 cilindros ext.)
	Cilindros internos	Cilindricidad (2 cilindros int.)
	Conos	Conicidad (2 conos int.)
COMBINADAS	Perpendicularidad	Planos adyacentes (plano vertical 5 y planos horizontal 4-5)
	Paralelismo	7 paralelismos (Plano 0 – planos X y planos 5-6)
	Coaxialidad	2 coaxialidades, Cilindro 1 y cilindro 4

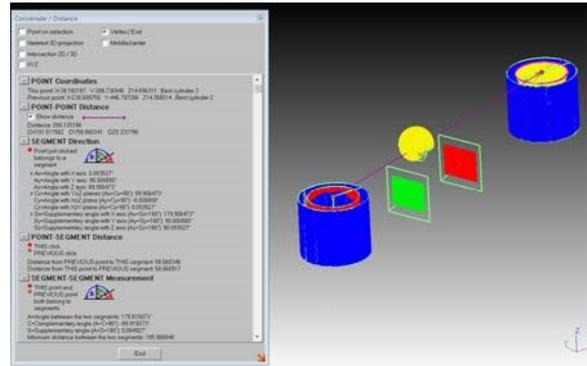
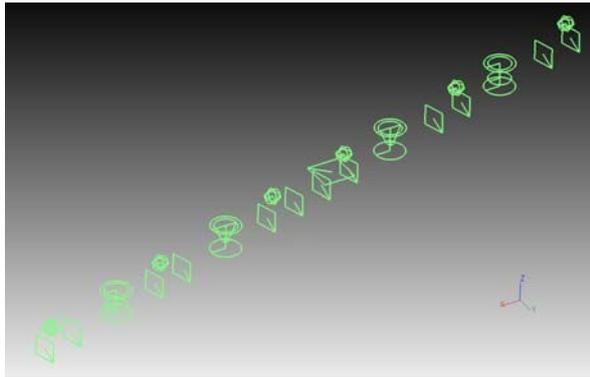
Con la intención de introducir en el estudio la influencia del operario en un instrumento metrológico de uso manual, se realizaron 12 ensayos, midiendo todas las entidades “evaluables” del patrón. En la fig.3 puede observarse un detalle del tipo de actividades que se han tenido que realizar para cada tipo de evaluación de las mencionadas en la tabla precedente. Para cada una de estas evaluaciones (fig.3a) se realizaron procedimientos de limpieza, filtro y recorte (fig. 3b y c) con objeto no solo de limpiar las nubes de puntos, eliminando puntos falsos o espúreos (típicos de los bordes), sino también de hacer similar la densidad tomada en las entidades entre los 12 ensayos y sobre todo de emular la zona palpada con la CMM por contacto, igualándola también al área del Scanning. Finalmente, con las nubes limpias, filtradas e igualadas (fig.3b), se construyeron las entidades de mejor ajuste gaussiano (fig.3d), y sobre ellas se midieron las dimensiones, distancias, errores de forma, etc. Para estas actividades se utilizó un software disponible de Ingeniería Inversa (3DReshaper®, de Technodigit, Hexagon)



a)



b)

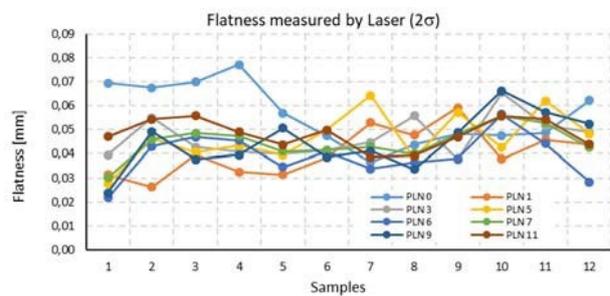
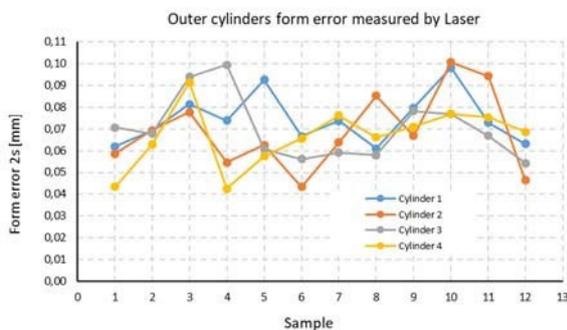
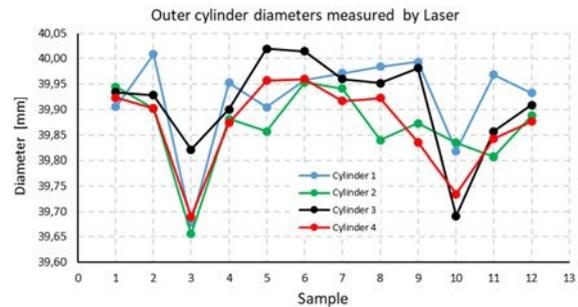
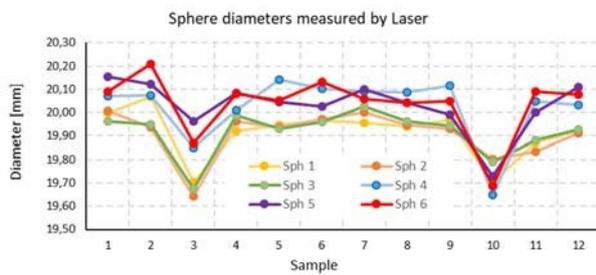


c)

d)

Fig. 3. Capturas de pantalla con varias fases del proceso: a) nube digitalizada en bruto, b) nubes separadas y filtradas (redimensionadas) c) creación de entidades virtuales a partir de dichas nubes separadas d) mediciones sobre las entidades virtuales (3DReshaper)

A modo de evidencias de ejecución del amplio trabajo realizado, y sin ánimo de mostrar todas las gráficas, se adjuntan seguidamente algunos de los resultados de la experimentación. En la fig. 4 pueden verse varios ejemplos de los valores obtenidos para los 12 ensayos diferentes ejecutados sobre el patrón evaluando diámetros de esfera, de cilindros, distancias, errores de forma, etc. Aunque el estudio es mucho más amplio, a modo de ejemplo se adjuntan solo algunos tipos de evaluación, dentro de la amplia gama de tol. Dimensionales y geométricas disponibles en el patrón (GD&T).



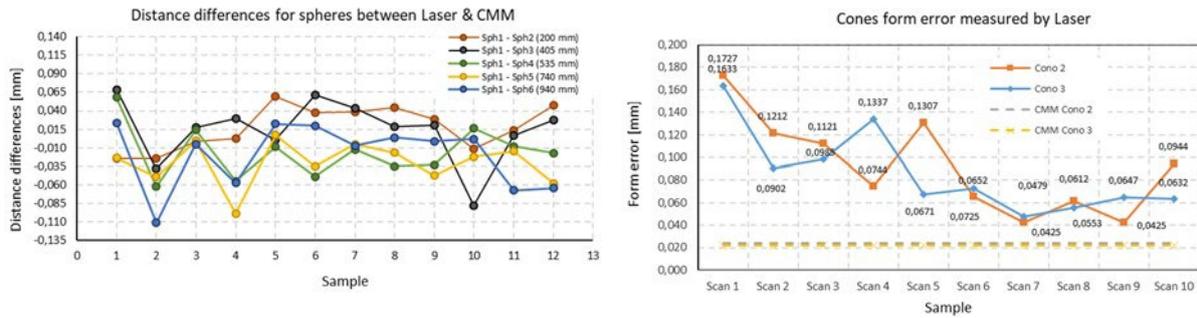


Fig. 4. Gráficas con inclusión de los valores de los 12 ensayos en distintas evaluaciones

Además de las gráficas de los ensayos, mostrando valores medios aportados por los 12 ensayos para análisis de repetibilidad, en todas las evaluaciones mencionadas se realizaron tablas y graficas de comparativa entre el valor medio dado por el láser, y los valores de referencia de la CMM. Estas tablas de diferencias son muy representativas del tipo de evaluación realizada (fig. 5), y en ellas se muestra, para cada tipo de entidad, cuanto se aleja el equipo laser de las medidas de la CMM, así como la variabilidad que añaden los 12 ensayos para cada entidad (barras de error de la fig.5)

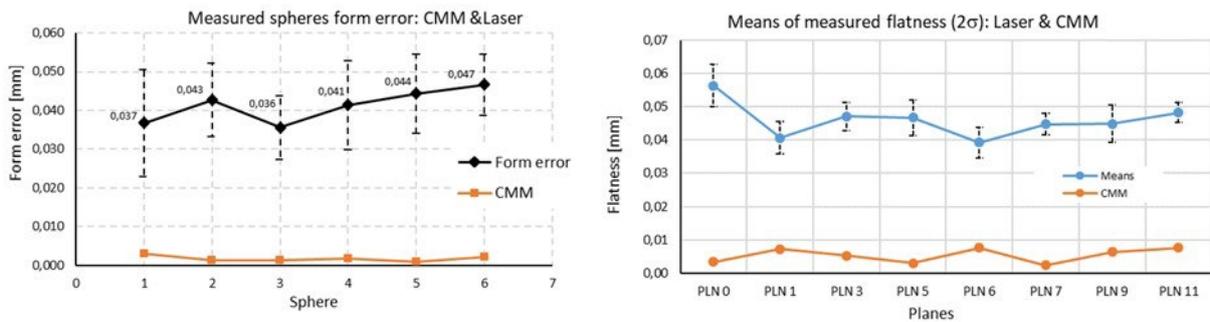


Fig. 5. Dos ejemplos de gráficas comparativas de valores medios entre laser y valor de referencia (CMM). Las barras de error son (2σ) , dos veces las desviaciones típicas dadas por la estadística que aportan los 12 ensayos.

Finalmente, y a modo de resumen global se muestra la tabla adjunta (fig. 6) con todos los tipos de evaluaciones realizadas. En ella se muestra el valor medio de la diferencia entre laser y CMM considerando todas las evaluaciones; e incorporando ahora como barra de error, el valor de la media de las desviaciones típicas (en las gráficas se representa 2 veces la desviación típica, 2σ) que aporta el estudio de los 12 ensayos distintos.

Tipo de evaluación	Evaluación / Entidad Controlada	Media de las diferencias con MMC $\bar{x} \pm \Delta$ [mm]	Std. Dev. 2σ [mm]
DIMENSIONAL	Diámetro de esferas ($\square 20$ mm)	0.0548	0.0838
	Diámetro de cilindros externos ($\square 40$ mm)	0.1166	0.0870
	Diámetro cilindros internos ($\square 30$ mm)	0.1074	0.0523
	Ángulo de conos (48°)	0.4509 °	0.3432 °

DISTANCIAS	Entre centros de Esferas (Esfera 1 – Esfera X),	0.0315	0.0359
	Entre Planos (Plano 0 – pto. de Plano X)	0.1263	0.0862
	Entre Cilindros externos (Cil. 1 – Cil. X)	0.0294	0.036
	Entre Cilindros internos (Cil. 1 – Cil. 4)	0.0603	0.0717
ERRORES DE FORMA	Esferas	0.0825	0.0101
	Planos	0.0405	0.0093
	Cilindros externos	0.0699	0.0145
	Cilindros internos	0.1116	0.0268
	Conos	0.1492	0.1293
COMBINADAS / RELACIONADAS	Perpendicularidad	0.0451	0.0409
	Paralelismo	0.0287	0.0370
	Coaxialidad	0.0389	0.0288

2.4 Resultados obtenidos

Se ha conseguido el objetivo fundamental esperado en el presente proyecto, que era conseguir una metodología (Fig. 2) funcional para realizar de forma fiable una verificación de la medida dimensional que se puede llegar a obtener con sensores láser 3D de triangulación acoplados a brazos de medir portátiles (AACMM), Debe tenerse en cuenta que estos sensores obtienen nubes muy densas de puntos sobre las superficies a digitalizar (escanear), pero no garantizan la calidad de esas nubes en cuanto a la bondad de ajuste a dichas superficies. Con el proyecto no sólo se ha desarrollado la metodología, sino que ésta fue llevada a cabo con un alto grado de cumplimiento, realizando un análisis estadístico y

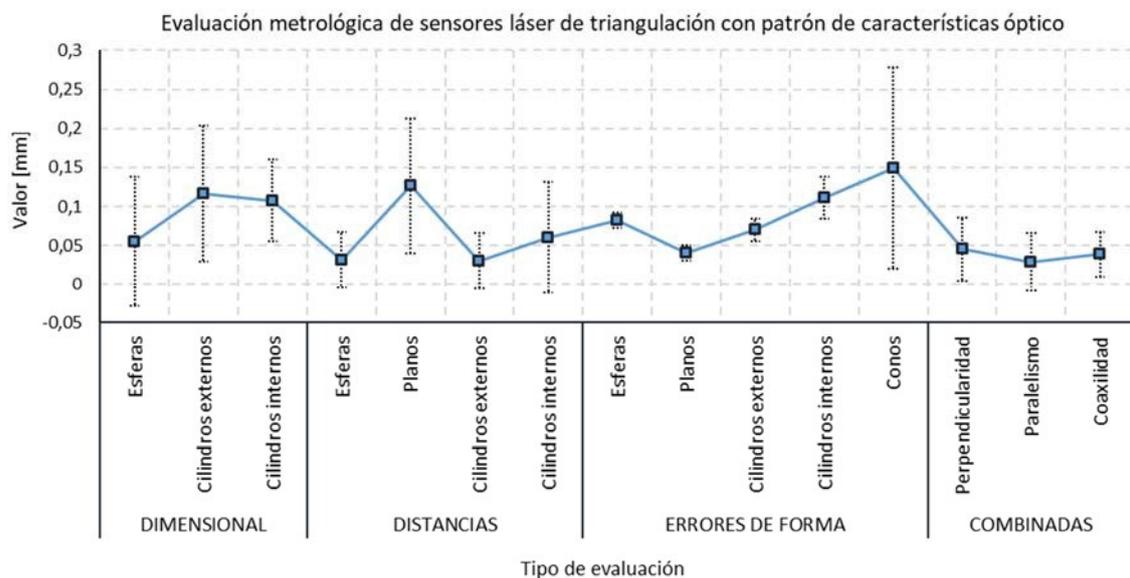


Fig. 6. Comparativa Global CMM vs. Sensor Laser para distintas entidades

permitiendo finalmente asignar valores fiables (prácticamente trazables) a la comparativa prediseñada. Dicho de otra forma, se ha cumplido el objetivo principal de desarrollar, ensayar y validar un procedimiento de cualificación de estos equipos que obtiene valores fiables de su desempeño, no como equipo de ingeniería inversa, sino como equipo de medición. Y todo ello sin requerir su envío al fabricante para realizar un proceso de calibración externo.

El proyecto también ha generado un conocimiento muy válido sobre las variables de influencia en la medida con estos sensores ópticos, permitiendo incluso proponer estrategias y parámetros óptimos de escaneado de alta calidad, de aplicación tanto científica como industrial.

Finalmente comentar que el proyecto ha obtenido transversalmente otros resultados que, siendo secundarios, no dejan de tener importancia, como son:

- Formación del becario en equipos y técnicas de metrología por coordenadas e Ingeniería Inversa. Adquiriendo valiosos conocimientos sobre patrones dimensionales por características, sobre técnicas de ingeniería inversa con láser de triangulación y brazos portátiles de medir por coordenadas.
- Formación en actividades de Investigación del becario, incluyendo redacción de informe científico-técnico similar a un artículo internacional (con estudio del estado del arte, desarrollo y explicación de la metodología, análisis de referencias, análisis de resultados y conclusiones, etc.). Esta formación en metodología de investigación y en la forma de abordar proyectos de I+D, puede y debería ser considerado siempre un logro importantísimo en las actividades de los proyectos del IUTA. Las actividades de formación, aunque sean transversal a la investigación concreta; serían complicadas de impartir de otra forma.

2.5 Trabajos o necesidades futuras

- Realizar estudios "in-situ", repitiendo los ensayos, pero ahora con los equipos de las empresas interesadas, p.e. Esta tarea, que estaba prevista en la memoria inicial, hubiese permitido realizar transferencia tecnológica del grupo de investigación hacia las empresas, de forma que éstas recibiesen formación y documentación para el uso óptimo de estos aparatos. La idea es que las empresas interesadas dispusieran de un procedimiento de calibración/certificación para equipos y métodos de medida 3D ópticos altamente novedosos y en clara expansión.
- Ampliar ensayos con equipos más modernos. El propio fabricante (el modelo Romer es de la compañía Hexagon Metrology) dispone actualmente de una nueva gama de brazos de medir, con estructura completa de fibra de carbono, encoders absolutos, etc. Junto a este nuevo modelo, también se ha renovado completamente el sensor laser, que ahora viene integrado como un 7º eje. Por supuesto la nueva gama de sensores laser también tiene más densidad de captura de puntos, capacidad de autoenfoco de la intensidad del láser, distintas distancias focales y otras funcionalidades que pueden hacer que, aunque la metodología sea totalmente válida, obviamente los valores que se obtengan (como valor límites del equipo) sean muy inferiores.
- Ampliar ensayos con equipos laser de otros fabricantes. Por la misma razón, la aplicación de la metodología desarrollada puede permitir contrastar otros equipos laser

montados sobre brazos de medir, como lo modelos de Zeiss, Mikon, etc. permitiendo profundizar aún más en lo límites tecnológicos de esta tecnología. De hecho, en los objetivos iniciales de la propuesta estaba, finalmente, la de realizar ensayos in-situ en las instalaciones de las empresas colaboradoras con el fin de validar el procedimiento de evaluación desarrollado. Esto no ha sido posible debido a la falta de tiempo efectivo final para la investigación (desarrollada entre el 10 y el 12 del 2017)

- Un estudio completo, como aplicación directa de la metodología de evaluación expuesta (y desarrollada en los 2 últimos proyectos de investigación del IUTA, convocatorias 2016 y 2017), para evaluación de equipos de Ingeniería inversa sin contacto, con patrón de características de tipo óptico puede sin duda dar lugar a una tesis doctoral en este campo. La tesis podría incluso contemplar una gama de tecnologías y sensores 3D muy relevante de cara a validar este procedimiento con propuesta de Norma, solicitud de Patente, etc.

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

La cantidad y calidad de los resultados pueden ser sin duda publicables al menos en congresos internacionales y en revistas de impacto (indexadas en JCR, SCR, Scopus o similar). De hecho, y a pesar de que se ha terminado la actividad en este mismo mes, se está trabajando actualmente en una versión “publicable”. Esta versión está muy avanzada. Casi todas las gráficas, tanto las de distintos tipos de evaluación como las que aportan información sobre la variabilidad del equipo con 12 ensayos están formateadas y preparadas para incorporarse a un artículo en revista de impacto. Se ha elaborado un estado del arte completo, con inclusión de referencias bibliográficas, una metodología, apartado de resultados, etc.

En relación directa con este trabajo, se puede citar una publicación derivada del proyecto del IUTA en la convocatoria del 2016, que ha salido publicada este mismo año, en el **7th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2017)**, celebrado en Vigo, del 28 al 30 de junio del 2017. En este trabajo se evaluaba un equipo de características similares, escáner 3D pero de fotogrametría por luz blanca estructurada, siguiendo un metodología y tipo de ensayos muy similar, basado en el mismo patrón de características de tipo óptico.

La publicación que se derivó de este congreso, fue publicada en la revista **Procedia Manufacturing de la editorial Elsevier**.

- E. Cuesta, J. M. Suárez, S. Martínez-Pellitero, J. Barreiro, B. J. Álvarez, P. Zapico, Metrological evaluation of Structured Light 3D scanning system with an optical feature-based gauge, *Procedia Manufacturing* (ISSN: 2351-9789), Vol. 13, 526-533,. (2017), (DOI): 10.1016/j.promfg.2017.09.078

A lo largo del 2018, previsiblemente en el 1er trimestre, se enviará una versión acabada del presente trabajo para su publicación en revista de impacto.

3. MEMORIA ECONÓMICA

Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-17-GIJÓN-1.	4500	0	0	0

Otras fuentes	DPI2012-36642-02-01 INESPO_PRO-GULEM-005	0	3000 (Coste aprox. del patrón, con calibración interna)	150 (pegamento)	0
Estudiante con ayuda a la investigación	Nombre	Pelayo Amantegui Fernández-Vega			
	Tareas	Colaboración en todas las fases del proyecto			
	Período	Septiembre a diciembre 2107			

4. OTROS PROYECTOS Y CONTRATOS CON FINANCIACIÓN EXTERNA

Nota: Para la investigación actual se han utilizado equipos y conocimiento provenientes de proyectos anteriores, se citan a continuación también a modo de reconocimiento:

Título del proyecto/contrato	Aseguramiento de la calidad y representación del conocimiento en la medición con sistemas portátiles de medir por coordenadas
Referencia	DPI 2012-36642-C02-01
Investigador/a/es principal/es	Eduardo Cuesta Gonzalez
Equipo investigador	Braulio José Alvarez Alvarez, Pablo Luque Rodriguez, Daniel Alvarez Mantaras, Vicente Castro Sanchez, Daniel Gonzalez Madruga, Joaquin Barreiro Garcia, Ana Isabel Fernandez Abia, Susana Martinez Pellitero. Agustin Castaño Rivero.
Periodo de vigencia	Duración, desde: 01-01-2013 hasta: 31-12-2015
Entidad financiadora	M.E.C.- DGICyT (Dirección General de Investigación Científica y Técnica)
Cantidad subvencionada	81.900 € (una parte de la anualidad del 2015 permitió construir una versión básica del patrón de características óptico utilizado. Para la investigación actual fue calibrado internamente, CMM Global Image©)

Título del proyecto/contrato	Patrón modular de amplio rango con materiales avanzados para calibración de equipos de metrología por coordenadas
Referencia	INESPO_PRO-FGULEM-005
Investigador/a/es principal/es	Joaquín Barreiro Garcia (Univ. Leon)
Equipo investigador	Braulio José Alvarez Alvarez, Daniel Gonzalez Madruga, Susana Martínez Pellitero, Eduardo Cuesta Gonzalez.

Periodo de vigencia	Desde: 03-04-2014 hasta: 31-01-2015
Entidad financiadora	Universidad de León y Fundación General Universidad Empresa de León (FGULEM) Unión Europea - Fondos Feder. INESPO II.
Cantidad subvencionada	3.500 € (una parte de esta cantidad permitió adquirir alguna de las características del patrón óptico)

Título del proyecto/contrato	
Referencia	
Investigador/a/es principal/es	
Equipo investigador	
Periodo de vigencia	
Entidad financiadora	
Cantidad subvencionada	