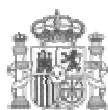


Publicación núm. 222

APLICACIÓN DE LÁSER ESCÁNER ACOPLADO A BRAZOS DE MEDICIÓN PARA LA INSPECCIÓN E INGENIERÍA INVERSA

POR

**E. HAIMOV
E. MOLINELLI
E. CARRILLO**



**Ministerio
de Defensa**

**MADRID
OCTUBRE 2013**

APLICACIÓN DE LÁSER ESCÁNER ACOPLADO A BRAZOS DE MEDICIÓN PARA LA INSPECCIÓN E INGENIERÍA INVERSA

POR

**E. HAIMOV
E. MOLINELLI
E. CARRILLO**

Presentado en el 52º Congreso de Ingeniería Naval, Asociación de Ingenieros Navales de España

Octubre 2013

Aplicación de láser escáner acoplado a brazos de medición para la inspección e ingeniería inversa

por

Haimov, H. - Molinelli Fernández, E. - Carrillo Hontoria, E.

Trabajo presentado al 52º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima, Madrid, 23-25 octubre
2013

Aplicación de láser escáner acoplado a brazos de medición para la inspección e ingeniería inversa

Haimov, H. - Molinelli Fernández, E. - Carrillo Hontoria, E.

Resumen

Las tecnologías de medición se encuentran en continuo desarrollo, aumentando sus precisiones y disminuyendo sus costes.

Los procedimientos, basados en mesas tridimensionales o láseres escáner de gran volumen presentan los problemas de requerir infraestructura elevada, su no portabilidad y altos costes inasumibles hoy en día dado los escasos recursos.

El Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) se incorpora a la vanguardia en los sistemas de medición mediante el uso de un brazo de medición portátil con palpadores y láser escáner de volumen medio/reducido.

La selección de este sistema de medición permite su uso en cualquier lugar, pudiendo dar con ello apoyos a las Reales Federaciones de Vela (RFEV) y Piragüismo (RFEP) en su trabajo diario de preparación y selección de embarcaciones, así como le ha permitido al CEHIPAR desarrollar un novedoso procedimiento de control dimensional e ingeniería inversa en la construcción de modelos de hélices con destino el estudio de la cavitación con tolerancias muy inferiores a las habituales.

El presente trabajo recoge el procedimiento desarrollado para el control dimensional de hélices, posteriormente adaptado a modelos de carenas y apéndices, a la vez que la potencialidad de los mismos para poder suministrar a los clientes la información requerida de sus encargos de fabricación o de ingeniería inversa.

Abstract

The Measurement technologies are in continuous development, increasing their accuracy and diminishing the costs.

Procedures based in CMM (Coordinate Measuring Machine) or scanner laser of big dimensions, have difficulties related with the complex infrastructure needed, to this inconvenience can be added the non portability and high cost.

With the acquisition of a Portable Measurement Arm with probes and laser scanner in the medium/reduced range the El Pardo Model Basin (CEHIPAR) is positioned into the forefront of the measurement technologies.

The selection of this system allows the use of the equipment everywhere, including services to the Sailing and Canoeing Federations (RFEV and RFEP) in its daily work of training and selection of boats. This methodology has also allowed to CEHIPAR to develop a detailed inspection control and reverse engineering procedures for model propellers, being this especially important for the cavitation studies.

This paper presents the adopted procedure for the propeller geometric accuracy control, later to be adapted to hulls and appendages. A direct application of the procedure consists in the control of model manufacturing accuracy, information also required by the customers.

Introducción

El CEHIPAR, siendo un centro de investigación y proyectos hidrodinámicos, experimenta con modelos físicos a escala de buques, propulsores y otros artefactos oceánicos por lo que necesita reproducir fielmente sus geometrías ya que los parámetros estudiados, como las fuerzas, la cavitación etc. son sensibles a ellas y sus posibles desviaciones pueden afectar seriamente el producto final.

El problema de la precisión de reproducción de la geometría de la carena, apéndices y del propulsor sobre su comportamiento y características en condiciones de explotación ha sido objeto de debates que no han terminado en varios aspectos. No siendo este tema objetivo del artículo nos limitaremos de mencionar que la Organización Internacional de los Canales de Experimentación (ITTC) ha elaborado recomendaciones para la precisión de fabricación de los modelos - Ref. [1] [2] que afectan no solo las superficies, sino también a los derivados parámetros geométricos de diseño. El comportamiento hidrodinámico y muy especialmente la cavitación de las hélices, son sensibles a pequeñas variaciones de su geometría por lo que la precisión de fabricación exigida es bastante alta. Por ejemplo, las tolerancias para la reproducción de las superficies de las palas de hélices está por debajo de $\pm 0,05$ mm para modelos de 180 a 300 mm de diámetro. A esto se añade la compleja geometría de las palas actuales y el hecho que las zonas que tienen más influencia sobre sus características presentan más dificultad para la medición.

El presente artículo trata un método de escaneado y procedimiento de inspección o ingeniería inversa de modelos a escala de hélices navales que se usan en la experimentación hidrodinámica recientemente implementados en el CEHIPAR. La comprobación de la precisión de fabricación se basa sobre la comparación de los datos geométricos medidos con los del modelo CAD que contiene las superficies exigidas de las palas. Es un primer paso que permitirá a continuación ampliar otro procedimiento para analizar la repercusión de las desviaciones de las superficies escaneadas sobre los distintos parámetros geométricos de las palas Ref [1] de interés para los proyectistas.

El centro dispone de medios modernos para la fabricación de los modelos que a partir de un modelo CAD de la geometría cuidadosamente elaborada y fresas de control numérico (FCN) con control simultáneo de varios movimientos se consigue una alta precisión del producto final. Sin embargo, posibles errores humanos, en los datos iniciales, en el proceso de acabado, deformación en el proceso de experimentación o la falta de una descripción completa obligan no solo a mantener procedimientos de inspección y/o reproducción de la geometría (ingeniería inversa), sino además de ponerla a su altura. Las técnicas de medición, habitualmente mecánicas u ópticas, en muchos casos 2D, resultaron obsoletas en comparación con la calidad ofrecida por las FCN por lo que a finales del siglo pasado se empezaron a introducir técnicas ópticas 3D para la digitalización de las superficies inspeccionadas. Las máquinas de medida de coordenadas (MMC) 3D convencionales, de amplia aplicación para los modelos de hélices, funcionan bien en zonas de poca curvatura y sin embargo, las zonas de mayor importancia para las hélices tienen curvatura considerable por lo que las técnicas avanzadas actuales evitan en buena medida este problema. El CEHIPAR desde varias décadas dispone de una máquina MMC convencional K&R D-25 para la medición de hélices de hasta 300 mm de diámetro con tres ejes de libertad (rotación, ejes longitudinal y radial). Tiene graduaciones de 0,01 mm y 0,01 grados e incorpora un comparador para ajustar la posición de medida con poca superficie de contacto.

No se han encontrado abundantes referencias de aplicación de técnicas avanzadas de medición en este campo. Las referencias [3] y [4] tratan aplicaciones del método de fotogrametría y la referencia [5] la técnica de escaneado con láser.

Aplicaciones

Entre todas las aplicaciones posibles de los sistemas de medición, las que más se ajustan a las necesidades del CEHIPAR son las siguientes:

1. Inspección / Validación

Tanto la inspección como la validación de los productos fabricados son una parte integral del proceso global desde la creación del CAD hasta la realización del informe de ensayos. Llevar a cabo el análisis de precisión en la fabricación de componentes permite poder demostrar empíricamente al cliente los rangos de precisión y por otro lado disponer de un control interno de los errores de fabricación y la posibilidad de analizar las partes del proceso que necesitan mejorar. Este proceso, una vez desarrollado y probado debe convertirse en una instrucción de calidad.

La base de la inspección es la comprobación de ciertas medidas y la obtención de posibles desviaciones. Para la validación se toma como referencia la geometría de diseño ya sea en forma de superficies o puntos concretos.

2. Ingeniería Inversa

Es el proceso de obtener información para reproducir la geometría de un objeto físico a través de la medición y las técnicas de creación de ésta mediante herramientas CAD a partir de las mediciones. En el CEHIPAR esta situación aparece en escasas ocasiones, por ejemplo en las que un cliente envía un propulsor (o carena) del que no dispone de una geometría CAD y hay que generarla para reconstrucción, fabricación de un modelo igual (o simétrico) o el estudio numérico mediante CFD. La generación de superficies debe hacerse de modo que sean manejables para posibles modificaciones con el objetivo de optimización.

3. Reproducciones (Copia / Escalado)

Un caso particular de la ingeniería inversa es la necesidad de obtener información de la geometría de un objeto, sin la necesidad de desarrollar completamente el modelo CAD (archivos STL) o la de duplicar una geometría para la reconstrucción o el análisis a escala distinta.

Requisitos sistema de escaneado

Existen en el mercado gran variedad de tecnologías que permiten acometer trabajos como los mencionados en el apartado anterior. Posiblemente la primera en la que se emplea un ordenador es la desarrollada por el MIT en los años 80, llamada HMI (Hull Machine Interface) basada en una bobina con un hilo que marca un punto determinado y se obtienen las coordenadas (2D) conociendo las vueltas de la bobina y el ángulo del hilo respecto a la horizontal. En la actualidad la tecnología empujada para la medición 3D ha evolucionado y se pueden encontrar métodos basados en fotogrametría, sistemas de medición de coordenadas (brazos articulados, mesas tridimensionales) y diversos tipos de láseres escáner.

La elección del sistema más adecuada dependerá del grado de cumplimiento de una serie de requisitos técnicos que hagan factible su uso para las posibles acciones planificadas e incluso acciones futuras:

- Repetitividad: obtención de los mismos valores en diferentes sesiones de medición
- Reproducibilidad: obtención de los mismos resultados independientemente del usuario
- Fiabilidad: capacidad de funcionamiento con las mismas prestaciones en distintas situaciones (exterior, interior, rangos de temperatura, altitud, etc.)
- Precisión: debe satisfacer los requisitos de precisión exigidos para cada trabajo según los rangos establecidos por los criterios a los que estén sometidas las diferentes piezas.

Además de las mencionadas características requeridas para los equipos de medición se añaden otras que requiere el CEHIPAR para cumplir con sus necesidades de medición con costes consistentes con la aplicación:

- Flexibilidad: capacidad de medición de diferentes piezas independientemente del tamaño o del acabado superficial (modelos, apéndices, hélices, etc.)
- Portabilidad: facilidad de transportar el equipo a diferentes escenarios
- Manejo: facilidad de uso con mínima formación
- Coste: el coste del equipo debe poder amortizarse en un periodo razonable
- Mantenimiento/Servicio: como todos los equipos de metrología deben calibrarse periódicamente, el suministrador del equipo debe poder dar este servicio así como el de mantenimiento y resolución de problemas.

Después de un proceso de análisis se seleccionó como herramienta de medición multipropósito de alta precisión un brazo articulado de medición de coordenadas 3D, al que posteriormente se amplió añadiendo un cabezal láser escáner.

Brazo de Medición con láser escáner

El brazo de medición con láser escáner es una herramienta no intrusiva de medición 3D de gran precisión, corresponde con la evolución de la versión de 5 grados de libertad que disponía de un palpador en el extremo. Esta nueva versión incluye un cabezal que, además de un palpador intercambiable, tiene un láser escáner incorporado consiguiendo 7 grados de libertad. El brazo tiene una capacidad de extensión de 3,5 m desde su base. El palpador puede ser de diferentes diámetros, desde un palpador de punta hasta 15 mm de diámetro permitiendo tomar puntos adaptándose fácilmente a la superficie del objeto.

El certificado de calibración actual del brazo especifica una repetitividad en la medición de un punto de 0,0451 mm y una precisión en la medición de distancias de 0,0557 mm, el error máximo en medición volumétrica es de 0,0432 mm (medición con diferentes posiciones del brazo), datos para el palpador y experimento realizado sobre una barra de calibración certificada. Para el láser, la calibración se hace sobre una esfera de calibración certificada de 25,4 mm de diámetro, obteniendo una desviación máxima en el diámetro de 0,0242 mm.

Las principales características del brazo con escáner y una imagen se pueden ver en la Figura 1.



Scanning sensor specification		Integrated scanner RS2
Max. point acquisition rate		50'000 Points/s
Points per Line		1000
Line rate		50 Hz
Line width (mid range)		65 mm
Stand off (mid range)		150 mm ± 50 mm
Minimum point spacing (mid range)		0.046 mm
Laser power control		Semi-automatic – per line
Accuracy (2 sigma) [§]		30 µm
Weight		340 g
Controller		No
Laser safety		Class 2M
Working temperature		5°C – 40°C (41°F – 104°F)

Figura 1. Brazo de Medición con escáner y características

Funcionamiento del escáner

El láser escáner se basa en la tecnología de triangulación de un único punto láser. El cabezal láser incorporado al brazo dispone de una fuente emisora y una cámara receptora del haz reflejado. El emisor emite en cada instante un punto láser que se refleja en la superficie inspeccionada (ver **Figura 2**) y si está dentro de los rangos admisibles el reflejo es captado por el receptor, que tiene un sensor tipo PSD (*Position Sensitive Detector*) que en función de la posición en el sensor y por triangulación permite el cálculo de las coordenadas del punto en la superficie del objeto.

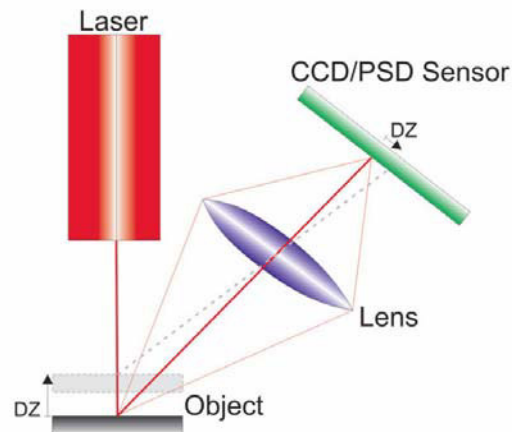


Figura 2. Esquema de funcionamiento escáner láser. Ref [6]

El punto láser se emite secuencialmente formando un haz de unos 9 cm de longitud cuando el emisor está a la distancia óptima. El programa de gestión del brazo permite configurar la cantidad de puntos medidos por cada haz y la aplicación de un filtro en caso de considerarlo necesario. En función del tipo de superficie a escanear se puede seleccionar la intensidad del láser para mejorar la calidad de los puntos detectados por el sensor. Este criterio de filtrado se basa principalmente en el descarte de aquellos puntos con un vector normal asociado muy diferente al resto de los puntos del contorno.

Las restricciones que maneja el escáner láser para determinar su rango de funcionamiento óptimo (dentro de tolerancias) quedan definidas principalmente por el DOF (*Depth Of Field*) y el FOV (*Field Of View*). El primero, DOF, delimita la distancia máxima y mínima a la que debe estar el objeto desde el emisor para que el haz reflejado sea captado por el sensor PSD. El FOV es el ángulo delimitado por el haz láser entre el emisor y los extremos de la línea del haz reflejada en la superficie. De modo que los objetos a escanear deben situarse siempre en la región definida por el DOF y FOV. Las partes del objeto que queden fuera de este rango no serán registradas. Además se añade la restricción de que la normal en la superficie de un punto del láser no debe separarse mucho del láser, esto es que en la medida de lo posible el eje del láser debe colocarse aproximadamente perpendicular a la superficie del objeto.

El uso de este sistema requiere adaptar la técnica de medición según el tipo de pieza que se mida conforme a su forma y acabado superficial. De modo que cada pieza debe ser tratada de forma individual y requiere un análisis *ad-hoc* del programa de escaneado. Las restricciones propias del funcionamiento del escáner junto con la geometría del objeto definen las posibles posiciones del láser para conseguir una ruta de escaneado óptima en cuanto a la calidad de los puntos registrados y el número de pasadas que se deben hacer sobre el objeto para definir su geometría.

Todos los puntos registrados por el sensor y de los que se calcula su posición (coordenadas y vector de dirección) según la posición de los *encoders* del brazo se envían a un PC donde son representados y tratados mediante el software Polyworks®. - Ref. [7]

Dificultades encontradas en el uso del escáner láser.

El uso de escáner láser requiere determinadas condiciones de los objetos para poder ser escaneados correctamente, los problemas más habituales, encontrados en la aplicación para hélices, son los relacionados con el acabado superficial, las geometrías complejas (concavidades), los reflejos indeseados del haz en zonas de solape entre palas y la definición de la ruta de escaneado óptima. Se ha experimentado y se han tomado medidas oportunas para solucionar estos problemas y se siguen buscando nuevas soluciones. Algunas de estas soluciones son específicas para cada objeto, no existiendo una solución universal.

Procedimiento de medición de hélices

Una de las primeras aplicaciones desarrolladas con el brazo de medición es la inspección de la fabricación de las hélices a escala. Se desarrolló un procedimiento para obtener los datos de desviación respecto al modelo CAD a través de la nube de puntos del escáner, buscando la obtención de información detallada en las zonas recomendadas por la ITTC - Ref. [1] [2] [8]

El procedimiento de medición de modelos de hélices está basado en las características del brazo y de la hélice de modo que se minimicen los errores sistemáticos propios de cualquier medición.

La principal ventaja del uso de escáner es que no se produce contacto entre el instrumento de medición y el objeto, pero por otro lado exige el desarrollo de una técnica específica debido a las particulares formas de las hélices y su acabado superficial. La técnica de escaneo empleada depende del objetivo: inspección/validación, ingeniería inversa o copia/escalado y de las restricciones del escáner.

Los pasos más importantes se representan en el diagrama de flujo y se detallan a continuación:

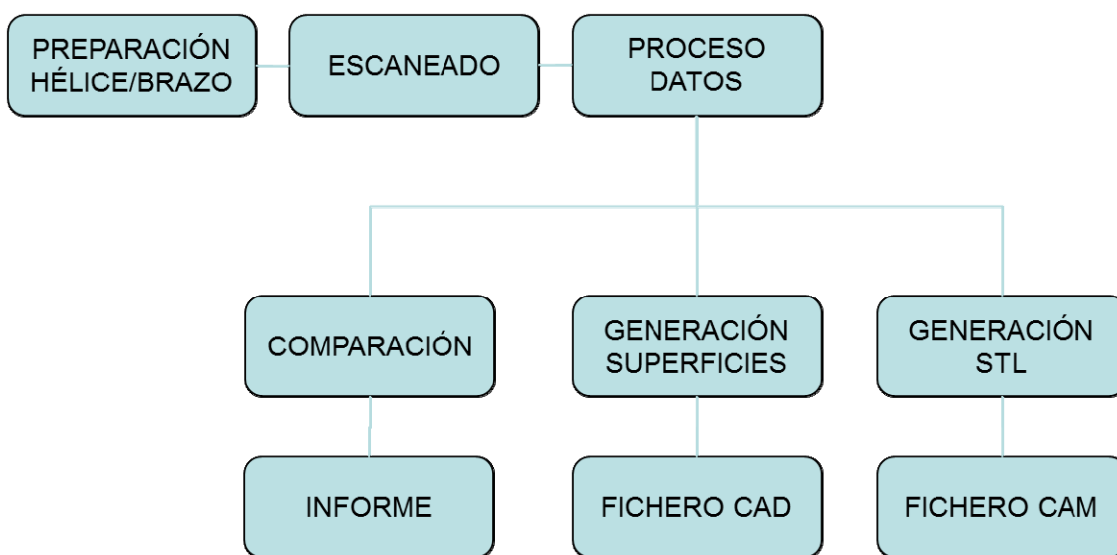


Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento de medición

1. Preparación hélice/ brazo

La precisión de medición está relacionada con la distancia desde la que se mide el objeto respecto a la base del brazo. A mayor extensión del brazo menor precisión en la medida. Por esto, la posición relativa entre brazo y hélice será la menor posible para alcanzar todos los puntos de una cara de la hélice con el menor movimiento del brazo (ver **Figura 4**).

El acabado superficial de las hélices requiere, en la mayoría de los casos, una preparación de la superficie de las palas para evitar reflejos que producen ruido en la nube de puntos. La iluminación del local puede también crear reflejos que producen ruido de medida.



Figura 4. Disposición hélice/brazo

2. Escaneado

El escaneado (**Figura 5**) debe realizarse de modo que facilite el trabajo del proceso, esto es, debe procurarse que la nube de puntos sea lo más limpia posible, evitando zonas de nubes de puntos muy densas o libres de puntos.

Se intenta tomar puntos de la superficie completa de la pala o núcleo con el menor número de pasadas posible. La simulación de la ruta de escaneo ayuda a detectar posibles zonas complicadas.



Figura 5. Escaneado hélice

3. Proceso de datos

Al escanear las distintas partes de las superficies de una pala de la hélice, es inevitable tomar puntos de partes adyacentes (núcleo, otras palas, mesa, etc.) que se deben eliminar al finalizar el escaneo. También es posible que haya zonas con ruido (puntos que están fuera de la superficie y/o que tienen un vector de dirección claramente desviado), producido principalmente por reflejos propios de las superficies pulidas. En la medida de lo posible se eliminarán estos puntos. Por otro lado, en el proceso de escaneado se puede hacer más de una pasada por una misma zona obteniendo una densidad de puntos demasiado alta. En este caso, a través de las funciones del software, se pueden simplificar las capas dejando únicamente una.

Una vez disponible la nube de puntos procesada hay que establecer un sistema de referencia común con la geometría teórica (CAD) y que además permita comparar ambas entre sí. Para el ajuste de los sistemas de referencia se emplean dos técnicas, un ajuste inicial de selección manual de puntos comunes entre CAD y nube de puntos y una segunda de ajuste automático que emplea mínimos cuadrados (*best fit*). La calidad del ajuste dependerá en gran medida de la correcta selección de los puntos comunes. En caso de no disponer de la geometría CAD, en lugar del ajuste de sistemas de coordenadas se fija un sistema referido a la nube de puntos

A partir de este punto y dependiendo del objetivo del escaneo se procede de forma diferente, para el caso de validación/inspección se realizan, además, los siguientes pasos:

Comparación

La comparación permite determinar las posibles desviaciones entre la nube de puntos y los valores teóricos definidos por el CAD. Existen varias posibilidades de afrontar la comparación. Las empleadas hasta la fecha son la generación de un mapa de colores sobre la nube de puntos asignando una escala de colores según la distancia al CAD y por otro lado, se establece un procedimiento que permite identificar las desviaciones y sus tolerancias en determinados puntos, como los definidos por la ITTC. Estos puntos, que se denominan puntos de comparación, son seleccionados por pertenecer a la superficie teórica del CAD y serán en donde se midan las distancias respecto a la nube de puntos (**Figura 6**). Los puntos de comparación se obtienen de la geometría teórica por medio de programas como PropCAD® - Ref. [9] o PROGEO® - Ref. [10] según las recomendaciones de la ITTC y se importan al programa PolyWorks®.

Una de las novedades de este procedimiento, es que el cálculo de la desviación es en 3D, es decir, sobre los ejes x, y, z a diferencia de los procedimientos tradicionales que miden distancias y espesores únicamente en la dirección axial.

Dado que la cantidad de puntos de comparación es muy grande (la toma de datos es mucho mayor que con los métodos tradicionales) se realiza un análisis estadístico que permite la comprensión rápida del grado de ajuste y de las tolerancias.

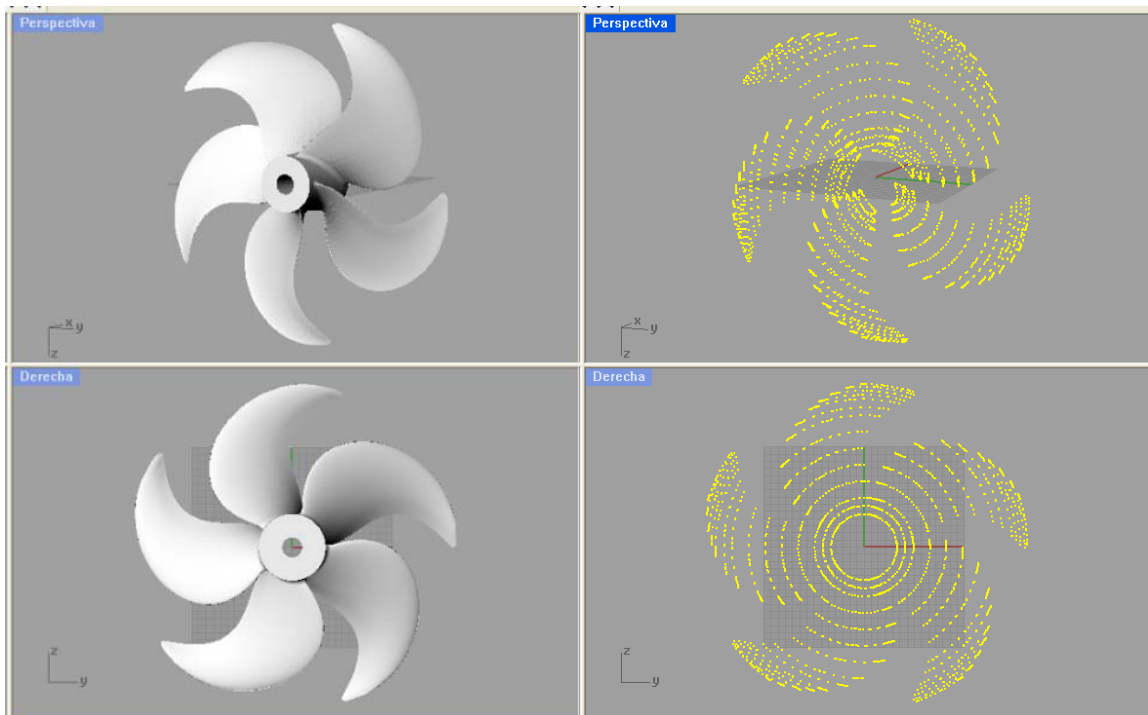


Figura 6. Perspectiva y frontal de CAD y puntos de comparación

Generación de informe

Con los datos del análisis estadístico se presenta un informe resumido con las conclusiones significativas de la medición. En caso de ser necesario se podrían hacer recomendaciones para la mejora del proceso de construcción o advertencias de deformaciones (como el caso de la **Figura 7**) debido a un excesivo o poco controlado calentamiento localizado en el proceso de aporte de material en la punta de una pala en la que, por un poro de la fundición, existía una falta de material.

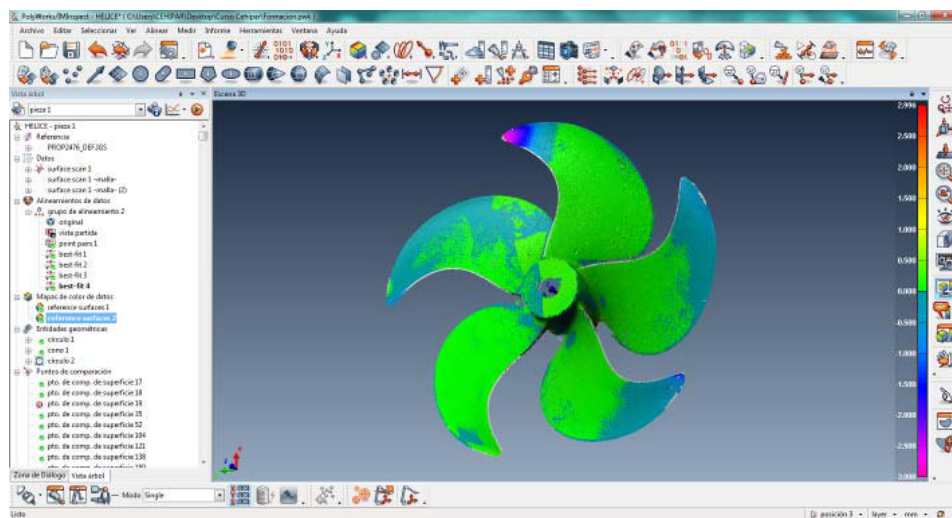


Figura 7. Mapa de colores indicando la distancia entre la nube de puntos y el CAD

El análisis estadístico ayuda a entender de forma global el grado de ajuste de los puntos escaneados de la hélice con los valores teóricos dados por la geometría CAD del diseño.

Un ejemplo de las desviaciones respecto a la tolerancia y desviación estándar se presenta en la tabla de la **Figura 8**):

	$\sigma = 0,036$	Pasa	No pasa
Tolerancia	0,050 mm	760 90,05%	84 9,95%
Tolerancia $\pm \sigma$	0,086 mm	820 97,16%	24 2,84%
Tolerancia $\pm 2\sigma$	0,122 mm	837 99,17%	7 0,83%

Figura 8. Cuadro de desviaciones medidas en los puntos de comparación

La creación de un histograma, como el presentado en la **Figura 9** permite visualizar y analizar de forma global la distribución de las desviaciones de los puntos de comparación respecto al CAD:

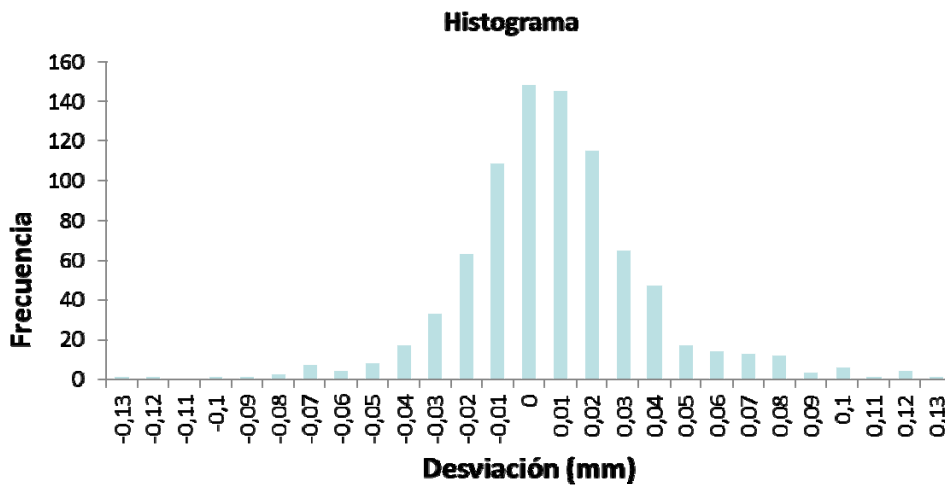


Figura 9. Histograma de desviaciones

Otras aplicaciones

El proceso de escaneado para hacer ingeniería inversa sobre un objeto tiene como objetivo la generación de un modelo CAD basado en superficies. Existen varios programas que convierten nubes de puntos a superficies (PolyWorks y su módulo Modeler por ejemplo) especialmente recomendados para objetos con superficies complejas. En otros casos más sencillos es posible la generación de superficies a través de la nube de puntos mediante la creación de secciones (secciones transversales en el caso de carenas), función que está disponible en el PolyWorks y que permite además la obtención de secciones suavizadas. La generación de superficies a través de estas secciones es sencilla a través de varios programas (Rhino, SolidWorks, etc.).

En cualquier caso es necesario obtener una buena definición del contorno del objeto para ayudar en la definición de los bordes de las superficies. Una de las formas de evitar este problema (especialmente en las palas) es medir con palpador de punta el contorno y generar una curva sobre estos puntos que ayude a delimitar geoméricamente el borde de la superficie creada.

Cuando el objetivo del escaneado es obtener una reproducción del objeto (mediante FCN o impresoras 3D) tan sólo hay que generar un archivo que defina la geometría y que sea compatible como por ejemplo el formato STL (STereo Lithography) desarrollado por 3D Systems para la fabricación asistida por ordenador (CAM). Los archivos STL describen la geometría mediante triángulos siendo sencilla la conversión de nubes de puntos a este formato. Si el fichero STL queda coherente se puede enviar directamente a los programas CAM para la fabricación.

Conclusiones

La implementación en el CEHIPAR de una herramienta compleja como es el láser escáner con brazo y respectivo software para la inspección de la geometría de modelos de hélices permitió modernizar la inspección de la fabricación de modelos. Entre las ventajas al respecto a la inspección convencional hay que destacar el aumento considerable de los puntos inspeccionados que hizo más fiable el análisis estadístico, la visualización directa de los resultados, el acceso a zonas de importancia antes imposibles de alcanzar y todo esto sin contacto físico con las superficies.

Quedan por resolver varios problemas y perfeccionar el procedimiento. Especial atención tendrá el desarrollo por hacer para pasar de las superficies a los distintos parámetros de la geometría (paso, espesores, etc.), mejorar las condiciones de las superficies para evitar reflejos y acelerar el proceso de inspección.

Esta tecnología se empieza a aplicar también en la inspección del resto de modelos físicos objeto de experimentación en el CEHIPAR como los modelos de cascos de buques y sus apéndices, otros tipos de propulsores, artefactos "off-shore" etc. con el propósito de inspección de la fabricación y también para ingeniería inversa, recuperando y generando modelos CAD 3D de éstos.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a la Dirección del CEHIPAR y a su Área Técnica por la apuesta incondicional al desarrollo de nuevas técnicas y el apoyo y ánimo recibido en los momentos críticos que surgen en todo proyecto de I+D+i, cuando por vicisitudes no se alcanzan los resultados esperados

Agradecemos el esfuerzo y dedicación de Hexagon Metrology que asesoraron más allá de sus obligaciones a la puesta en marcha e implementación del sistema, estando siempre al otro lado de las comunicaciones cuando se les requirió.

En todo proyecto hay un equipo que desde la sombra es el que todos los días va sacando el trabajo más arduo y que requiere mayor constancia, a todos ellos nuestro agradecimiento y en particular a la elaboración de los trabajos de desarrollo CAD y medición que fueron realizados por Antonio Fabuel y Francisco Lledó.

Bibliografía

- [1] ITTC, *Model Manufacture. Propeller Model Accuracy*. 7.5-01-02-02, 2005.
- [2] ITTC, *Model Manufacture. Ship Models*. 7.5-01-01-01, 2002.
- [3] T. A. Clarke, T. Ellis y S. Robson, *High accuracy 3-D measurement using multiple camera views*, 1994.
- [4] F. Mena y S. Troisi, «Low cost reverse engineering techniques for 3D modeling of propellers,» de *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Part 5 Commission V Symposium*, Newcastle upon Tyne, UK, 2010.
- [5] S. D. Hand, J. F. Clark, W. J. Mongon y E. Schindelholz, «Measurement of the USS Monitor Propeller Using Structured Light and Coherent Laser Radar Scanning Technologies,» de *Proceedings of Coordinate System Measurement Conference*, Austin, Texas USA, 2005.
- [6] P. Champ, *CMS 106/108 Laser Line Scanners. White Paper*, 2011.
- [7] Innovmetric, *Manual PolyWorks V12*, 2012.
- [8] ITTC, *Testing and Extrapolation Methods. Propulsion, Cavitation. Model - Scale Cavitation Test*. 7.5-02-03-03.1, 2002.
- [9] Hydrocomp Inc., *PROPCAD. User Manual*.
- [10] CEHIPAR, «PROGEO. Manual de usuario,» 2008.

- [11] Hexagon Metrology, *Manual Romer Absolute Arm*, 2012.
- [12] CEHIPAR, «Hélices. Modelo de informe (Informe de especificaciones de la hélice),» 2008.
- [13] E. Carrillo, M. Rosa, P. Ferrer y N. Sironi, *Técnicas de ingeniería inversa empleadas para la medición de carenas de barcos de regatas. Escáner láser y análisis tridimensional*, Madrid: CEHIPAR, 2006.