

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <http://www.researchgate.net/publication/260284566>

Aplicaciones Metrologicas de los láseres por triangulacion (DM-284 2005) original

DATASET · FEBRUARY 2014

DOWNLOADS

220

VIEWS

61

5 AUTHORS, INCLUDING:



[Eduardo Cuesta](#)

University of Oviedo

69 PUBLICATIONS 115 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Pedro Fernández](#)

University of Oviedo

32 PUBLICATIONS 26 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Carlos Rico](#)

University of Oviedo

29 PUBLICATIONS 43 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Braulio J Álvarez](#)

University of Oviedo

54 PUBLICATIONS 70 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

APLICACIONES METROLOGICAS Y DE INGENIERIA INVERSA DE LOS LASERES POR TRIANGULACION

Eduardo Cuesta, Pedro Fernández, Carlos Rico, Braulio Álvarez, David Blanco

Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Universidad de Oviedo

Campus de Gijón 33203, Gijón (Asturias)

Tel. 985182136 Fax: 985182016 Email: ecuesta@uniovi.es

Resumen.

En los últimos años se ha comenzado a usar la técnica de digitalizado sin contacto, basada en el uso de sistemas láser. Su uso aún no está muy extendido, debido a su elevado coste y baja precisión en comparación con otros métodos tradicionales de digitalizado por contacto. Sin embargo, esta técnica presenta entre sus ventajas, una elevada velocidad de adquisición de puntos y como consecuencia una reducción extraordinaria de tiempo y coste que supone en comparación con el digitalizado punto a punto o continuo. Además, la precisión alcanzada con el digitalizado láser resulta apropiada para muchas de las aplicaciones metrológicas. Estas características permiten predecir una aplicación masiva de esta técnica al digitalizado de superficies de tipo complejo. En este artículo se discuten todos estos aspectos y la doble aplicación de esta tecnología a la inspección metrológica y a la ingeniería inversa.

Palabras clave

Digitalizado, medida sin contacto, Sensor Láser por Triangulación, MMC, Ingeniería inversa

Abstract.

Laser digitizing techniques have started to be used in the recent years. They are not yet very extended due to their high cost and lower precision than traditional contact-type digitalizing methods. However, the main advantages of scanning with this techniques consist on a high speed points acquisition and consequently, on an extraordinary time and cost reduction compared with point-to-point and continuous-touch-triggering. Moreover, precision of laser digitizing may be appropriate for a lot of metrology applications. These characteristics allow for predicting a massive application of this technique for digitizing free-form surfaces. This paper discusses all these aspects and also the double application of this technology for metrology inspection and reverse engineering.

Keywords

Digitalizing, non-contact measurement, Laser Triangulation Sensor (LTS), CMM, Reverse Engineering.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas para la inspección metrológica sin contacto, utilizando el haz láser como fuente para obtener con precisión las coordenadas de puntos correspondientes a una pieza o modelo, han evolucionado mucho en los últimos años. De hecho hasta hace poco, era muy excepcional el uso de esta tecnología fuera del ámbito de la investigación, llevada a cabo en universidades o en industrias de muy

alta componente tecnológica. Hoy en día sin embargo asistimos a un renacimiento de los sistemas de medida sin contacto (tanto 2D como 3D) al incorporarse a esta tecnología, por precio y prestaciones (velocidad, capacidad de captura de puntos, calidad de los mismos, etc.), industrias con productos y requerimientos de alta precisión, con necesidades de fabricación de alta calidad en plazos muy cortos (cadencia de piezas muy elevada) o con piezas o productos de elevado tamaño o de geometrías complicadas (con problemas de medición por métodos tradicionales). Todos ellos, por razones que examinaremos en detalle, han migrado hacia la inspección sin contacto.

La clave en la implantación de estos sistemas sin contacto se debe sin duda al uso de haz láser como elemento que aporta precisión además de velocidad. El hecho de utilizar una luz relativamente barata, coherente y monocromática, unido a tamaños muy reducidos de punto (spot) conseguidos con lentes ópticas, hacen del láser la herramienta ideal para el digitalizado sin contacto. Además, existe una doble vertiente de aplicaciones de la técnica de digitalizado: se puede aplicar tanto en tareas de inspección como de ingeniería inversa. En el primer caso se trata de comprobar las posibles desviaciones de un componente fabricado con respecto a un modelo CAD existente. En el segundo caso, se obtiene un modelo CAD (presuponiendo que no existe), por medio del digitalizado de un prototipo existente.

En ambos casos esta tecnología aporta una elevada velocidad de adquisición de datos, del orden de miles de puntos por segundo (hoy se barajan cantidades del orden de 60000 pto/s o más) lo que permite que las reducciones de tiempo de trabajo sean muy elevadas y en consecuencia, también la reducción de los costes asociados al proceso de inspección.

A pesar de las ventajas citadas, todavía existen una serie de barreras que se irán desgranando durante este artículo, y que nos llevarán a justificar las actuales líneas de investigación, tanto de fabricantes de equipos láser por triangulación (existen láseres que trabajan con otros principios físicos, como la holografía conoscópica) como de los desarrolladores de software para medición sin contacto e Ingeniería Inversa.

Principio de los Sistemas de triangulación láser

Los sistemas de medida por triangulación (fig. 1) son conocidos desde hace mucho tiempo, antes incluso de la aparición del haz láser. En la construcción de este tipo de sistemas, la fuente de luz y el sensor no están alineados, sino que forman un cierto ángulo que se denomina ángulo de triangulación. La fuente de luz proyecta un rayo sobre la superficie de la pieza, y el fotodetector recoge la luz reflejada y/o la luz difusa sobre la superficie de la pieza. Como se conoce la dirección de propagación del rayo, para obtener la posición en el espacio del punto que se está digitalizando, sólo se necesita determinar la distancia a la que el rayo incide sobre la superficie de la pieza. Esta distancia se determina con la lectura del fotodetector y el ángulo de triangulación.

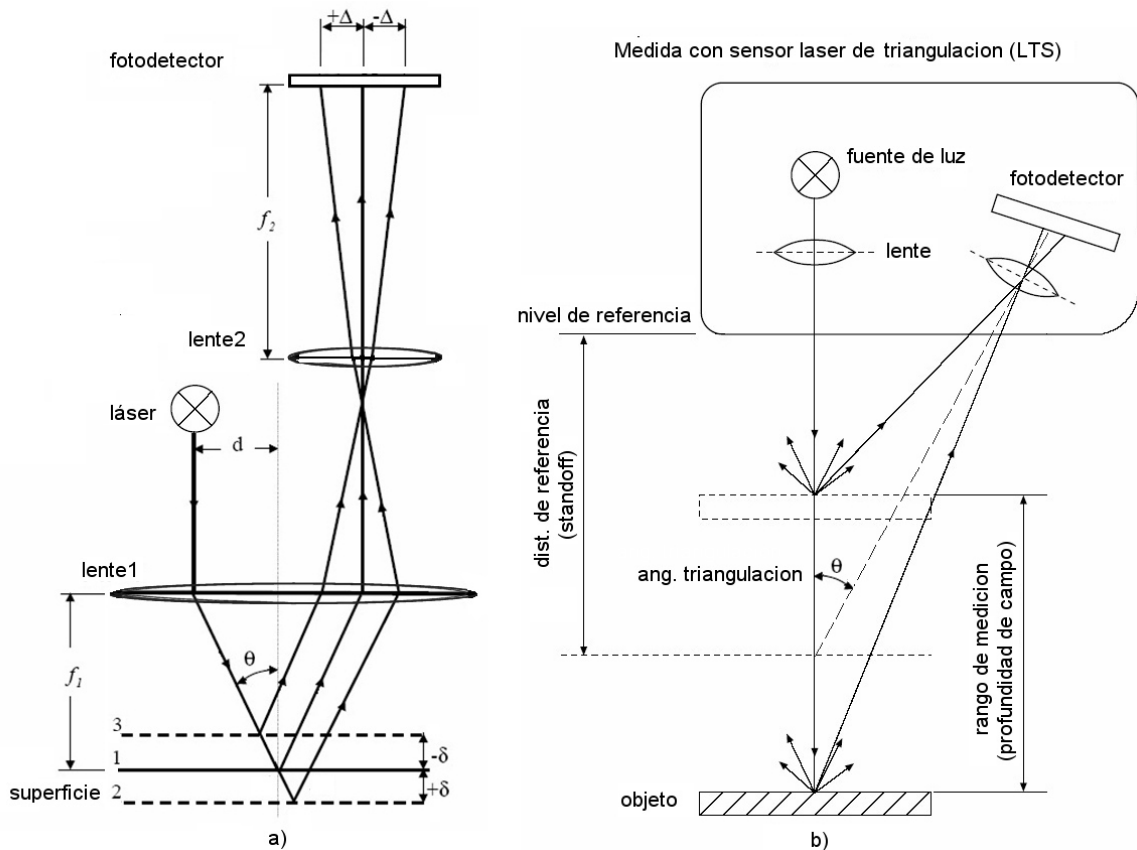


Fig. 1 - Principio de funcionamiento de los sensores láser por triangulación (LTS)

La geometría constructiva del sistema nos permite generar (triangularizando) las coordenadas de los puntos leídos sobre el fotodetector. En la fig. 1a), puede observarse un sistema básico de triangulación que trabaja con la luz reflejada por el objeto. Este dispositivo permite, variando el parámetro f_1 , regular la profundidad de campo ($δ$), así como amplificar o reducir (para calibrado, etc.) con el parámetro f_2 la imagen tomada en el fotodetector. En la fig. 1b) se muestra una configuración mucho más habitual en los sistemas LTS (*Laser Triangulation Sensor*) actuales: en este caso se trabaja con la luz difusa (no con la reflejada) que se produce al incidir el láser sobre su superficie. En esta figura se pueden apreciar algunos de los parámetros geométricos y constructivos que definen el campo de actuación y la precisión de estos sistemas:

- Por un lado está la distancia de referencia (standoff), que delimita la posición del centro del campo de medida (donde se debería situar la parte central del objeto a digitalizar en altura) con respecto al sensor. Muchos fabricantes dan esta distancia con respecto a un nivel de referencia externo (parte inferior del sistema LTS), otros con respecto a la lente de enfoque sobre el fotodetector, etc.
- Además se tiene el ángulo de triangulación (a la distancia de referencia), que es el ángulo entre el haz incidente y el reflejado hacia el fotodetector.
- La profundidad de campo o rango de medición (en el sentido del haz incidente) determina los límites geométricos del objeto que es capaz de captar el fotodetector.

Los sensores que funcionan con el principio de triangulación (*Laser Triangulation Sensor, LTS*) pueden presentar una gran variedad dentro de este esquema básico, pero como regla general puede decirse que

los sensores con mejor precisión son aquellos que tienen la distancia de referencia más cerca del objeto. Como resultado de la ecuación de triangulación y de la existencia del ángulo de triangulación, cuanto mayor sea la distancia de referencia, mayor constructivamente hablando, tiene que ser el sensor (para un rango de precisión especificado).

Fuentes de luz

La fuente de luz que se utiliza depende del sistema, pero lo más habitual son las luces estructuradas, y sobre todo las fuentes láser, que emiten luz en un estrecho rango de longitudes de onda (λ).

La luz láser generada pasa a través de lentes colimadoras (haciendo que los haces de luz permanezcan paralelos) y focalizadoras, con el fin de evitar la dispersión de la luz y que el punto iluminado sobre la superficie de la pieza (spot) sea lo más reducido posible. Cuanto más reducido sea el tamaño del spot mayor precisión se puede conseguir. Una vez reflejado el haz sobre la superficie del objeto, se presentan también lentes focalizadoras y filtros de longitud de onda, que solo dejan pasar hacia el fotodetector la luz que llega con la misma longitud de onda del láser.

Además de estos filtros ópticos, hay diodos láser que no trabajan en modo continuo sino en modo pulsado. En este modo de funcionamiento se puede incorporar un filtro digital que restringe la señal de salida del fotodetector a la frecuencia de pulsación de la fuente.

La luz láser puede ser un solo rayo, para los sistemas puntuales o bien de un haz, para los sistemas de cortina. La generación de los haces difiere de unos fabricantes a otros, normalmente se parte de una luz puntual (un solo rayo), que incide sobre un espejo giratorio que genera la cortina durante su movimiento. Otros fabricantes utilizan ópticas especiales que deforman el rayo puntual hasta formar una cortina.

El color o tipo de la luz láser que se utilice en estos sistemas puede ser muy variable. En los equipos industriales de reducido tamaño, se exige que la λ de emisión sea lo menos dispersa posible (láser de más calidad), que permita trabajar en buenas condiciones de seguridad y que cumplan la normativa de ser una láser visible (láser clase II), por ello lo más habitual es trabajar con láseres diodo de luz roja ($\lambda \approx 650 - 660 \text{ nm}$) y de baja potencia (picos $< 1 \text{ mW}$).

Los fotodetectores

Los fotodetectores pueden ser de distintos tipos: CMOS, PSD, CCD, etc. Los más habituales son los PSD (*position sensitive detector*), y los CCD (*charge coupled device*). Los PSD son dispositivos analógicos capaces de medir el desplazamiento de un punto de luz sobre una línea a una superficie (fig. 2) en función de las diferencias de corriente que se establece en dos extremos opuestos. Los CCD son dispositivos digitales, en configuración lineal (fig. 2) o bidimensional. En la configuración 2D, están formados por una matriz de celdillas capaces de generar una tensión proporcional a la cantidad de luz recibida (o mejor dicho a la forma e intensidad de luz recibida). La relación precio/precisión se inclina hacia los PSD cuando no es necesario un cálculo computacional posterior de los puntos (triangulación directa). Sin embargo cuando la aplicación requiere tratamiento de la imagen se prefieren los CCD. Este tipo de detectores son los que permiten una frecuencia de rastreo más alta, y con ello, permiten a las

tarjetas electrónicas y al software calcular la matriz de transformación necesaria para obtener las coordenadas globales del sistema a partir de las coordenadas de la imagen (obtenidas directamente por triangulación) en menos de milésimas de segundo.

Desde un punto de vista más “metrológico”, la diferencia entre los sensores PSD y los CCD estriba en la forma en que se capturan (leen) las coordenadas del punto de luz reflejado (fig. 2): Un punto (spot) de luz que llega a la superficie de un PSD, es recibido como una distribución (con forma circular, elíptica, oval, etc.) dentro de la cual se tienen distintas intensidades. El PSD “integra” toda esta distribución determinando las coordenadas del punto leído como un promedio (analizando estadísticamente la distribución) de toda la cantidad de luz recibida; es decir, la intensidad recibida y la extensión de la misma. En el caso de un dispositivo CCD, el spot que llega tiene la misma forma, pero el tratamiento que se hace es distinto: aquí, el sistema trabaja de forma discreta dando como coordenadas del punto leído el valor máximo (pico) de la distribución de la cantidad de luz; es decir, reacciona ante la intensidad más que ante la cantidad total de luz recibida. En ambos casos el tratamiento estadístico del spot de luz tiene una gran importancia deduciéndose rápidamente que el menor error se producirá cuando el spot sea circular y con la mayor intensidad de luz en el centro. Éstas condiciones ideales de trabajo se reservan sólo para un láser trabajando perfectamente perpendicular a la superficie y cuando la superficie presenta además una reflexión difusa uniforme (sin reflejos o reflexiones especulares).

El tema de la reflexión y/o difusión (en múltiples direcciones) de luz que se produce en la superficie del objeto tiene especial importancia por cuanto atañe a la forma de la distribución (vertical) de la intensidad (fig. 2). Puede decirse que en estos sistemas la precisión no solo dependerá de las características físicas del PSD o el CCD (resolución, ángulo de triangulación, etc.), sino que dependerá también del estudio de la forma e intensidad del punto como procedimiento último para una obtener las coordenadas, es decir, dependerá de factores externos al sensor tales como el color del objeto, su acabado superficial o el tipo de luz externa presente durante la inspección (puede añadir “ruido” al proceso).

A modo de resumen, la precisión de estos sistemas de triangulación, depende por tanto de:

- La resolución del sensor CCD
- La calidad de las lentes (no presenten aberraciones ni errores)
- El tamaño del spot que se pueda conseguir. Calidad del haz láser y estado superficial de la pieza..
- La coordinación entre la emisión y la recepción de los datos (filtro de pulsación)

La calibración y cuantificación del error del sistema.

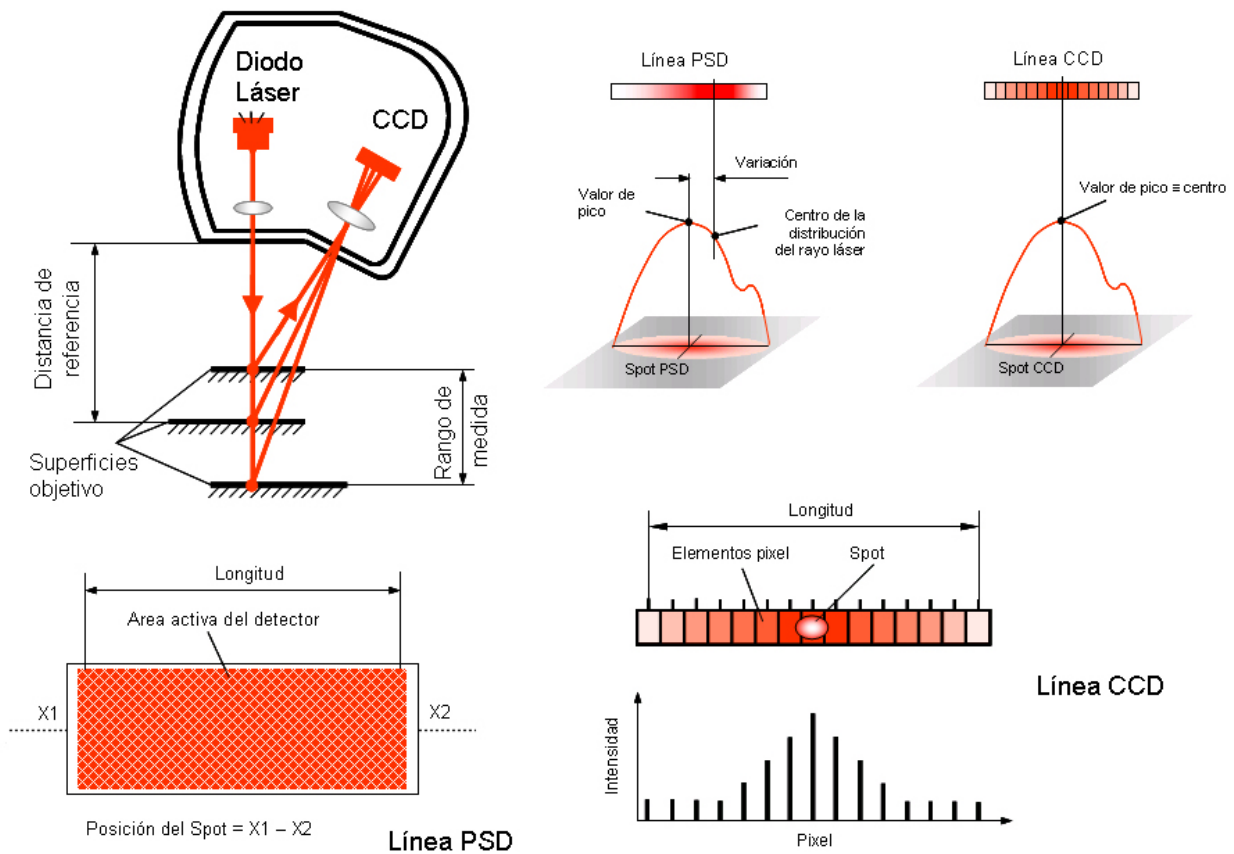


Fig. 2 - Lectura de las coordenadas de puntos de luz con dispositivos PSD y CCD

2. TECNOLOGIAS LASER POR TRIANGULACION. PROBLEMÁTICA.

El hecho de tener una determinada distribución de la intensidad incidente y reflejada, determina de alguna manera la problemática que nos podemos encontrar en este tipo de sensores, casi siempre debida a una errónea distribución de la intensidad leída del punto o a un punto falso creado por imágenes especulares. En la figura 3 pueden observarse algunos de estos fenómenos que dan lugar a pérdida de precisión. Entre otros pueden citarse:

- los cambios (densidades o acabados superficiales distintas) en la superficie que se esta digitalizando, lo que origina una distribución incompleta en el fotodetector;
 - los puntos en esquinas, que hacen que la distribución no sea en forma de campana de Gauss, o
 - la captura de puntos en el límite de oclusión del fotodetector, que al pasar por un borde externo puede generar distribuciones del spot incompletas con la pérdida de precisión correspondiente.
- En este caso también se deben contemplar errores debidos a la difracción de la luz, que pueden generar falsos puntos (distribuciones en otras zonas adyacentes al punto del borde); este último efecto puede darse tanto en el haz incidente como en el reflejado.

Todos estos errores a menudo hacen necesario el uso de filtros posteriores, tanto a nivel constructivo del sensor, como del software de tratamiento de los puntos. De ahí la importancia de añadir a los filtros de longitud de onda, los filtros de frecuencia, que trabajando con un láser pulsado compara la pulsación del

haz reflejado con la del haz incidente. De esta forma sólo serán validos aquellos puntos capturados donde coincida su frecuencia de captura con la de emisión.

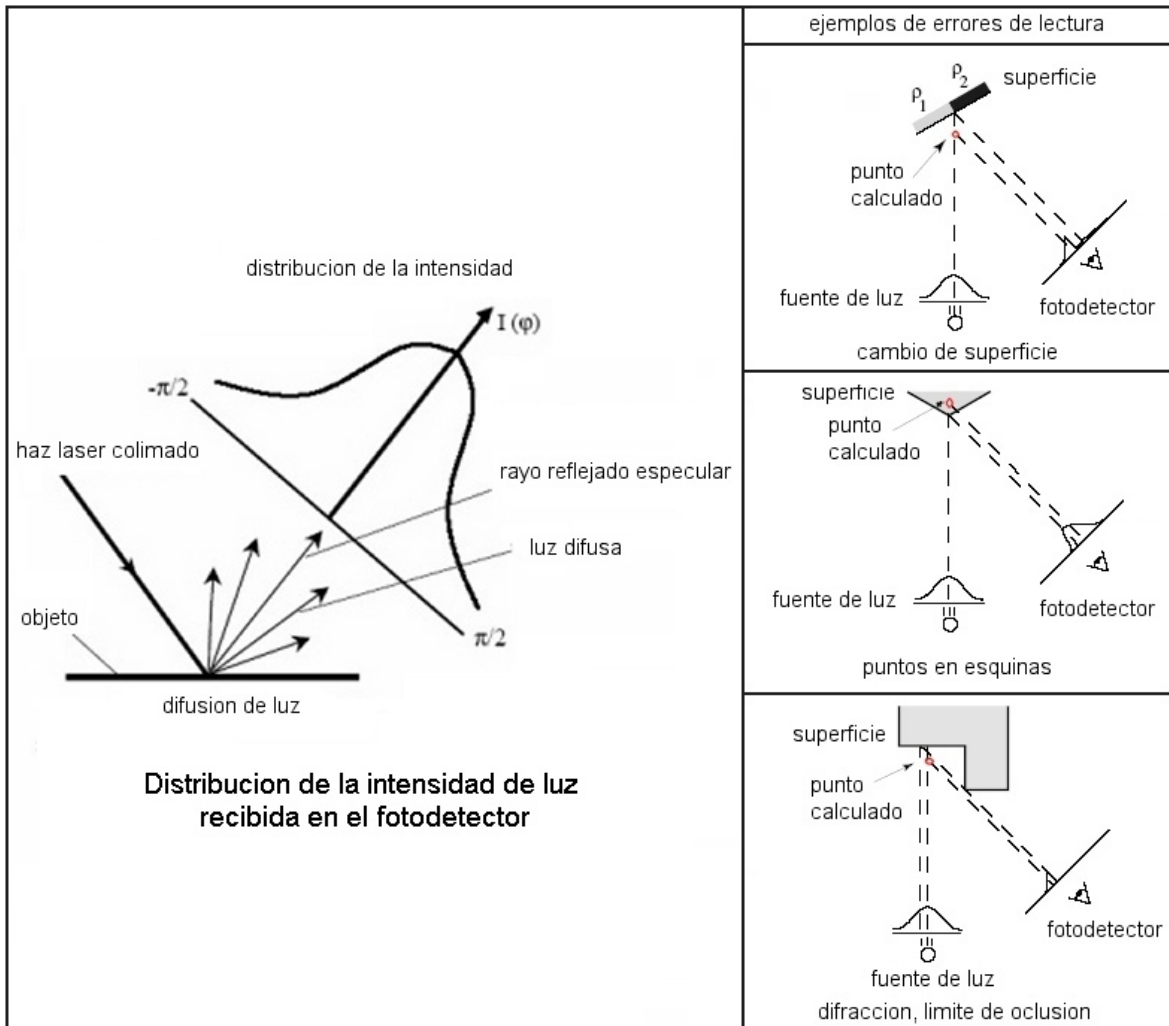


Fig. 3 – Distribución del haz incidente y del reflejado. Errores habituales en puntos singulares

Aunque inicialmente los sensores comenzaron dando puntos aislados (láseres punto a punto), rápidamente se extendió la tecnología a los sensores 2D, que median toda una línea de puntos. Este tipo de sensores recogen múltiples puntos en un simple "frame" y obtienen mediante triangulación información de contorno a través de la línea que es leída sobre la superficie de la pieza. Cuando la pieza esta en movimiento bajo el sensor (o viceversa), estos sensores pueden generar un mapa 3D de la superficie sobre la pieza (fig. 4). Con las nuevas tarjetas de adquisición de datos y los nuevos software de control se consiguen velocidades de captura de mas de 60000 ptos/s.

En este tipo de sistema es muy habitual que el usuario pueda visualizar la imagen de lo que el sistema de digitalizado va a recoger. Para ello cuenta con una ventana (ventana de "previsualización") asociada al campo de visión, donde aparece representado el perfil que resulta de la intersección del haz láser con la superficie de la pieza a digitalizar. Mediante esta ventana, el usuario puede ajustar la posición de la superficie dentro del campo de visión, acercando o alejando el cabezal con respecto a la superficie a digitalizar. Por esta razón, con el fin de digitalizar una superficie con el menor número de barridos, se deberá ajustar la distancia del cabezal láser de forma que se visualice la parte más elevada de la

superficie en la zona superior de la ventana de pre-visualización o la parte más baja en la zona inferior de la ventana, según convenga.

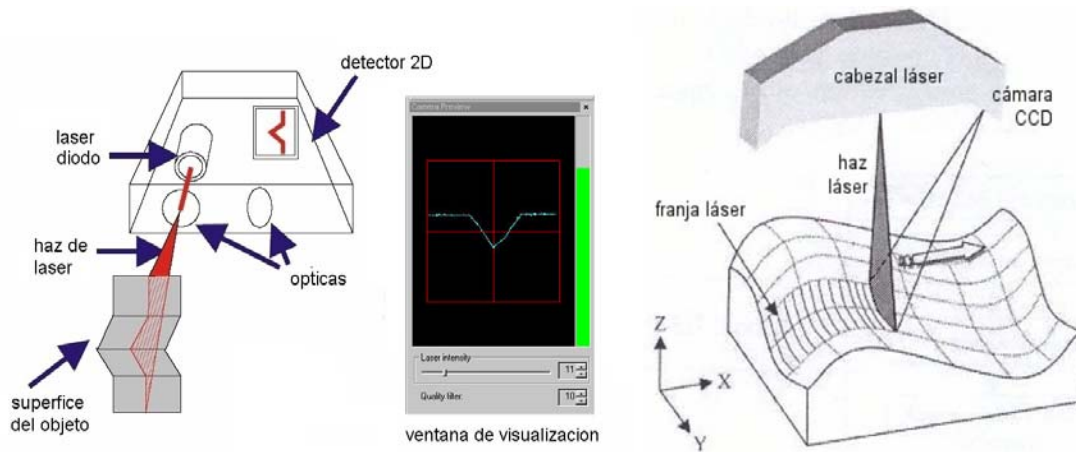


Fig. 4 – Generación de un digitalizado 3D a partir de un sensor de línea láser (2D)

Pero incluso con escáneres 3D y con campos de visión amplios, el fenómeno de la oclusión y de la accesibilidad del haz láser a toda la pieza es un problema añadido que obliga muchas veces a disponer de un sensor con más grados de libertad de forma que tenga la capacidad de incidir sobre la superficie con distintos ángulos. Incluso así es obvio que algunos puntos serán de mejor calidad (mas perpendiculares al sensor) que otros. Otra solución aportada consiste en dotar al sensor de dos o más detectores (CCD o PSD) de forma que se trabaje con ángulos de triangulación complementarios (fig. 5), también existen modelos comerciales, de reciente aparición, que incorporan varias cortinas láser además de varios fotodetectores. Por último puede mencionarse aquí trabajos de investigación que utilizan esta técnica de múltiples detectores (hasta cinco, como en la figura 5) para incrementar la precisión y evitar problemas de oclusión.

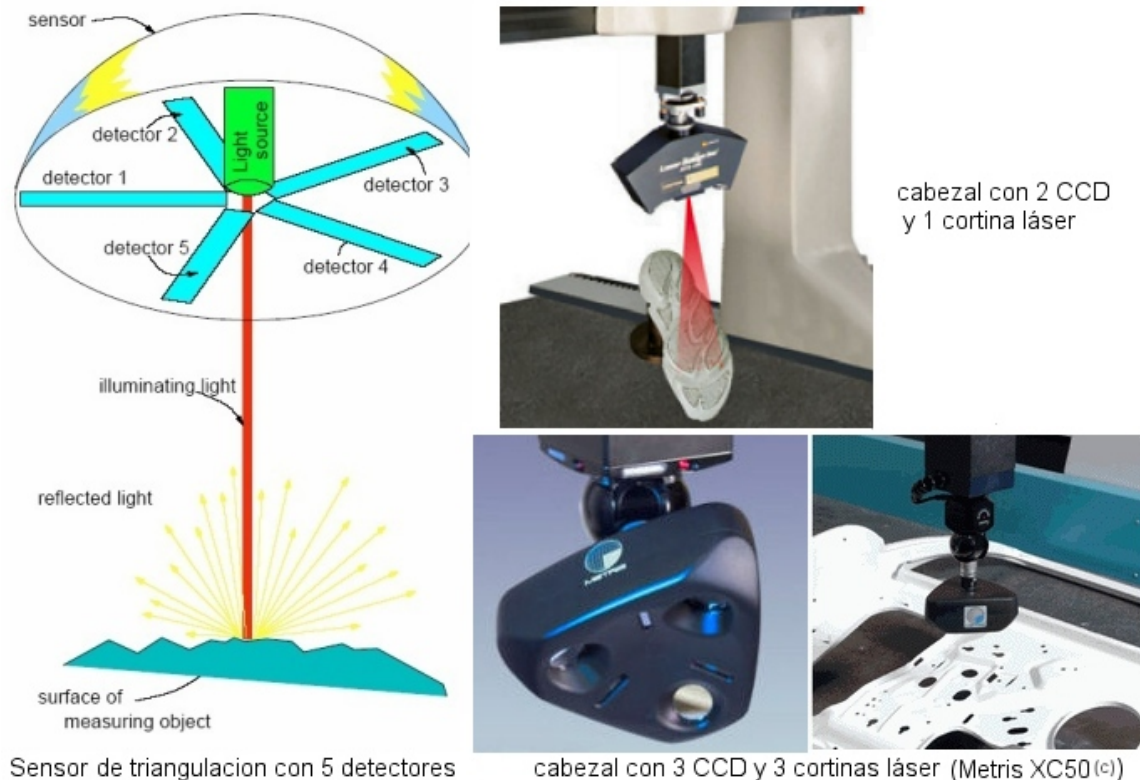


Fig. 5 - Sensores de triangulación con múltiples detectores

Dada la enorme cantidad de puntos y la relativa calidad de los mismos, parece lógico extender su aplicación del entorno puramente de diseño e ingeniería inversa al metrológico (ingeniería de calidad) y de ahí al productivo. De esta forma resulta habitual encontrar sensores de digitalizado por láser 3D, montados sobre brazos de medición (fig. 6izq), sobre robots y sobre maquinas de medir por coordenadas (fig. 6der). En el caso de montarlo sobre una MMC, aunque la captura de puntos no es tan flexible a la hora de evitar la oclusión como ocurre en el brazo de medición, debe tenerse en cuenta que aporta una serie de ventajas decisivas: por ejemplo, la capacidad de movimiento en los tres ejes del espacio del cabezal orientable (caso mas habitual) o la posibilidad de orientación programada de su cabezal (generando “programas de inspección” con LTS) permiten dar repetibilidad al sistema y poder realizar aplicaciones metrológicas en producción seriada.

Con esta última configuración (MMC+LTS) se pueden obtener mejor precisión, con volúmenes de digitalizado relativamente grandes y con posibilidad de conjugar el digitalizado por contacto (en zonas que así lo requieran, para alineaciones, etc.) con el digitalizado sin contacto. Ambas formas de palpado pueden llegar a ser complementarias, no sólo cuando se tiene en cuenta el palpado por contacto punto a punto, sino también cuando se tiene el palpado (digitalizado) por contacto de tipo continuo.



Fig. 6 – (izq.) Sensor de triangulación montado sobre un brazo de medición (Gscan Rx2, Romer©).
(der.) Sensor Metris LC-50 montado sobre una MMC de puente (DEA Global),

Aunque es cierto que se ha aumentado mucho la precisión de estos sistemas con la tecnología de los sensores LTS montados sobre brazos de medición o MMC's, sigue habiendo importantes cuellos de botella, tanto en el tiempo de digitalizado como en el proceso posterior de generación del modelo CAD, o la comparativa sobre un CAD (metrología). Por ejemplo, la toma de puntos se suele hacer generalmente de forma manual, siendo el propio operador de la máquina quién decide sobre los parámetros del proceso y la metodología a seguir. Consecuentemente, los resultados de digitalizado no tienen la calidad

esperada y es difícil reproducir unas circunstancias idénticas de proceso cuando se digitalizan piezas iguales o de características similares (aplicaciones de producción seriada, control de calidad, etc.).

Otros errores que deben ser tenidos en cuenta cuando se montan estos dispositivos sobre Maquinas de medir por coordenadas son los debidos a la alineación de los ejes de la MMC con los ejes del sensor y los errores de posicionamiento del sensor en el cabezal de la MMC. Este tipo de errores requieren una caracterización o calibración del equipo. Una forma de cuantificarlos (aunque sea en conjunto) y minimizarlos consiste en escanear una esfera calibrada en varias posiciones distintas y comparar las nubes de puntos obtenidas (pues se consideran errores sistemáticos). Afortunadamente este tipo de errores son de menor magnitud que cuando este tipo de cámaras se montan sobre robots o sobre brazos de medida.

El estudio formal de los parámetros de funcionamiento, junto con una metodología correcta y estricta a seguir (tratamiento de los puntos) pueden evitar este problema, y permitir a este tipo de sistemas entrar a formar parte muy importante de la inspección dentro de la cadena productiva.

3. PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN LOS LASERES DE TRIANGULACION

A modo de ejemplo, en la figura 7 se pueden observar los parámetros que definen un sistema de digitalizado 3D montado sobre una MMC. En este caso se trata del sensor Metris LC-50©, instalado sobre una MMC Global de Brown&Sharpe (©Hexagon Metrology), que se ha utilizado para realizar análisis de la influencia de los parámetros, tanto geométricos como tecnológicos. Entre otros parámetros, citar los siguientes:

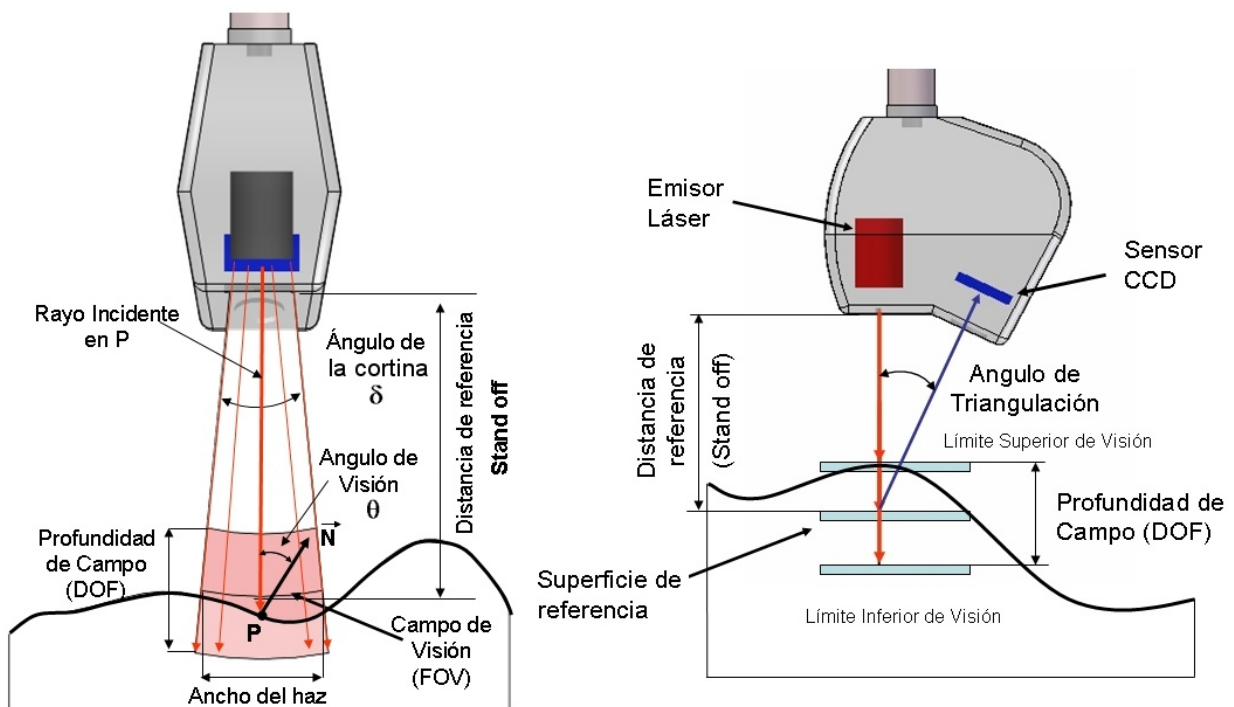


Fig. 7 - Parámetros geométricos del sensor de digitalizado 3D, Metris LC-50.

- **Intensidad del haz láser** o, en el caso de otros sistemas, **tiempo de exposición**.

- **Profundidad de Campo, DOF** (Depth of Field): Es el rango de alturas o profundidades, en el cual el sensor es capaz de recoger puntos sobre la superficie digitalizada.
- **Ancho del haz láser:** Es el ancho de la cortina láser medido en la posición media de la profundidad de campo.
- **Campo de Visión, FOV** (Field of view): Es la región dentro de la cual, el sensor es capaz de recoger puntos sobre la superficie digitalizada. Está definida por la profundidad de campo y el ancho del haz.
- **Distancia de Referencia** (Stand off): Es la distancia desde el cabezal sensor hasta la superficie de referencia situada en la zona media del campo de medida. Con esta altura del sensor el haz láser está enfocado sobre la superficie de referencia y obtiene los puntos de mayor calidad.
- **Angulo de visión (θ):** ángulo entre el rayo del haz láser que incide en un punto de la superficie digitalizada y la normal en dicho punto a la superficie. Depende de la orientación del sensor sobre la pieza.
- **Angulo de Triangulación:** Es el ángulo que forma la cortina láser con el eje de visión del sensor cuando está enfocando a la superficie de referencia. Depende de la geometría constructiva del sensor.
- **Angulo de la cortina o del campo de vision (δ):** Es el ángulo que forma el campo de visión y define el ancho del haz.
- **Diámetro del Spot:** Es el diámetro de los puntos de la cortina láser medido sobre la superficie de referencia. Depende del ángulo de la superficie con el haz incidente.
- **Distancia entre puntos:** Es la distancia entre los puntos digitalizados, medida sobre una misma línea de barrido del láser.
- **Distancia entre líneas de barrido:** Es la distancia entre las distintas líneas de digitalizado
- **Velocidad de adquisición de datos:** cantidad de puntos captados por unidad de tiempo.

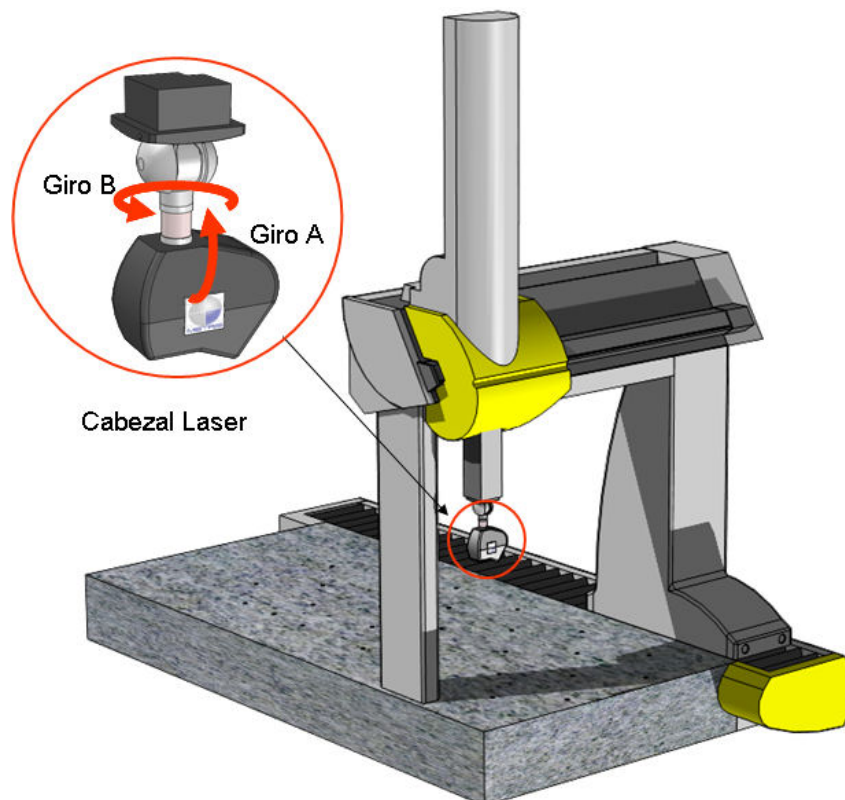


Fig. 8 - La posibilidad de giro del cabezal de la MMC permite evitar la oclusión con sensores LTS.

En los sensores montados sobre MMC, el movimiento puede incluir desplazamientos lineales y/o angulares e incluso cambios en la orientación del láser o pieza. El sistema láser que se presenta en este ejemplo (fig. 8) ha sido instalado en el cabezal motorizado PH10MQ de una MMC. De esta forma se dispone de tres posibles desplazamientos de tipo lineal, según los ejes X, Y, Z que se combinan con los ejes del cabezal (A y B). Puesto que los cambios en la orientación del cabezal son de tipo discreto, permitiendo únicamente cambios incrementales de $7,5^\circ$, se permitirán 720 orientaciones distintas del sistema láser.

En este tipo de sensores, la ventana de pre-visualización permite ajustar la intensidad láser (en otros se varía el tiempo de exposición) y además centrar el objeto dentro del campo de visión. Dicha intensidad influye directamente sobre la calidad del digitalizado. Si los puntos de la superficie a digitalizar reciben una intensidad demasiado baja, el sensor CCD del sistema no es capaz de recoger dichos puntos y por tanto, en la ventana de pre-visualización el perfil se visualizará de forma discontinua o incluso no será visualizado. Por el contrario, si la intensidad es excesivamente alta, puede suceder que el sensor CCD se sature y que aunque los puntos digitalizados sean recogidos y visualizados completamente en la ventana de pre-visualización, muchos de los puntos recogidos contendrán errores (puntos duplicados, etc.). Existe por tanto, un rango óptimo de la intensidad láser. Fuera de este rango, no se obtendrá un digitalizado de calidad. En los sistemas láser comerciales, como el presentado en este artículo, es habitual que muchos de los parámetros citados en el apartado anterior, vengan definidos por el fabricante, siendo imposible su modificación y control por parte del usuario. Citar entre estos, los siguientes:

- Profundidad de Campo (DOF) = 50 mm
- Campo de Visión (FOV) = 50x50 mm
- Distancia de referencia (Stand off) = 125 mm (100 mm al borde superior del FOV)
- Angulo de Triangulación = 30°
- Diámetro del Spot = 10 μm
- Velocidad (máxima) de adquisición de datos = 19.200 puntos/s

Existen otro grupo de parámetros que pueden ser configurables por el usuario. Estos variaran en función del tipo de sensor y en que tipo de maquina este montado, y en nuestro equipo son:

- Intensidad láser: varía desde un valor mínimo de 0 hasta un máximo de 63. Estos valores representan un porcentaje en binario de la potencia máxima del láser.
- Distancia entre puntos (point): varía entre 0.1 mm y el ancho de barrido, 50 mm. Viene dada por la resolución del CCD.
- Distancia entre líneas de barrido (stripe): El valor mínimo configurable es de 0.01 mm. Este parámetro, junto con el anterior, esta relacionado con la frecuencia de muestreo del sensor (capacidad de captura de puntos)
- Solapamiento (overlap): Es el ancho de superposición entre dos áreas de barrido distintas. Cuando son necesarias varias pasadas del haz láser para digitalizar un elemento, es habitual realizar un

solapamiento que represente un pequeño factor de la línea de barrido. El objetivo es poder solapar las nubes de puntos de cada pasada, sin dejar zonas sin digitalizar pero sin aumentar (duplicar) excesivamente los puntos totales .

Los valores de las distancias entre puntos y entre líneas de barrido permiten obtener distinta precisión según la dirección de avance del cabezal durante el digitalizado (fig. 9). Aunque la velocidad de captura de puntos es fija, cualquier cambio en los parámetros correspondientes a la distancia entre puntos y a la distancia entre líneas de barrido, afectará al tiempo de digitalizado completo de una superficie, puesto que el sistema adecua automáticamente la velocidad de desplazamiento del cabezal en función de los parámetros. Valores reducidos de estos parámetros, hacen que se recojan más puntos por unidad de superficie, aumentando la precisión pero incrementando el tiempo total de digitalizado. Por esta razón sólo se recomienda disminuir el valor de estos parámetros en el caso de superficies o zonas de la pieza que presenten pequeñas curvaturas, cambios bruscos de dirección, bordes, nervaduras, etc. Incluso podría suceder que en el caso de utilizar valores altos de estos parámetros, no se puedan recoger puntos pertenecientes a este tipo de detalles. En este sentido, se recomienda utilizar valores altos (barridos de 0.5 a 1 mm, p.e.) para un digitalizado general de la superficie, realizando barridos parciales específicos y con valores más reducidos de los parámetros, para obtener detalles del tipo citado.

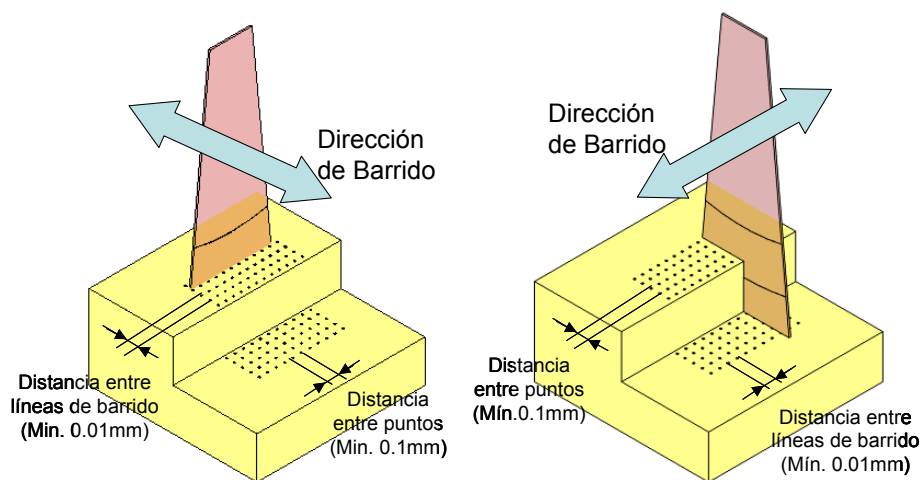


Fig. 9 - Influencia en la precisión de la distancia entre puntos y entre líneas de barrido

La influencia de la separación entre puntos con respecto a la calidad del digitalizado parece obvia, pero no lo es tanto poder solucionar el compromiso entre calidad y cantidad de puntos recogidos, pues está claro que interesa el número mínimo de puntos que definan la superficie con suficiente nivel de detalle como para no perder características dimensionales (hablamos de precisión de medición) o geométricas (hablamos de reconstrucción de superficiales). En la figura 10 se muestran pruebas llevadas a cabo para mostrar este efecto en las zonas más irregulares de la pieza. Con un espaciado entre puntos de 0.2 mm se recogen 198500 puntos (en aproximadamente 11 s) y una elevada calidad del digitalizado. Por el contrario, aumentando el espaciado hasta 2 mm, se recogen 2170 puntos (en menos de 1 s), apreciándose una menor calidad. Se recomienda por tanto una distancia entre barridos elevada cuando se trata de digitalizar superficies suaves, y una distancia reducida solo en el caso de tener que digitalizar

detalles de pequeño tamaño, discontinuidades o zonas irregulares de la pieza que presenten pequeños radios de curvatura.

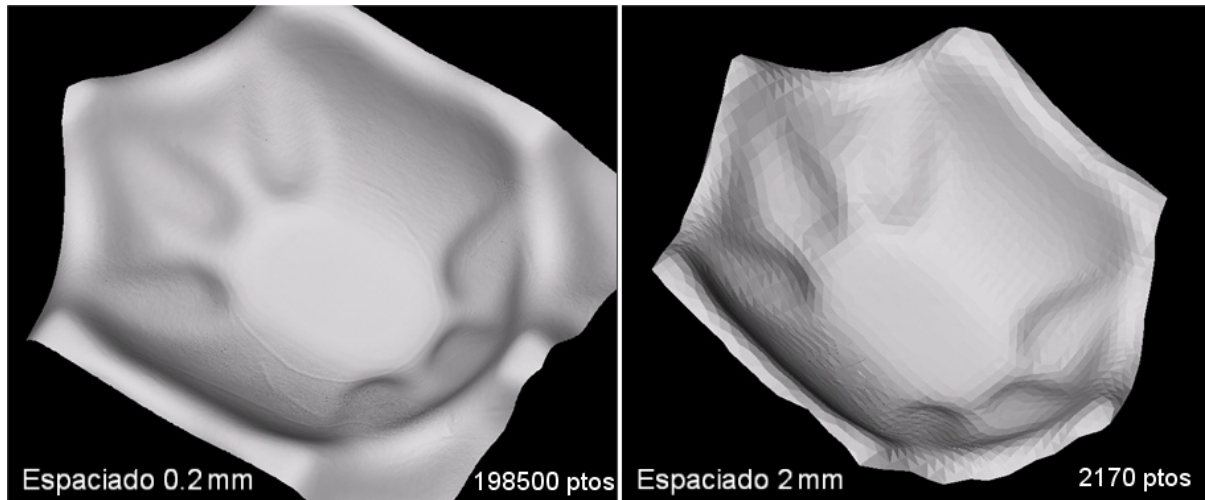


Fig. 10 – Influencia de la separación entre puntos en el nivel del detalle del digitalizado

4. METODOLOGIA DE TRABAJO EN LAS APLICACIONES DE DIGITALIZADO POR LASER

Los programas comerciales se encuentran básicamente orientados a tres tareas distintas: la reconstrucción de superficies (ingeniería inversa), la inspección mediante comparación con modelos CAD y las herramientas de medición. De hecho, existen programas claramente enfocados a aplicaciones metrológicas y de inspección on-line, frente a otro gran grupo más orientado a la generación y reconstrucción rápida de superficies. En el fondo ambos sistemas comparten algoritmos similares y metodologías de trabajo comunes.

De forma genérica, las metodologías en las aplicaciones de Ingeniería Inversa (fig. 11) se puede dividir en tres fases: una primera fase de adquisición de la información geométrica de la pieza (digitalizado) ya tratada anteriormente, una segunda fase de tratamiento de la información (que como veremos incluye filtrado, generación de mallas triangularizadas, suavizado de los triángulos, etc.) y una tercera de generación, comparación o medición de las superficies.

Las superficies que se generan deben estar correctamente ajustadas (usualmente se utilizan NURBS), con buena continuidad y con bordes bien definidos. Sólo una buena aproximación del modelo a la pieza física original hará factible que se utilice luego como modelo patrón (ingeniería inversa) o bien para compararlo con el CAD de la pieza.

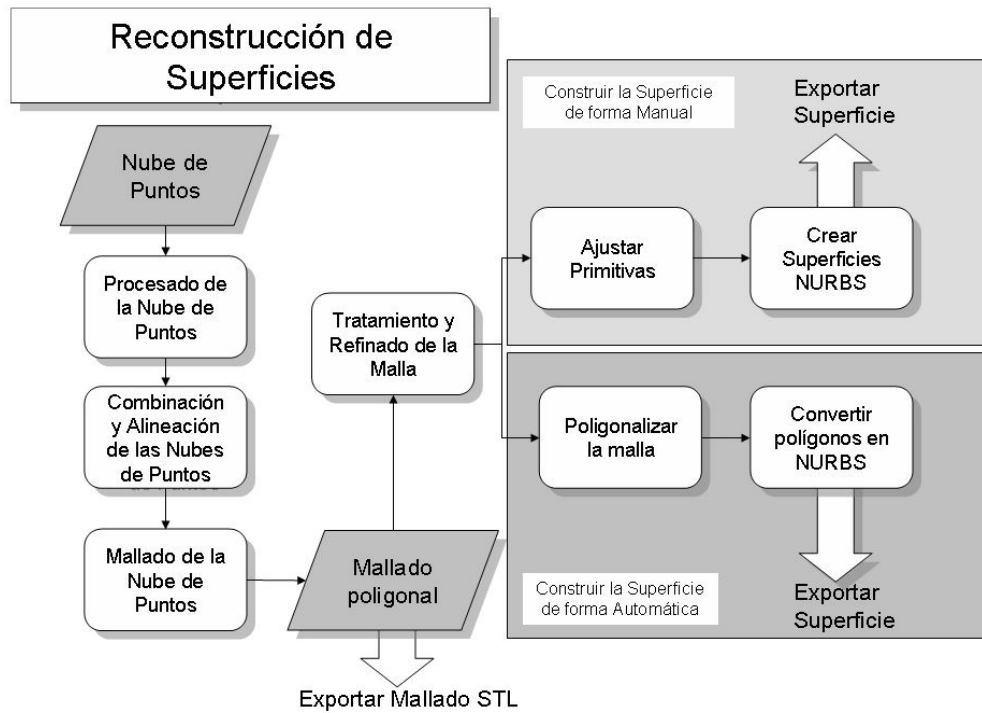


Fig. 11 – Ejemplo de metodología de creación de superficies en Ingeniería Inversa

4.1 TRATAMIENTO DE LAS NUBES DE PUNTOS

Una vez capturados los puntos en una o varias pasadas del sensor láser, y en el caso genérico, se tiene una “nube de puntos”. En esta etapa, cada fabricante de equipos LTS desarrolla su propio software de captura, por lo que no hay un formato estándar de nubes de puntos. Habitualmente el formato que mayor soporte tiene es el formato ASCII, todos los programas de captura permiten exportar las nubes de puntos en este formato, y es aceptado por todos los programas de reconstrucción.

La nube de puntos, es en esencia un conjunto de puntos más o menos denso, distribuidos no uniformemente sobre la superficie y sin existir un borde claramente definido. Pues no existen polilíneas, ni splines en los bordes. Además, debido a la difusión de la luz, reflexiones, etc. es habitual que aparezcan puntos fuera de los bordes reales, por encima de la superficie o incluso en el interior de lo que debería ser el material de la pieza.

Filtrado inicial

Parece necesario pues, hacer algunos tratamientos de las nubes de puntos con objeto de dejarla preparada para la “reconstrucción” o generación óptima de la superficie. El tratamiento habitual (fig. 12) consiste en el filtrado de la nube para eliminar puntos defectuosos. Hay puntos que se eliminan de forma manual. Son puntos erróneos claramente visibles que se encuentran fuera de la superficie de la pieza y que pueden ser seleccionados en pantalla y eliminarse directamente.

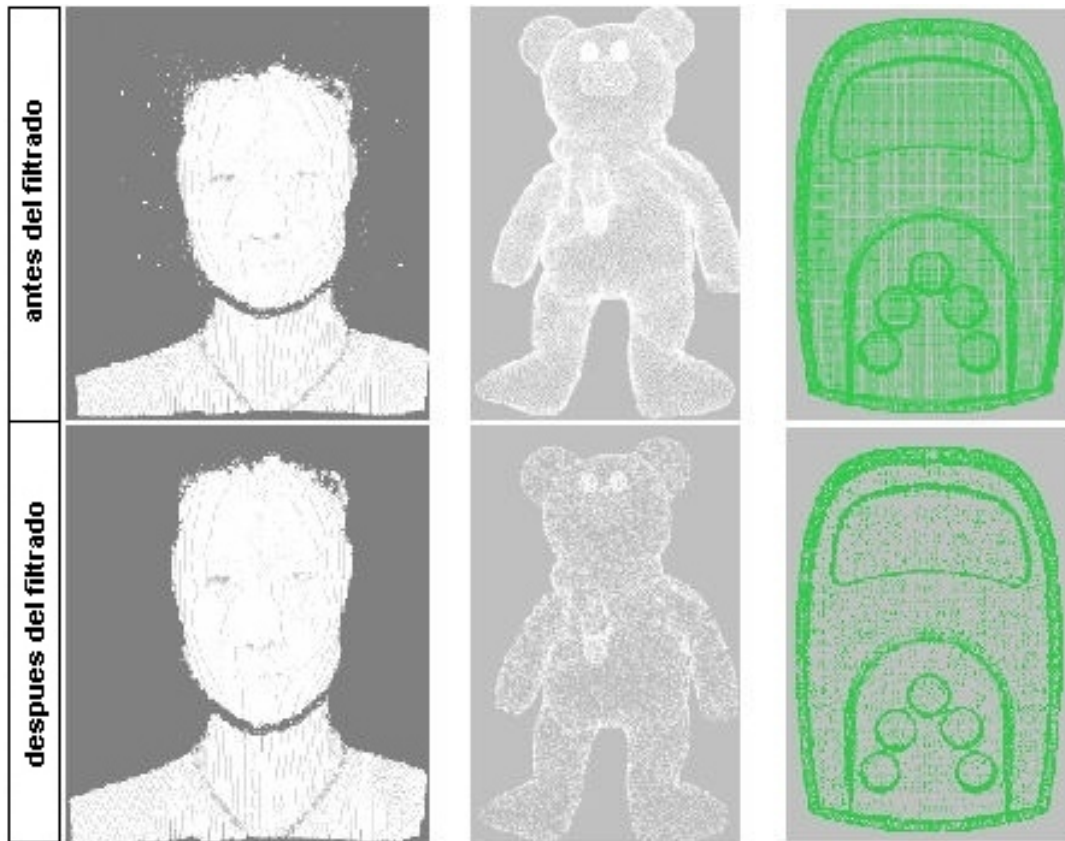


Fig. 12 - Distintos tipos de filtros: ruido, rejilla y por curvatura (RapidForm©)

Para eliminar otros puntos erróneos o innecesarios, se utilizan habitualmente distintos tipos de filtros:

- Filtro de Ruido: Este filtro se utiliza para eliminar puntos que provienen de errores en el digitalizado. Por ejemplo los reflejos de la superficie que crean puntos falsos. El filtro se basa en generar una esfera centrada en cada punto y eliminar los puntos que tienen menos de un número determinado de puntos adyacentes en esa esfera. El diámetro de la esfera es configurable por el usuario.
- Filtro de Rejilla: Este filtro se utiliza para tener una densidad homogénea de puntos sobre la superficie de la pieza, eliminando puntos redundantes. Funciona construyendo un conjunto de cubos en el espacio, de forma que el filtro se queda con un sólo punto en cada cubo. En este filtro se controlan las dimensiones del cubo: cubos grandes eliminan gran cantidad de puntos, y cubos pequeños eliminan menos puntos.
- Filtro por Curvatura: Este filtro funciona de manera similar al filtro de rejilla, eliminando más puntos en las áreas planas y menos puntos en las zonas con mayor curvatura. De esta forma no se pierden detalles en los bordes de la pieza.

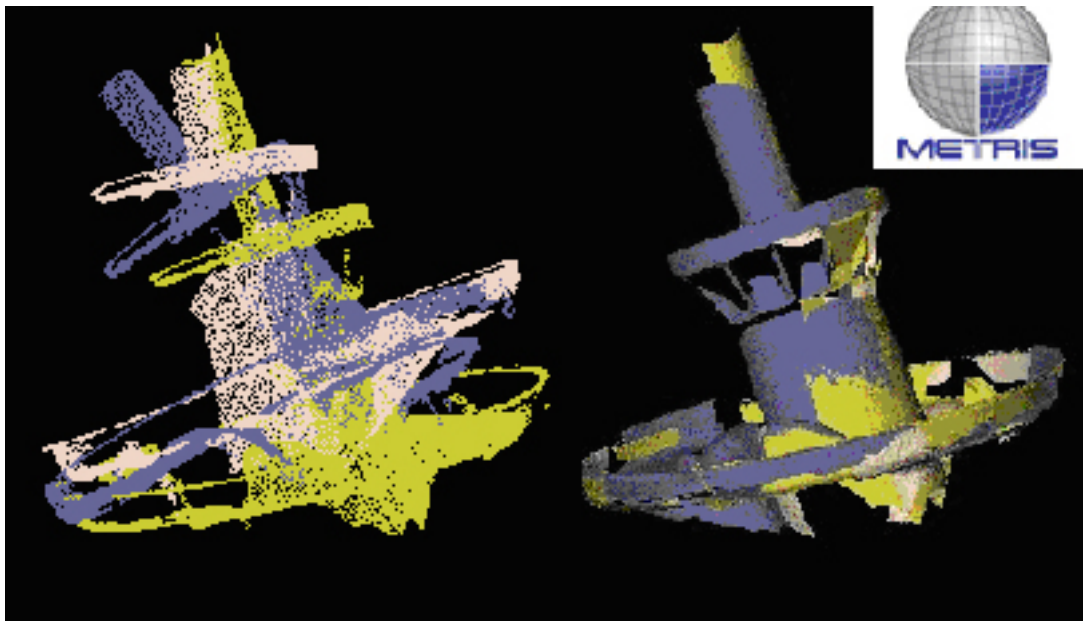


Fig. 13 - Unión y alineación de nubes de puntos en Metris©

Alineación y Ajuste de Nubes de puntos

Dependiendo del sistema de captura de puntos este proceso no siempre es necesario. Por ejemplo, en los sistemas de captura mediante cámaras fotográficas, basados en obtener fotografías de la escena desde distintos ángulos, siempre es necesario ajustar las nubes de puntos de cada foto a sola una que las incluya a todas. En cambio, para los sistemas de triangulación, sólo se realizan ajustes de nubes de puntos cuando ha sido necesario realizar varios digitalizados parciales con distintos amarres de la pieza o perdiendo la referencia entre los mismos. En el caso más simple, se tienen dos nubes de puntos con distinto sistema de referencia. Para realizar estas alineaciones existen diversas estrategias, siendo la más habitual colocar una serie (normalmente 3) de esferas físicas de referencia que se digitalizan en conjunto con cada nube de puntos (para cada amarre) de la pieza. Posteriormente, sólo es necesario hacer corresponder el centro de las esferas capturadas en cada digitalizado, quedando todas las nubes en un mismo sistema de referencia (fig. 13). Otro método es utilizar la propia geometría de la pieza buscando un triedro o superficie común en ambas nubes con el que alinear y definir la transformación de coordenadas.

Hay programas que realizan esta alineación de forma prácticamente automática, mientras que en otros es necesario que primero el usuario indique de forma aproximada que puntos hay que hacer coincidir entre ambas nubes, y después mediante algoritmos de tipo Best-Fit (mejor ajuste) se realiza un ajuste de ambas nubes por mínimos cuadrados.

Mallado de la Nube de Puntos

Previamente a la generación de la superficie directamente a través de la nube de puntos, es muy habitual realizar un "mallado" de la nube (fig. 14). Este proceso consiste en construir una malla, formada por triángulos (habrá uno cada tres puntos adyacentes) que se apoya en la nube de puntos. Cada software tiene su propio algoritmo de mallado, con un nivel aceptable de ajuste cuando se tratan superficies que presentan bordes afilados. En estos bordes, el mallado tiende a confundir una cara con la otra.

Esta malla triangular puede ser exportada, por ejemplo en formato STL, para ser utilizada en máquinas de prototipado rápido o incorporada a sistemas CAM que admitan este formato para obtener las trayectorias de mecanizado correspondientes.

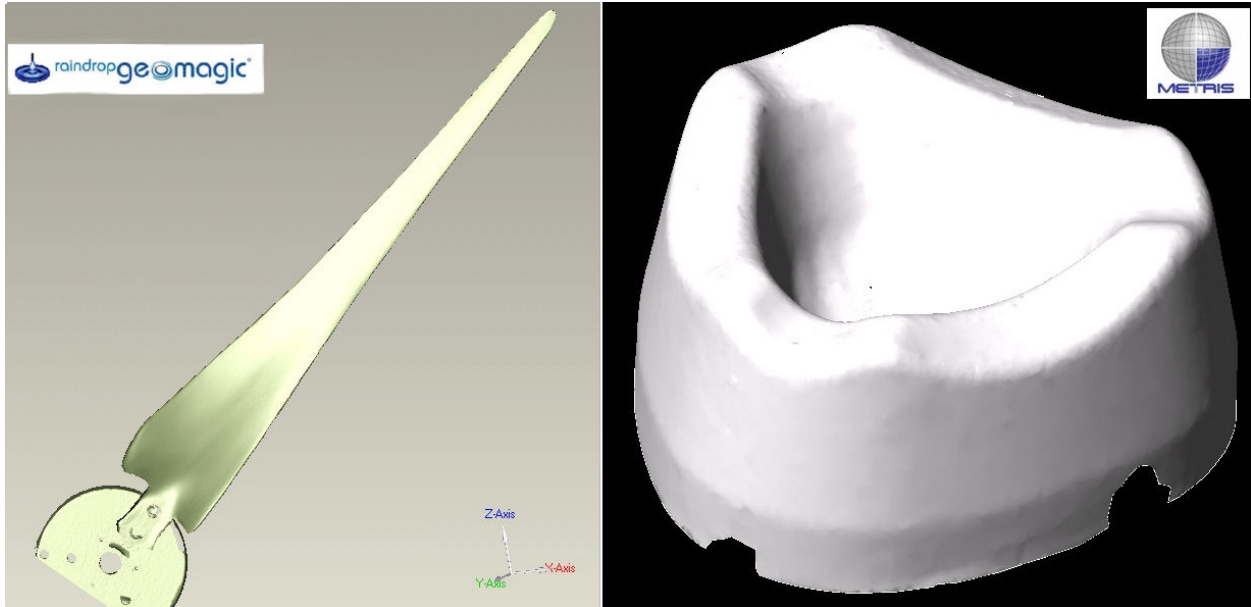


Fig. 14 - Ejemplos de mallados de piezas en Geomagic© y Metris©

Tratamiento y Refinado de la Malla

Los mallados no suelen ser perfectos y tienen una serie de errores dependiendo de la calidad (distribución homogénea) de la nube de puntos digitalizada. Entre los errores más habituales (fig. 15) están: agujeros en la malla, caras que se crean en zonas que deberían ser agujeros, picos y valles pronunciados, rugosidades, triángulos que se cortan o se superponen unos a otros, etc. Todos estos defectos impiden al software generar la superficie o provocan superficies erróneas (zonas adyacentes con normales invertidas, etc.).

Por esta razón los programas incorporan utilidades para tratar la malla. Las herramientas más típicas que incorporan son:

- Suavizar la malla: para eliminar los picos y rugosidades de la malla. Estas herramientas pueden funcionar de forma global sobre toda la malla o de forma local, sólo en determinadas zonas.
- Cerrar Agujeros: crea una malla de triángulos para cerrar huecos en el mallado debido a la ausencia de puntos en esas zonas.
- Crear y eliminar Triángulos
- Herramientas para escuadrar bordes

Para facilitar los cálculos en esta fase del proceso se suele “refinar” el mallado tratando de reducir el número de triángulos a utilizar y suavizando la transición entre ellos, de forma que se mejore el grado de continuidad de la curvatura.

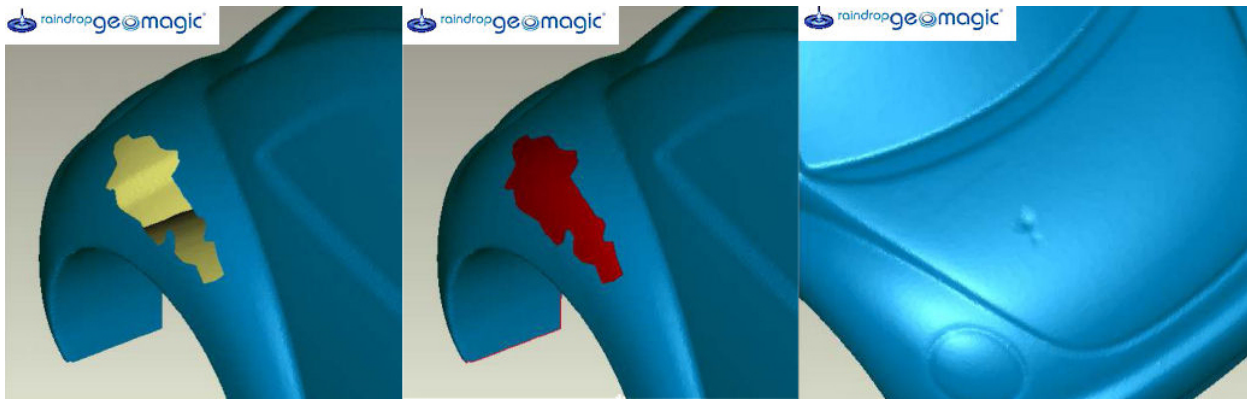


Fig. 15 - Defectos en el Mallado y Herramientas para corregir de Geomagic Studio

4.2. CONSTRUCCIÓN DE LAS SUPERFICIES

Una vez que se tiene una malla que recoge todas las formas de la pieza, y de la que se han eliminado todos los errores (picos, agujeros, triángulos erróneos, etc.), se pasa a la fase de la construcción de las superficies. Se distinguen dos sistemas: reconstrucciones manuales y automáticas.

Los métodos manuales de creación de las superficies son los que mejor se adaptan a la geometría de la pieza y son los que mejores resultados dan si no se tiene en cuenta el tiempo empleado. Se basan en generar la superficie de la pieza a base de parches con la forma que desea el usuario. Por ejemplo una superficie tipo NURBS, se puede construir a parte de cuatro splines contenidas en la superficie de la pieza. Estas splines son dibujadas por el usuario y se proyectan sobre la malla que representa la superficie de la pieza. Al ser el usuario el que decide las splines y el número de puntos de control de la superficie se puede conseguir un ajuste más o menos preciso entre el modelo CAD construido y la nube de puntos. Estos métodos manuales tienen el inconveniente de requerir mucha experiencia y tiempo en la construcción y elección de los parches para su ajuste sobre el mallado de la pieza.

Los sistemas automáticos que se están desarrollando actualmente evitan depender de la experiencia del usuario y reducen los tiempos de construcción del modelo CAD. Como todo sistema en desarrollo, los métodos y algoritmos implementados hasta el momento funcionan bastante bien con superficies sencillas, pero con superficies complejas cometen fallos que a menudo conviene revisar de forma manual. Otro problema que presentan es la forma de los parches, que no se corresponde con la forma con la que se diseñaría de forma manual la superficie (fig. 16). Si se pretende utilizar la pieza digitalizada como modelo para realizar cambios en el diseño de la pieza, resultará mejor construir la geometría CAD de la pieza de forma manual, y así disponer de más control sobre los parches y sus puntos de control.

Una vez obtenida la geometría CAD de la pieza, los programas de Ingeniería Inversa permiten exportar esta geometría a un formato neutro (IGES, ACIS, STEP,...), para su utilización en cualquier otro programa CAD.

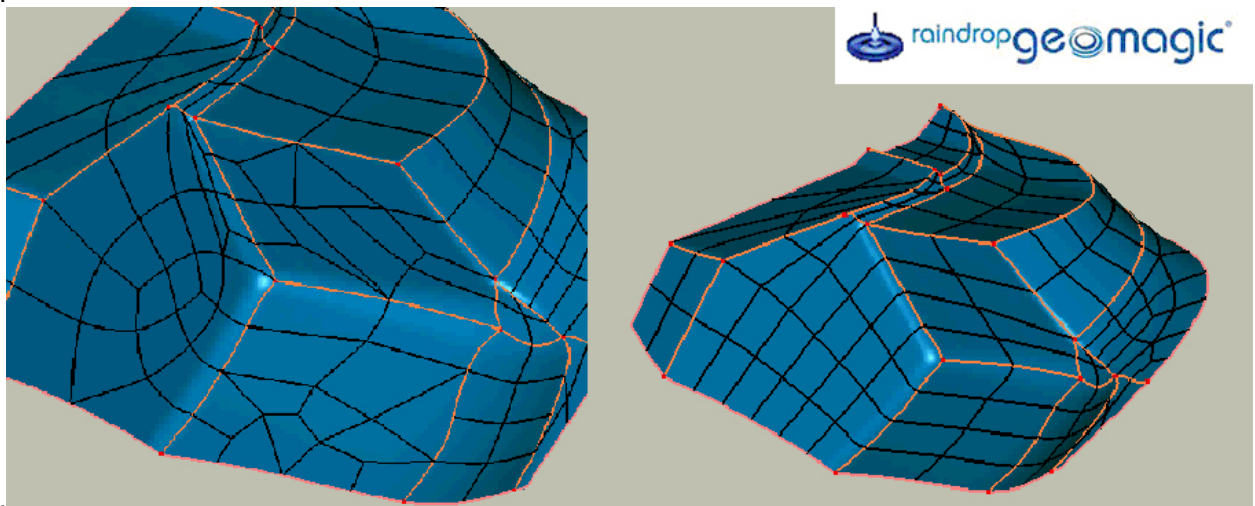


Fig. 16 - Creación de parches de forma automática y manual

4.3 APLICACIONES PARA INSPECCIÓN METROLÓGICA DE PIEZAS DIGITALIZADAS

Otra de las aplicaciones habituales de los láseres de barrido es la inspección dimensional y/o geométrica de las piezas. El software en este caso compara el modelo CAD original, con la nube de puntos que se obtuvo de la digitalización del modelo físico de la pieza, obteniendo las desviaciones de cada punto con respecto a su valor teórico sobre la superficie de la pieza.

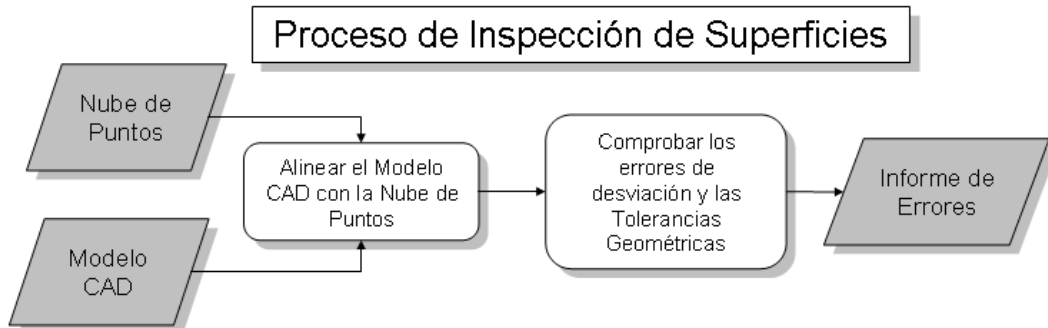


Fig. 17 – Metodología para la inspección por digitalizado

La fase más importante en este proceso (fig. 17) es la alineación del modelo CAD con la nube de puntos. Algunos sistemas tienen la opción de realizar esta alineación de forma automática, pero en la mayoría de las aplicaciones se necesita que el usuario interactúe con el programa. El usuario señala los puntos que se deben hacer coincidir. De esta forma se realiza un primer ajuste manual de la nube de puntos y el modelo CAD. Después, mediante un algoritmo de mínimos cuadrados se ajustan ambos elementos de manera que se minimizan las desviaciones.

Este tipo de comparativa (fig. 18) se engloba en lo que se denomina “Virtual CMM”, o Máquina de Medir Virtual, ya que la inspección no se realiza sobre la pieza real sino sobre la nube de puntos que representa dicha pieza.

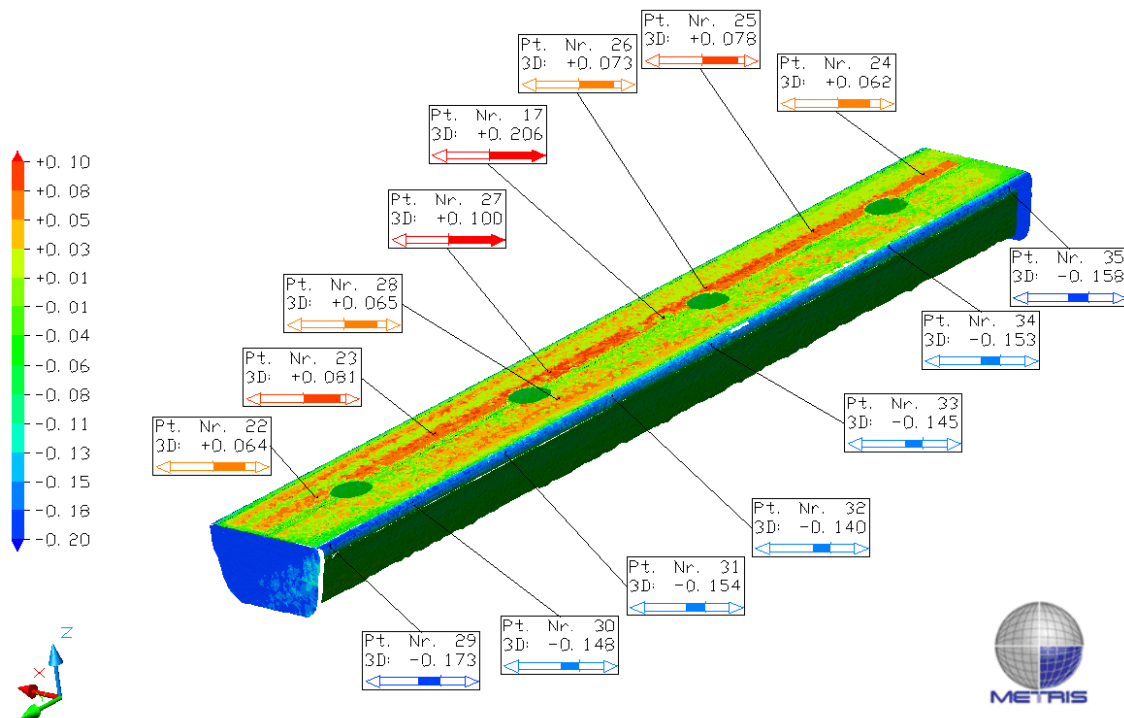


Fig. 18 – Comparativa entre un perfil digitalizado con Metris y su modelo CAD (CADCompare©)

Otra línea de trabajo existente es la basada en medir características primitivas sin utilizar superficies reconstruidas, directamente sobre la nube de punto. Se denomina, análogamente al termino anterior, *máquina virtual de medición* o *MMV*. Las características con las que trabajan estas aplicaciones son del tipo: diámetros de agujeros, dimensiones de cilindros y esferas, distancias entre planos, profundidades y espesores de chapa, radios de redondeo, etc. Para medir estas características el usuario selecciona la parte de la nube de puntos que representa o engloba la característica. El software se encarga de crear el elemento matemático (puede ser una distancia, un círculo o un cilindro, etc.) que mejor se ajuste a la nube de puntos.

Las limitaciones de este sistema de medición vienen impuestas por la calidad del digitalizado y la precisión de la adquisición de los datos (según la geometría a capturar), así como por el algoritmo que se utilice. En la figura 19, por ejemplo, puede observarse como para un agujero, la precisión de la medida depende, por un lado, de la precisión del sistema (para el sensor Metris LC50, del orden de 20 μm) y del error que se comete debido a la distancia mínima entre puntos del borde, ya que no se pueden capturar exactamente los puntos límite del borde por tratarse de una adquisición discreta de puntos (en este caso puntos con una distancia mínima entre ellos de 0,01 mm). Además, debemos asegurarnos de que la nube de puntos cubra la mayor parte de la longitud del borde que defina la característica. Debe tenerse en cuenta también el aporte que hace a la precisión del sistema, el algoritmo implementado en la aplicación, puesto que éste debe ser capaz de discriminar, p.e., dentro de los puntos que forman parte del borde de un agujero, cómo se utilizarán para construir el diámetro: mayor círculo inscrito, circunscrito, círculo medio, etc.

Cuando este tipo de sistemas de medida sin contacto se implanta en la línea de producción (gracias a la alta velocidad de captura), el concepto de la maquina de medir virtual (MMV) puede pasar a formar parte

de los sistemas de Ingeniería Concurrente, Calidad total, etc; ya que permite tener un modelo electrónico de cada una de las piezas, aportando trazabilidad metrológica inmediata y completa (a toda la producción), con las ventajas que esto supone de control de fallos, tendencias de fabricación, desgaste de herramienta, etc.

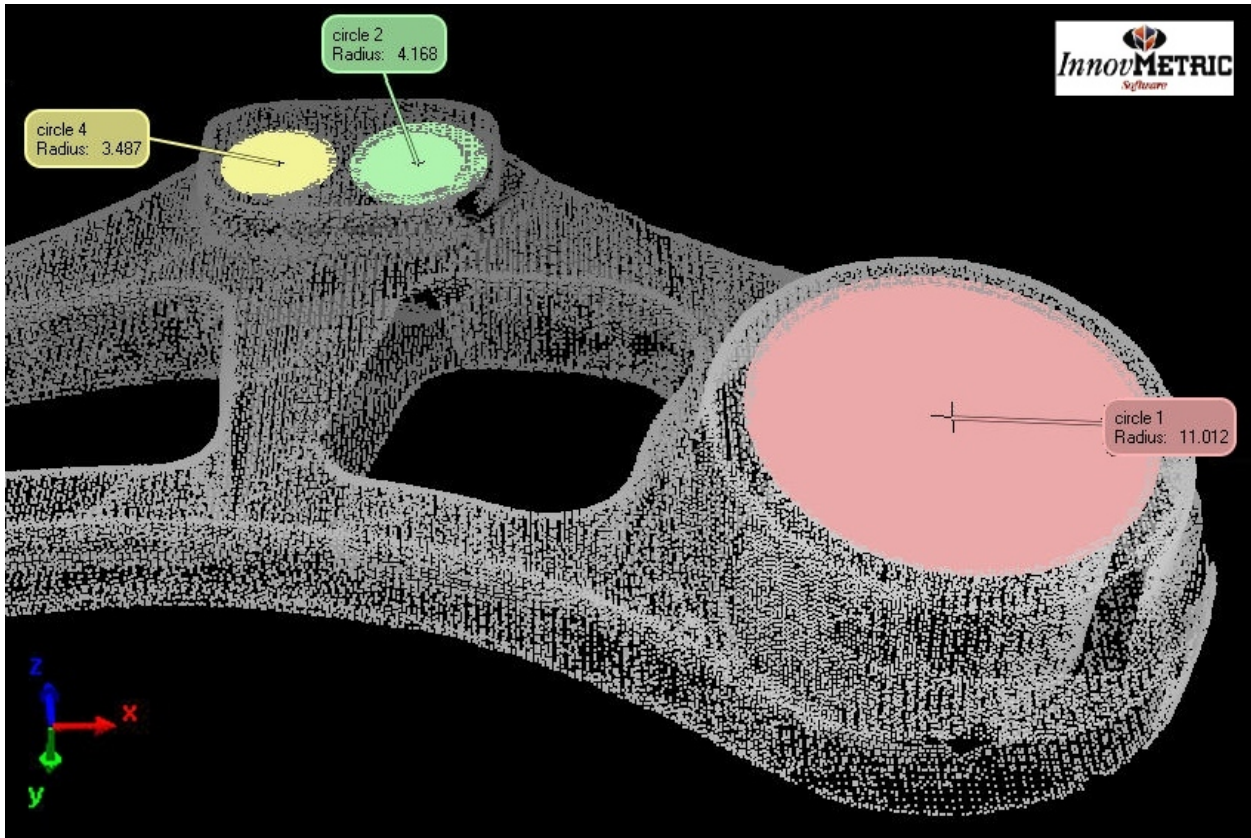


Fig. 19 – Identificación geométrica de agujeros sobre nube de puntos

4.4. SOFTWARE PARA INGENIERÍA INVERSA

Desde un punto de vista comercial y analizando el entorno actual, existen varios fabricantes y desarrolladores importantes de software para Ingeniería Inversa (con aplicación posterior a la inspección sin contacto), algunos de ellos se dedican en exclusiva a este tarea, pero no debe olvidarse que muchos programas de CAD/CAM/CAE de altas prestaciones, como CATIA, Unigraphics, ProEng, etc. ya incorporan módulos específicos de “reverse engineering”, “digitalizing”, “pointcloud module”, etc. y son capaces de generar superficies y realizar las operaciones que hemos visto de tratamiento de nubes de puntos. Dentro del otro grupo de desarrolladores mas “específicos”, que en algunos casos se dedican en exclusiva a la Ingeniería Inversa, se muestran algunos de los mas difundidos en la figura 20.

Aplicaciones para Ingeniería Inversa	Reconstrucción de Superficies	Comparación de la Nube de Puntos con el modelo CAD	Herramientas de Medición
 www.metris.be	Metris Surface	Metris CADCompare	Metris Base
 www.delcam.com	CopyCad	PowerInspect	PowerInspect
 InnovMETRIC <i>Software</i> www.innovmetric.com	PolyWorks	PolyWorks	PolyWorks ImInspect
 www.rapidform.com	RapidForm	RapidForm XO Verifier	-
 www.geomagic.com	Geomagic Studio	Geomagic Qualify	-

Fig. 20 – Ejemplos de aplicaciones específicas para Ingeniería Inversa

5. CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACION

A pesar de todos los inconvenientes vistos hasta ahora, tales como la falta de precisión, metodología de trabajo complicada, altos requisitos de computación (tratamiento de millones de puntos), etc. parece claro que las líneas futuras de investigación pasan por mejorar el soporte técnico (el sensor) y por dotar al mismo de un software abierto, flexible y potente.

En lo que respecta a la mejora de los sensores LTS, las líneas de investigación ya se están traduciendo en nuevos dispositivos con más cámaras (CCD, PSD) y/o con más cortinas láser. Además, aún en los sistemas simples, de una cortina láser y un solo detector, se aumenta la rapidez de captura, se estudian nuevos filtros, nuevos modos de acoplar la pulsación del rayo incidente y el reflejado, etc. de forma que se reduzcan los errores, haciendo menos sensible estos instrumentos al estado superficial de la pieza.

En lo que respecta a los programas para inspección e ingeniería inversa, ha quedado claro que una vía importante de desarrollo e innovación va por el camino abierto con el concepto de la Máquina de Medir Virtual (MMV), mencionado anteriormente. Pero además, deben contemplarse también las aplicaciones destinadas a la generación automática de digitalizados y las más ambiciosas: las destinadas a la generación automática de planes de inspección que contemplen el reconocimiento automático de características, definición de tolerancias, evaluación de tendencias en producción (SPC), etc.

En esta última línea es donde se enmarca la investigación de los autores del presente artículo. Se trata de obtener una aplicación de inspección automatizada orientada al sistema MMC con sensor láser. La aplicación permitirá la generación automática de trayectorias de digitalizado de forma que se digitalice toda la pieza (evitando oclusiones), minimizando los errores y optimizando el tiempo y el recorrido necesario de captura. Aunque las técnicas de digitalizado láser ya se aplican en algunas empresas,

muchas de las operaciones se realizan todavía manualmente y cuando se hacen de forma automática se utilizan programas que no ayudan al usuario a elegir los parámetros de proceso, ni las estrategias de trabajo de cara a conseguir un digitalizado más eficaz. Por estas razones, la investigación se inicia analizando los parámetros del sensor y variables de influencia (forma de la pieza, ángulos de visión, luz ambiente, acabado superficial, etc.) con el fin de elaborar una metodología de trabajo y permitir el desarrollo de un sistema de planificación.

La planificación incluye la obtención de las orientaciones válidas (evitando oclusiones) de digitalizado para una superficie compleja, así como del número de operaciones (barridos) necesarias y las trayectorias finales de digitalizado. Téngase en cuenta que para minimizar los errores debe digitalizarse lo mas perpendicular posible y, cuando el digitalizado tenga que ser realizado con un cierto ángulo, sería deseable dar la "calidad" de cada punto capturado. En todos los casos se consideran las posibles orientaciones del cabezal láser, que están libres de colisión, garantizan la visibilidad de la zona a digitalizar, y al mismo tiempo sean compatibles con las restricciones impuestas por los parámetros del proceso.

En la figura 21, se muestra la metodología seguida por un sistema como el descrito: se parte de un modelo CAD, este modelo es tratado (exportado) a formato de estereolitografía (STL), que lo traduce en triángulos que se ajustan bastante bien a la superficie y nos permite conocer la normal a la superficie en cada triángulo. Esta normal a cada triángulo, es la que coincide con la dirección óptima de digitalizado.

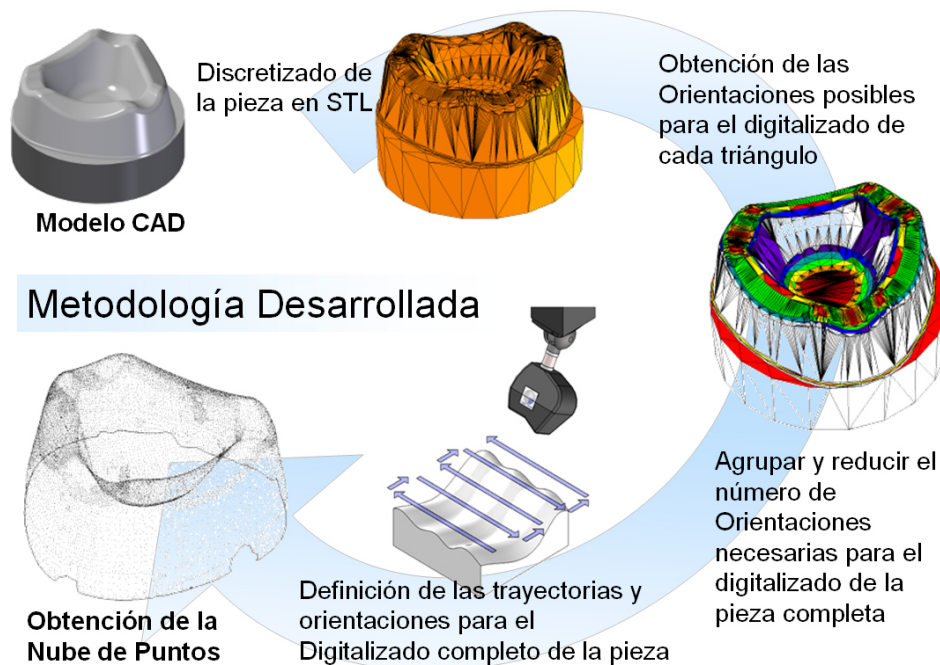


Fig. 21 – Funcionamiento de un sistema automático para generación de trayectorias de digitalizado

De forma resumida, el proceso de planificación automática tiene en cuenta una serie de factores (además de los puramente geométricos), tales como:

- el ángulo límite de visión de la pieza con respecto a cada orientación del cabezal,
- las posibles oclusiones del haz,
- el tamaño del campo de visión del sensor y
- las colisiones del cabezal con la pieza.

Estudiando todos estos factores para cada triángulo que representa el modelo CAD, se obtiene el conjunto de orientaciones desde las que es posible digitalizar cada uno de ellos. En la siguiente fase se intenta reducir el número de orientaciones necesarias, pero de forma que permitan digitalizar la superficie completa. Esto se hace agrupando los triángulos que presentan orientaciones comunes y tratándolos como subconjuntos. El resultado final de este proceso es un reducido número de orientaciones del cabezal que permiten digitalizar la pieza por completo. De esta manera, para cada orientación "optimizada" se obtiene un conjunto de triángulos asociados. El proceso concluye generando las trayectorias de cada una de dichas orientaciones optimizadas (fig. 22).

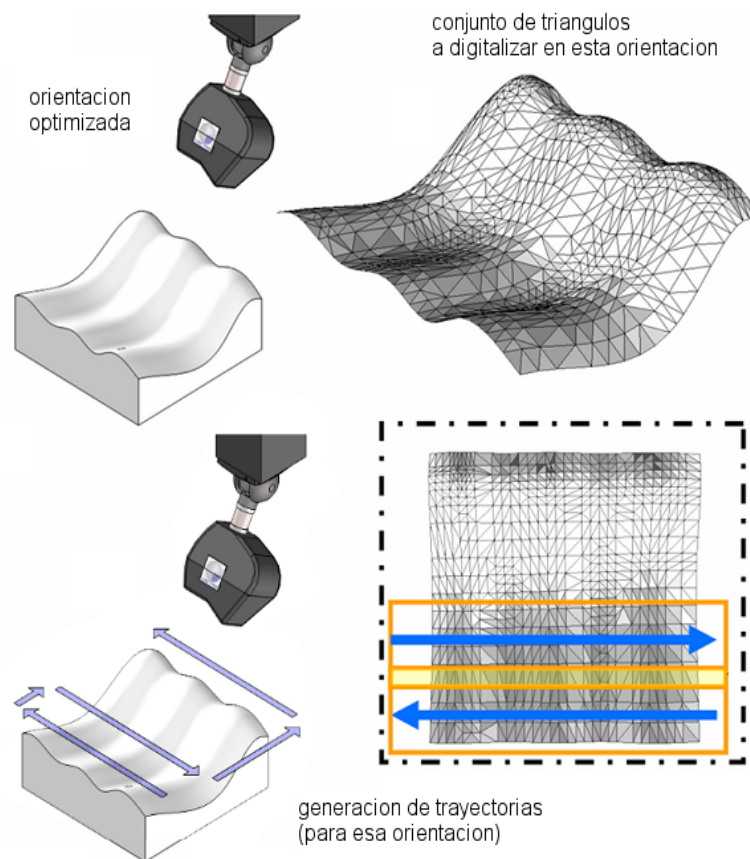


Fig. 22 – Fases para la definición de las trayectorias de digitalizado

Una asignatura pendiente de este tipo de tecnología, sobre todo cuando se requieren buenas precisiones de digitalizado (error total $< 20 \mu\text{m}$), es la rentabilidad del equipo. El problema radica en que los equipos LTS de precisión requieren ser instalados sobre un sistema "portable" (MMC, Brazo de medición, Robot, manipulador o similar), por lo que debe sumarse el coste de este equipo al del propio sensor, sin olvidarnos del coste añadido del software (normalmente el menor de los tres conceptos). Otro de los problemas que faltan por resolver, y en los cuales se está trabajando asiduamente por parte de equipos de investigación junto con desarrolladores, es la calibración y trazabilidad de estos equipos. Por ahora

los fabricantes solo realizan “cualificaciones” o caracterizaciones del funcionamiento óptimo del sistema con esferas calibradas, pero no se trata de procedimientos que garanticen la precisión y la trazabilidad. En parte esto es debido a dos razones, por un parte, al elevado número de variables que hay en juego (como hemos visto en apartados anteriores) y por otra, a que este tipo de sistemas estaban hasta hace poco muy orientados a capturas “no metrológicas”, como la ingeniería inversa con aplicaciones en animación, infografía, medicina, conservación de arte y patrimonio histórico, etc.. Esto justifica en parte el hecho de que no exista una normativa, en versión avanzada, relacionada con la calibración de este tipo de sistemas. La trazabilidad debe estudiarse para cada caso, considerando el equipo láser como parte de un sistema más global de inspección.

Es de esperar que parte de la innovación que aparezca en los próximos años incida en la línea de la trazabilidad y otra parte en la línea de rebajar los costes. Esto último puede llevarse a cabo, por ejemplo, normalizando los sensores y sus parámetros de forma similar a lo que sucede con los palpadores por contacto, con los formatos de intercambio de nubes de puntos, etc. De esta forma, será factible, en un futuro próximo, que aparezcan “sensores de taller”, con posibilidad de ser montados sobre maquina herramienta de arranque de viruta o de conformado de chapa, (p.e. para estudiar dimensiones, defectos en bordes, desgaste en la geometría de piezas punzonadas, etc.) y comunicando no sólo los puntos capturados sino los valores resumidos de la inspección al Control Numérico o al software de control disponible.

Esta normalización y homogeneización de equipos, puede parecer que provocaría una cierta atomización de empresas dedicadas a los sistemas LTS, aumentando la competencia para las actuales. Sin embargo, estos cambios, lejos de suponer un perjuicio, pueden significar una ventaja pues también se aumentarían enormemente los clientes potenciales de esta tecnología.

Las técnicas de digitalizado láser por triangulación siguen siendo todavía una tecnología en cierta medida desconocida y de dudosa rentabilidad vista desde el exterior. Esto es debido en parte a que los sensores láser presentan un problemática específica que les resta precisión, requieran equipos con inversión elevada, y personal muy cualificado (tanto en su operativa manual como en lo relativo a su software). Aún así, debe decirse que esta tecnología consigue la suficientemente precisión para multitud de aplicaciones metrológicas y que además, la rapidez y capacidad de captura masiva de puntos, junto con lo compactas, portátiles y robustos que empiezan a ser estos equipos, los hacen muy ventajosos frente a otros sistemas de inspección tradicionales, sobre todo en inspección on-line.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto de investigación titulado “*Planificación del proceso de digitalizado de superficies complejas utilizando maquinas de medir por coordenadas con tecnología láser*” financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y cofinanciado con fondos FEDER (CICYT, ref. DPI2004-03517)

7. REFERENCIAS

- [1] Brian Curless, Marc Levoy. “*Better optical triangulation through Spacetime Análisis*”. International Conference on Computer Vision, Vol 5. 1995.
- [2] Claus P. Keferstein, Michael Marxer. “*Testing bench for laser triangulation sensors*”. Sensor Review, Vol 18 nº 3, 1998.
- [3] Dorothee Hüser, Hendrik Rothe. “*Robust averaging of signals for triangulation sensors*”. Measurement Science and Technology Vol. 9, No. 7, IoP - Electronical Journals, 1998.
- [4] F. Xia, C. Shu. “*CAD-based path planning for 3-D line laser scanning*”. Computer-Aided Design, vol. 31, pag. 473-479, 1999.
- [5] Martin Dumberger, Micro-Epsilon America. “*Taking the Pain out of Laser Triangulation*”, <http://www.sensorsmag.com/articles/0702/laser/>
- [6] J.C. Rico, P. Fernández, E. Cuesta, G. Valiño y S. Mateos. “*Evaluación de los parámetros de influencia en el digitalizado por láser de barrido sobre una MMC*”, Actas del 3^{er} Congreso Español de Metrología (CEM), Zaragoza 2005.
- [7] J.C. Rico, P. Fernández, E. Cuesta, D. Blanco, C.M. Suárez. “*Establecimiento de una metodología de trabajo para el digitalizado mediante un láser de barrido sobre MMC*”. Actas 1^{er} Congreso Internacional de Ingeniería de Fabricación CIIF-MESIC, Calatayud 2005.
- [8] J. Santolaria, J. Puertas, M.A. Lope, J.J.Aguilar. “*Análisis de precisión de Sensores Láser por Triangulación: Aplicación a la digitalización de Superficies*”. Actas del 1^{er} Congreso Internacional de Ingeniería de Fabricación CIIF-MESIC, Calatayud 2005.
- [9] Son, Seokbae; Park, Hyunpung; Lee, Kwan H. “*Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection*”. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 42, pag. 889-897, 2002.