

3DMP_{ro}: VISIÓN ARTIFICIAL 3D PARA LA INSPECCIÓN SUPERFICIAL DE BARRAS COMBUSTIBLES



JESÚS CASTAÑO-MARCOS

Ingeniero de Desarrollo de Equipos
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A., S.M.E.



ÁLVARO BAS MOLINA

Ingeniero de Desarrollo de Equipos
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A., S.M.E.



MARCOS ESPADA MORALES

Ingeniero de Desarrollo de Equipos
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A., S.M.E.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El proceso de fabricación de barras combustibles requiere de unas inspecciones exhaustivas con el fin de evitar posibles fallos debido a la operación en los reactores, como fugas de material radiactivo (uranio y otros productos de fisión) en el circuito primario y, en consecuencia, pérdida de productividad y aumento de riesgo radiológico. En particular, en la inspección visual de la superficie de la misma, existen unos requisitos de calidad muy exigentes en cuanto a entallas, hendiduras y poros, defectos, etc. El requisito más restrictivo se da en ciertas barras combustibles, en las que la máxima profundidad permitida de un defecto es de 25µm y 2mm² de superficie [1].

Actualmente, en el proceso de fabricación, la forma convencional de comprobar que estos requisitos de calidad se cumplen, es mediante una inspección visual de la totalidad de la superficie de la barra por parte de un inspector cualificado. Este inspector, subjetivamente, aunque con la ayuda de patrones visuales y una formación exhaustiva, inspecciona la superficie de las barras y las selecciona como aceptadas o rechazadas en función de los defectos encontrados. La inspección manual, como es lógico, carece de la precisión necesaria para la caracterización de los defectos en profundidad y área, pese a que los inspectores son ca-

paces de detectar defectos que al resto de personas no cualificadas pasarían inadvertidos. Otra forma de identificar si la barra tiene o no defectos y dónde se encuentran a lo largo de la misma, sin caracterización de estos, es mediante equipos de Corrientes Inducidas. En la actualidad, con estos sistemas se han llegado a detectar defectos con una profundidad de aproximadamente 50µm, pero sin poder caracterizarlos en profundidad a lo largo del defecto, área y orientación, dada la precisión de estos equipos.

Es generalizado el interés mostrado por la industria de fabricación de combustible nuclear en una tecnología capaz de caracterizar automáticamente defectos en la superficie de la barra combustible con la precisión requerida (del orden de las 25 µm). Esta permitiría eliminar tareas repetitivas y tediosas, susceptibles de errores humanos, donde además, la fatiga visual es muy elevada y la dosis acumulada recibida por los inspectores es de las más altas del proceso de fabricación. Adicionalmente, no se tiene constancia de ningún sistema que realice la inspección de la totalidad de la superficie de la barra de forma automática, fiable y ofrezca información de la caracterización en profundidad de los defectos encontrados con la suficiente precisión.

En ENUSA se ha identificado esta necesidad y desde hace dos años se ha venido investigando en un sistema que la

resuelva. Actualmente, se está en disposición de ofrecer y presentar unos buenos resultados de un sistema para la inspección automática de la superficie de la barra combustible nuclear sin irradiar (PWR y BWR), que permite detectar, localizar y caracterizar en ancho, largo y profundidad sus defectos. Estos resultados se pueden trasladar directamente a la inspección de tubos (barras sin material nuclear en su interior) y, con ciertas modificaciones, a la inspección de tubería en general.

TECNOLOGÍA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS. PERFILOMETRÍA LÁSER 3D

El problema se divide en dos partes, por un lado la adquisición de datos y por otro su tratamiento de cara a la obtención de resultados. Para la adquisición de datos 3D existen multitud de tecnologías, aunque después de varias pruebas e investigaciones se concluyó que la más adecuada, en este caso, era la obtención de una nube de puntos mediante tecnología de triangulación láser 3D.

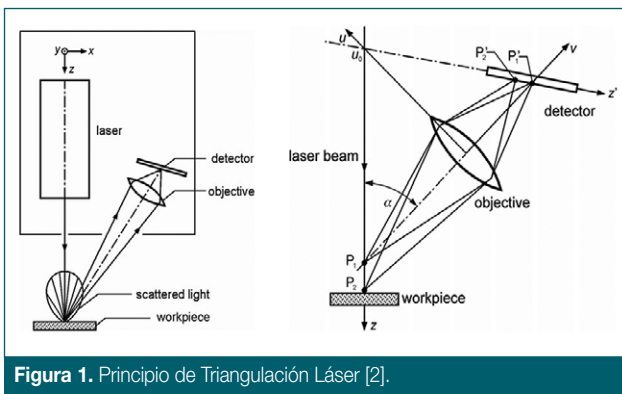


Figura 1. Principio de Triangulación Láser [2].

Principio de Triangulación Láser [2][3][4].

La Figura 1 muestra el principio de triangulación láser. Este consiste en dirigir un rayo láser a una pieza de trabajo, en la cual la luz se dispersa en el lugar en el que el haz irradia el objeto de medición. Esta dispersión de luz se utiliza posteriormente para observar el punto de intersección. En el caso general, el comportamiento de la dispersión depende de las propiedades del material de la pieza de trabajo, la estructura o textura de la superficie del objeto y la longitud de onda del láser. Mediante el uso de un objetivo y un detector (CCD o CMOS) se obtiene una imagen del punto de luz en el punto de intersección del haz, a través de un ángulo dado y conocido.

Triangulación Láser para la adquisición de una nube de puntos [3][4]

La Figura 2 muestra la extensión a 2 dimensiones mediante la irradiación del objeto por una línea láser para obtención de contornos, y la extensión a 3 dimensiones por medio del movimiento relativo de la línea láser con respecto al objeto a medir para la obtención de superficies o nubes de puntos. Este último caso es el que se ha utilizado en la aplicación que se presenta.

A no ser que la aplicación sea muy específica, en la actualidad, el conjunto formado por la fuente láser, la óptica y el detector, se suministra como un único elemento/com-

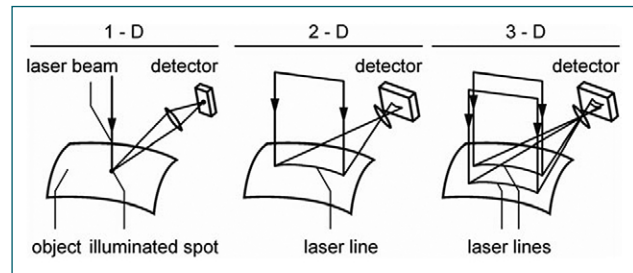


Figura 2. Triangulación Láser 1D, 2D y 3D [3].

ponente, ya calibrado, ajustado y suficientemente robusto y estable desde un punto de vista mecánico. A esos conjuntos, algunos de ellos con software propio y tarjeta electrónica de adquisición incorporada, se les conoce con el nombre de perfilómetros (o sensores de triangulación) láser 3D (ver Figura 3 izquierda).

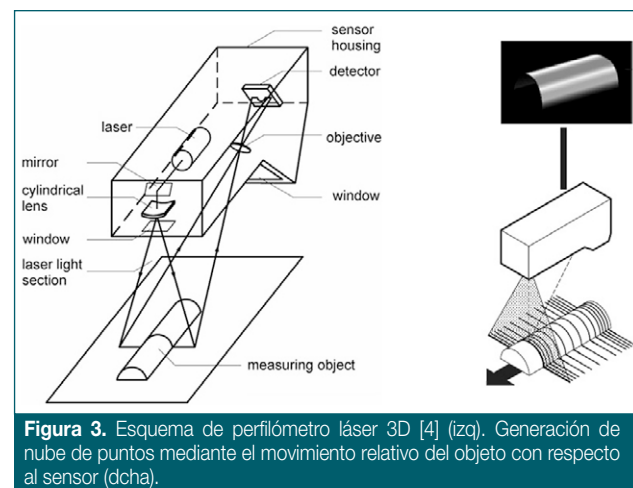


Figura 3. Esquema de perfilómetro láser 3D [4] (izq). Generación de nube de puntos mediante el movimiento relativo del objeto con respecto al sensor (dcha).

Un perfilómetro láser 3D obtiene el perfil del objeto a medir en cada instante de tiempo (véase Figura 3 izquierda). Para conformar la nube de puntos correspondiente a la superficie del objeto completo, en este caso el tubo/barra, se necesita de un movimiento relativo entre el perfilómetro y el objeto. Con ello, y a una frecuencia de muestreo determinada, se adquieren perfiles a lo largo del tiempo (véase Figura 3 derecha) que conformarán la nube de puntos de la superficie del objeto.

PROTOTIPO DE PRUEBAS

En el desarrollo del sistema ha sido necesario fabricar un prototipo para realizar las pruebas. Este prototipo se ha diseñado simulando la inspección de las barras combustibles en la propia línea de fabricación, de tal forma que la adquisición de la nube de puntos y el tratamiento de los datos se realicen en tiempo real y a una velocidad suficiente.

El prototipo, basado en los equipos de transferencia de barras que ENUSA tiene en su fábrica ubicada en Juzbado (Salamanca), consta de 4 partes principales esquematizadas en la Figura 4.

1. Sistema tractor de barras. Compuesto por una serie de ruedas y rodillos, sobre los que se apoya la barra y, que movidos por un motor eléctrico, desplazan la barra linealmente en la dirección del eje del cilindro que la conforma.

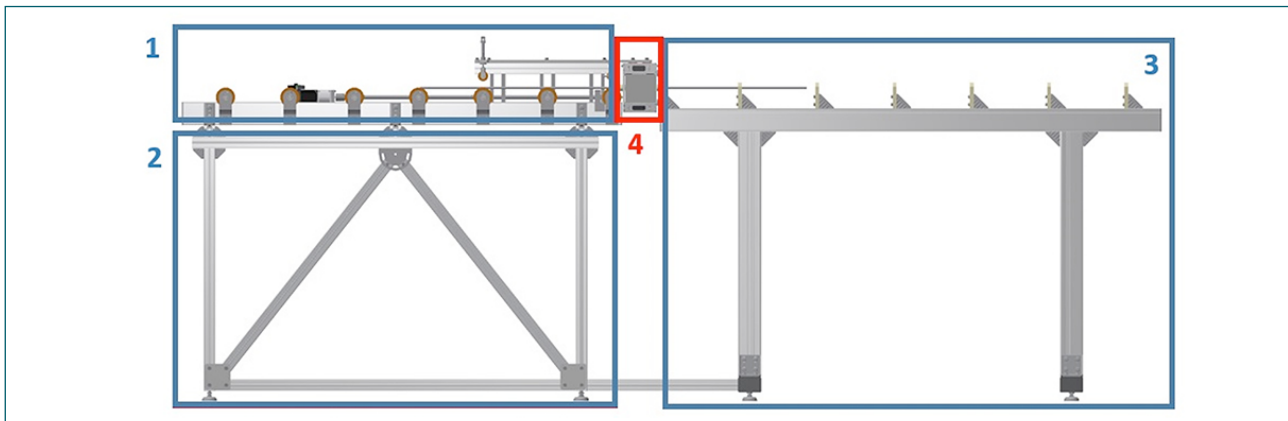


Figura 4. Prototipo de pruebas.

2. Mesa de apoyo del sistema tractor de barras.
3. Receptor de barras. Sistema formado por una serie de placas de *nylon* taladradas para alojar la barra a medida que es desplazada.
4. Conjunto de perfilómetros para la adquisición de datos.

Gracias a este prototipo, se ha desarrollado la mayor parte de la aplicación de tratamiento y análisis de los datos, ya que se permite variar las características de la inspección según se desee, eligiendo las más óptimas (velocidad, posición de los sensores, etc.).

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Para la obtención de los datos correspondientes a la superficie de la barra se han utilizado varios sistemas de adquisición con una configuración determinada, de tal forma que se obtiene la nube de puntos de los 360° de la superficie de la barra (Figura 5, izquierda).

Los datos sin procesar se obtienen y, posteriormente, son tratados mediante un conjunto de algoritmos de visión artificial 2D y 3D [5], en tiempo real, con el objetivo de que la barra sea rechazada o aceptada justo después de finalizar la

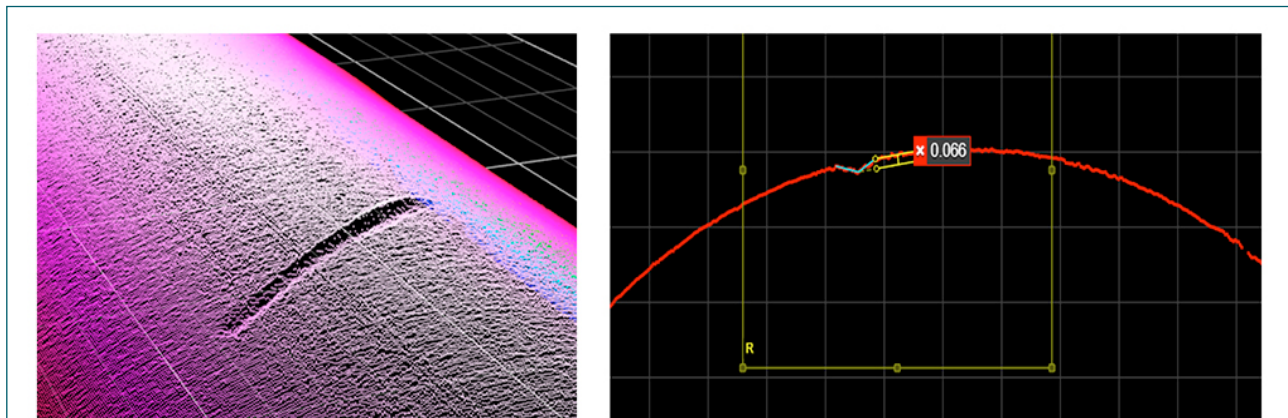


Figura 5. Visión 3D de defecto de 70 µm de profundidad y 3mm de longitud (izq). Medición de profundidad de defecto (dcha).

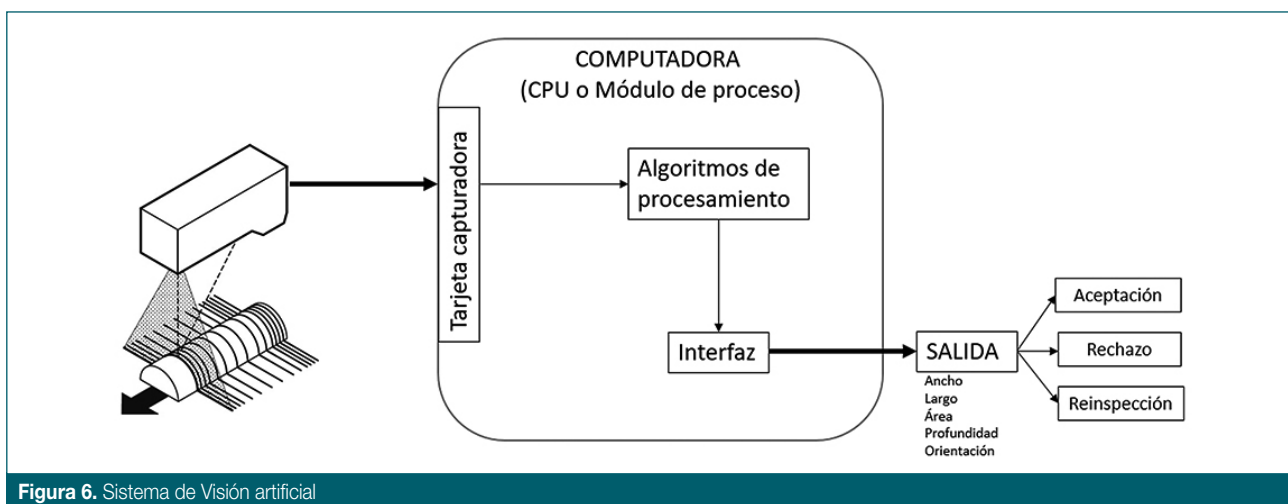


Figura 6. Sistema de Visión artificial

inspección automática (Figura 6). Además de la clasificación de la barra en aceptada o rechazada, se obtiene la posición en la que se encuentran los defectos (si los hay), así como sus características geométricas: ancho, largo, área, inclinación con respecto al eje y profundidad máxima.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El sistema desarrollado permite inspeccionar, en el prototipo de pruebas, un tubo patrón fabricado *ad hoc* para comprobar la bondad/fiabilidad/repetitividad de la inspección a una velocidad de 200 mm/s. Este patrón consiste en una tubo idéntico a los empleados en producción, en el que se han realizado una serie de defectos de forma artificial mediante electroerosión, y que posteriormente se han caracterizado y certificado geométricamente mediante microscopía electrónica.

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el uso del prototipo frente a los reales de algunos de los defectos artificiales del patrón.

A la vista de los resultados de la Tabla 1, se puede concluir que el sistema es capaz de detectar y caracterizar defectos de 30 μm con errores máximos de $\pm 5 \mu\text{m}$. Por ello ENUSA está en disposición de industrializar, mediante la tecnología

presentada a lo largo del artículo, un equipo capaz de detectar y caracterizar geométricamente defectos tales como poros, entallas, rayaduras y fisuras. Todo ello de forma automática y a una velocidad suficiente (200 mm/s) en la línea de producción.

A finales de este año 2022 se espera poder tener el equipo listo para su instalación en la línea de producción, e iniciar las pruebas de cualificación con producto real.

REFERENCIAS

- [1]. ASTM B 811-02(2007). Standard Specification for Wrought Zirconium Alloy Seamless Tubes for Nuclear Reactor Fuel Cladding.
- [2]. A. Lamott, R. Noll, Laser triangulation, in Tailored Light 2, Laser Application Technology, Chapt. 19.1, ed. by R. Poprawe (Springer, Berlin Heidelberg, 2011), pp. 473–486. ISBN 978-3-642-01236-5.
- [3]. DIN 32 877: 2000-08, Optoelectronic measurement of form, profile and distance, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany, August 2000.
- [4]. Donges, A., & Noll, R. (2015). Laser Measurement Technology (Vol. 188). Springer Berlin Heidelberg.
- [5]. Burger, W., & Burge, M. J. (2016). Digital Image Processing. Springer London. ■

	Tipo de defecto	L x A x Prof. REAL	L x A x Prof. MEDIDA	L x A x Prof. ERROR ABS.
A	Longitudinal	$3_{\pm 0,1} \times 0,2_{\pm 0,05} \times 0,100_{\pm 0,005}$	$2,95 \times 0,17 \times 0,098$	$0,05 \times 0,03 \times 0,003$
B	Longitudinal	$30_{\pm 0,5} \times 0,2_{\pm 0,05} \times 0,075_{\pm 0,005}$	$29,97 \times 0,18 \times 0,072$	$0,03 \times 0,02 \times 0,003$
C	Longitudinal	$3_{\pm 0,1} \times 0,2_{\pm 0,05} \times 0,030_{\pm 0,005}$	$2,89 \times 0,15 \times 0,029$	$0,11 \times 0,05 \times 0,001$
D	Diagonal a 45°	$3_{\pm 0,1} \times 0,2_{\pm 0,05} \times 0,075_{\pm 0,005}$	$2,99 \times 0,17 \times 0,073$	$0,01 \times 0,03 \times 0,002$
E	Trasversal	$3_{\pm 0,1} \times 0,2_{\pm 0,05} \times 0,050_{\pm 0,005}$	$2,98 \times 0,16 \times 0,050$	$0,02 \times 0,04 \times 0,000$
F	Trasversal	$3_{\pm 0,1} \times 0,2_{\pm 0,05} \times 0,030_{\pm 0,005}$	$2,98 \times 0,15 \times 0,027$	$0,02 \times 0,05 \times 0,003$
	Tipo de defecto	Ø x Prof. REAL	Ø x Prof. MEDIDA	Ø x Prof. ERROR ABS.
G	Poros	$\varnothing 0,63_{\pm 0,2} \times 0,050_{\pm 0,005}$	$\varnothing 0,65 \times 0,060$	$\varnothing 0,02 \times 0,010$

Tabla 1. Resultados de la inspección del patrón (distancias en mm).