



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA  
INDUSTRIAL ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

PUESTA A PUNTO DE UN SISTEMA DE  
DIGITALIZACIÓN 3D PARA LA MEDICIÓN DE PIEZAS  
DE REVOLUCIÓN METÁLICAS SIN CONTACTO

Autor: D. Sergio Valverde González

Tutor: D. Francisco Javier Santos Martín

Valladolid, Abril, 2017



## RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

### RESUMEN

Tras los grandes avances que se producen continuamente en la industria, se ve la necesidad de digitalizar y medir las piezas sin contacto, gracias a los actuales avances de la tecnología existen multitud de técnicas.

Esta digitalización permitirá modificar el tamaño de la pieza, una flexibilidad, ahorro en la fabricación...

En este TFM se trabajará la medición sin contacto a través de la tecnología de la luz estructurada, con el fin de poder medir una pieza de revolución metálica. Se procederá primero, a la puesta a punto de la instalación configurando los distintos ajustes, para posteriormente realizar la digitalización.

Se pondrá solución a una de las limitaciones que tiene esta tecnología con diversos revestimientos y técnicas con el fin de poder realizar la digitalización correctamente.

**PALABRAS CLAVE:** industria, luz estructurada, digitalización, 3D, medición, sin contacto.

## ABSTRACT AND KEYWORDS

### ABSTRACT

After the great advances that are produced in the industry, we see the need to digitize and measure parts without contact, thanks to the current advances in technology there are many techniques.

This digitalization will allow to modify the size of the piece, a flexibility, saving in the manufacture ...

In this TFM will work the contactless measurement through the technology of structured light, in order to be able to measure a piece of metal revolution. The installation will be carried out by setting up the various settings and then digitizing them.

A solution to one of the limitations of this technology with various coatings and techniques in order to perform the digitization correctly.

**KEYWORDS:** Industry, structured light, digitalization, 3D, measurement, contactless.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me Gustaría en primer lugar agradecer a mi tutor Francisco Santos por ayudarme a desarrollar este Trabajo Fin de Máster y asesorarme en todos momentos.

También a aquellos compañeros, profesores y amigos que han estado presentes a lo largo de esta trayectoria académica.

A mis padres ya que sin su paciencia y ánimo, mi carrera académica probablemente no sería igual de prospera.

Y ya por último, y no menos importante, a Lorena Gómez Crespo, por estar a mi lado en todos los buenos y malos momentos de estos últimos años.

**MUCHAS GRACIAS POR TODO**

## ÍNDICE

1- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER .....	14
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.2 OBJETIVOS .....	15
2- INTRODUCCIÓN .....	18
2.1. ANTECEDENTES .....	18
2.2 INDUSTRIA 4.0. DIGITALIZACIÓN.....	18
2.2.1 Tecnologías usadas en la industria 4.0.....	20
2.2.2. El futuro de la industria 4.0 en España .....	23
2.3 ANÁLISIS DE EQUIPOS LÁSER ESCÁNER 3D .....	26
2.3.1 Escaneo 3D por contacto .....	27
2.3.2 Escaneo 3D sin contacto .....	29
2.3.2.1 Técnicas de digitalización activas.....	30
2.3.2.1.1. Tiempo de vuelo.....	30
2.3.2.1.2 Triangulación.....	32
2.3.2.1.3 Holografía conoscópica .....	33
2.3.2.1.4 Escáner de laser de mano .....	34
2.3.2.1.5 Luz estructurada.....	35
2.3.2.2 Técnicas de digitalización pasivas .....	38
2.3.2.2.1 Sistemas estereoscópicos .....	38
2.3.2.2.2 Sistemas fotométricos.....	39
2.3.2.2.3 Técnicas de reconocimiento de siluetas .....	40
2.4 APLICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE ESCANEO 3D .....	40
2.4.1 Diseño industrial .....	40
2.4.2 Aplicaciones médicas .....	41
2.4.3 Ciencia y educación .....	41
2.4.4 Arte y diseño .....	41
3- EQUIPOS DE DIGITALIZACIÓN 3D .....	44
3.1 EQUIPOS ACTUALMENTE EN EL MERCADO .....	44
3.1.1 HANDYSCAN 3D.....	44
3.1.2. Artec EVA.....	45
3.1.3 COMET 6.....	46

3.1.4 FARO FOCUS 3D .....	46
3.1.5 Mephisto EX PRO.....	47
3.1.6 OptiScan Shining 3D .....	48
3.1.7 SMART 3D Escáner Laser .....	49
3.2 EQUIPO UTILIZADO. ....	50
3.2.1 PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN .....	50
3.2.1.2 ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL ESANEADO .....	51
3.2.1.3 CONEXIÓN Y AJUSTES DE LA INSTALACIÓN .....	53
3.2.1.3.1. Conexión del HARDWARE .....	53
3.2.1.3.2 CONFIGURACIÓN DE LA CÁMARA.....	54
3.2.1.3.3 CONFIGURACIÓN DEL PROYECTOR .....	55
3.2.1.3.3 CONFIGURACIÓN DE DAVID LASER SCANER .....	57
4- ESTUDIO EXPERIMENTAL .....	64
4.1 PIEZAS PARA LA DIGITALIZACIÓN.....	64
4.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO .....	67
4.3 ESCANEADO DE LAS PIEZAS .....	70
5- RESULTADOS .....	76
5.1 PIEZA ORIGINAL.....	76
5.2 PIEZA CON NEGRO MATE .....	77
5.3 PIEZA CON REVESTIMIENTO BLANCO .....	78
5.4 PIEZA TOSTADA EN EL HORNO .....	79
5.5 PIEZA CON POLVOS DE TALCO .....	80
5.5 PIEZA HORNADA CON POLVOS DE TALCO .....	81
6- ESTUDIO ECONÓMICO .....	84
6.1 COSTES DIRECTOS .....	84
6.1.1 COSTE DE PERSONAL.....	84
6.1.2 COSTE DEL MATERIAL AMORTIZABLE .....	85
6.1.3 COSTE DEL MATERIAL NO AMORTIZABLE .....	86
6.2 COSTES INDIRECTOS.....	86
6.3 COSTE TOTAL DEL PROYECTO .....	86
7- CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS .....	90
7.1 Conclusiones.....	90

7.2 Líneas futuras .....	91
8- BIBLIOGRAFIA .....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Evolución de la industria. ....	18
Figura 2. 2 Las nueve tecnologías aplicadas a la industria 4.0 según BCG. ....	20
Figura 2. 3 Digitalización en España (Grupo Garatu). ....	24
Figura 2. 4 Adopción de la industria (Grupo Garatu). ....	25
Figura 2. 5 Aula de metrología de la Escuela de Ingenierías Industriales. ....	28
Figura 2. 6 Brazo articulado con elementos rígidos. ....	29
Figura 2. 7 Esquema de tiempo de vuelo. ....	31
Figura 2. 8 Principio de base escáner basado en la triangulación (J.L. Lerma y J.M Biosca 2007). ....	32
Figura 2. 9 Recorrido de la luz dentro de un sensor de holografía. ....	33
Figura 2. 10 Laser escáner de mano. ....	34
Figura 2. 11 Método de triangulación en luz estructurada. ....	35
Figura 2. 12 Esquema de escaneo con escáner de luz estructurada. ....	38
Figura 2. 13 Sistemas estereoscópicos. ....	39
Figura 2. 14 Esquema de sistemas fotométricos. ....	39
Figura 2. 15 Aplicación en la automoción. ....	40
Figura 2. 16 Aplicación en la medicina. ....	41
Figura 2. 17 Aplicación en el diseño y el arte. ....	42
Figura 3. 1 Handyscan 3D. ....	44
Figura 3. 2 Artec EVA. ....	45
Figura 3. 3 COMET 6. ....	46
Figura 3. 4 FARO FOCUS 3D. ....	47
Figura 3. 5 Mephisto EX PRO. ....	48
Figura 3. 6 OptiScan Shining 3D. ....	49
Figura 3. 7 Equipo SMART 3D Escáner Laser. ....	49
Figura 3. 8 Software utilizado. ....	51
Figura 3. 9 Cámara Logitech pro C900. ....	51
Figura 3. 10 Proyector Acer. ....	52
Figura 3. 11 Córner de calibración. ....	52
Figura 3. 12 Apoyo de rotación. ....	53
Figura 3. 13 Diagrama de conexión. ....	53

Figura 3. 16 Ejemplo de aplicación.....	55
Figura 3. 17 Configuración de la cámara.....	55
Figura 3. 19 Configuración del proyector.....	56
Figura 3. 20 Configuración del proyector en el ordenador.....	56
Figura 3. 21 Configuración de la doble pantalla.....	57
Figura 3. 22 Interfaz de entrada.....	58
Figura 3. 23 Configuración del equipo.....	58
Figura 3. 24 Configuración de la calibración.....	59
Figura 3. 25 Configuración de la luz estructurada.....	59
Figura 3. 26 Configuración del texturizado.....	60
Figura 3. 27 Configuración del Shape Fusion.....	61
Figura 4. 1 Pieza original.....	64
Figura 4. 2 Pieza con revestimiento negro mate.....	65
Figura 4. 3 Pieza con revestimiento blanco.....	65
Figura 4. 4 Pieza horneada.....	66
Figura 4. 5 Pieza con polvos de talco.....	66
Figura 4. 6 Escala de calibración.....	68
Figura 4. 7 Calibración de la cámara.....	68
Figura 4. 8 Calibración correcta.....	68
Figura 4. 9 Error en la calibración.....	69
Figura 4. 10 Instalación calibrada.....	69
Figura 4. 11 Instalación calibrada vista desde el ordenador.....	70
Figura 4. 12 Inicio del escaneo.....	70
Figura 4. 13 Pieza durante el escaneo.....	71
Figura 4. 14 Todos los escaneos realizados.....	71
Figura 4. 15 Escaneo de la pieza sin eliminar ruido.....	72
Figura 4. 16 Escaneo de una parte de la pieza.....	72
Figura 4. 17 Escaneo de todas las partes de la pieza.....	73
Figura 4. 18 Todos los escaneos unidos.....	73
Figura 4. 19 Momento de la fusión de los escaneos.....	73
Figura 4. 20 Pieza fusionada.....	74
Figura 5. 1 Escaneo de la pieza original.....	76

Figura 5. 2 Escaneo con textura de la pieza original. ....	77
Figura 5. 3 Escaneo de la pieza con revestimiento negro mate. ....	77
Figura 5. 4 Escaneo con textura de la pieza negro mate. ....	78
Figura 5. 5 Escaneo de la pieza con revestimiento de color blanco. ....	78
Figura 5. 6 Escaneo con textura de la pieza blanca. ....	79
Figura 5. 7 Escaneo de la pieza tostada en el horno. ....	79
Figura 5. 8 Escaneo con textura de la pieza tostada. ....	80
Figura 5. 9 Escaneo de a pieza aplicando polvos de talco. ....	80
Figura 5. 10 Escaneo de la pieza con textura con polvos de taco. ....	81
Figura 5. 11 Escaneo de la pieza horneada y con polvos de talco. ....	81
Figura 5. 12 Escaneo con textura de la pieza horneada y con polvos de talco. ....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Tecnologías de escaneo 3D.....	27
Tabla 3. 1 Recomendaciones del software.....	54
Tabla 5. 1 Resumen de resultados.....	82
Tabla 6. 1 Horas anuales trabajadas.....	84
Tabla 6. 2 Coste de un trabajador al año. ....	85
Tabla 6. 3 Coste material amortizable.....	85
Tabla 6. 5 Costes indirectos.....	86
Tabla 6. 6 Coste de personal en la duración del proyecto. ....	87
Tabla 6. 7 Coste total del proyecto.....	87

# 1- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

## 1- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

### 1.1 JUSTIFICACIÓN

La definición de industria 4.0 consiste en la transformación digital aplicado a la industria de producción, lo que permite digitalización de muchos procesos en las fábricas mediante sensores y sistemas de información para transformar los procesos productivos y hacerlos más eficientes. La implementación de la industria 4.0 permitirá aprovechar la información para su análisis desde múltiples canales de distribución de información, donde ser capaces de analizarla y explotarla en tiempo real.

En 2020, según PWC (Price Waterhouse Coopers) se espera que el nivel de digitalización de las empresas en España aumente hasta el 19%, a nivel global esta cifra será de un 72%. Las empresas industriales digitalmente avanzadas experimentarán un incremento adicional de su facturación del 2,9% de media anual en los próximos cinco años. Esto hace que la integración de la industria 4.0 sea fundamental.

En la actualidad la mayor parte de las industrias utilizan sistemas de medición que no permiten la digitalización de los objetos. Debido a los avances tecnológicos, estos sistemas de medición sin contacto se puede implementar en una línea de producción de forma ágil y que a su vez pueda realizar la digitalización de la pieza. Esto permite realizar cambios sobre la imagen digital (variar el diseño, mejorar características, tomar medidas...) y lo que también ofrece es una flexibilidad en la cadena de producción, así como en la medida de las piezas que permitirá diseñar, producir y vender productos en menos tiempo.

En este proyecto se ha planteado un sistema de medición sin contacto con luz estructurada en objetos de revolución metálicos. El principal objetivo de este Trabajo Fin de Máster es ofrecer una alternativa a la típica medición con contacto e intercambiarla por un sistema sin contacto. En el desarrollo de este proyecto se han trabajado con distintos revestimientos de la pieza para saber hasta qué punto se podría implementar este tipo de medición en la industria.

La tecnología evoluciona a un ritmo vertiginoso y las empresas deben adaptarse a los cambios lo antes posible para generar así una fuente de ventaja competitiva. La digitalización de la industria es una revolución que cambiará el paradigma de la fabricación industrial, y aquellas empresas que logren coger la ola de la Industria 4.0, alcanzarán el éxito en sus respectivos sectores.

En este proyecto se ha apostado por este tipo de estudio ya que las aplicaciones de la digitalización de objetos hoy en día, está en auge. Esto supondrá de gran

importancia en la industria 4.0 permitiendo el uso de los datos a tiempo real y en cualquier lugar.

## 1.2 OBJETIVOS

En este TFM se trabajará con distintos objetivos, con el fin de poder integrar en una línea de producción un sistema de digitalización mediante luz estructurada. Siendo los principales objetivos:

- Puesta a punto de una instalación de escaneo de pieza para la obtención de modelos digitalizados.
- Obtención de un modelo tridimensional de piezas de revolución metálica a través de la utilización de un software de digitalización basado en luz estructurada
- Analizar cuáles son las limitaciones de la luz estructurada a la hora de poder medir una pieza.
- Aplicar soluciones a estas limitaciones para favorecer la digitalización de la pieza.



## 2- INTRODUCCIÓN

## 2- INTRODUCCIÓN

### 2.1. ANTECEDENTES

El presente Trabajo Fin de Máster es el resultado de una labor de investigación en el que un sistema de medida sin contacto mediante el uso de luz estructurada es utilizado para el escaneo y digitalización de objetos en tres dimensiones, con el objetivo de integrar este modelo de medida en una línea de producción industrial. Este proceso se integra en las líneas de modelado tridimensional del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.

### 2.2 INDUSTRIA 4.0. DIGITALIZACIÓN.

A lo largo de la historia se han producido varias revoluciones industriales que han supuesto cambios en los procesos industriales, económicos y tecnológicos. Han llevado a diversas evoluciones desde el 1800 que se podría llamar la “industria 1.0” hasta la actual industria 4.0, llevando diversas mejoras permitiendo optimizar los procesos productivos [1].

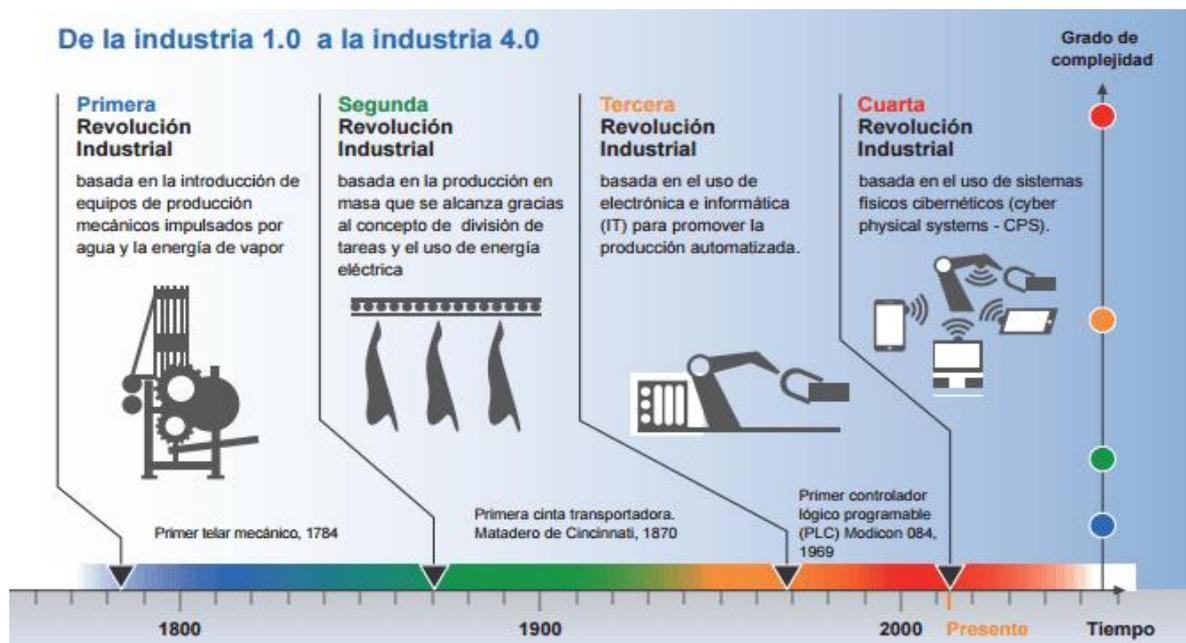


Figura 2. 1 Evolución de la industria.

-La primera revolución Industrial, iniciada en la segunda mitad del siglo XVIII en el Reino Unido con la aparición de la máquina de vapor, supuso la mayor transformación económica, social y tecnológica. Hasta entonces, las fuentes de energía que movían las producciones humanas se limitaban al fuego, a la fuerza animal y al viento. El invento del escocés James Watt, consistente en lograr el auténtico aprovechamiento de la energía del vapor, marcó el origen de la primera

revolución industrial. Los talleres se transformaron en grandes fábricas y nacieron los conceptos de obreros industriales e ingeniería industrial. Las fábricas dependían de suministros continuos de agua y combustible y por eso eran construidas preferentemente en los valles de los ríos. La incorporación de las máquinas a los procesos productivos permitió producir más rápido y multiplicando la renta.

-En cuanto a la segunda revolución industrial a finales del siglo XIX, se introdujeron nuevas fuentes de energía como el gas, el petróleo y principalmente la electricidad y el motor eléctrico como nueva fuerza motriz. Ya no era necesario construir las fábricas junto a los ríos y la productividad y la diversidad industrial se incrementaron de manera notable. Es la época de la producción en cadena, nuevos materiales, nuevos sistemas de transporte y nuevos sistemas de comunicación, con la aparición del teléfono y la radio. Estos avances provocaron un profundo cambio en la economía, cada vez más internacionalizada y globalizada.

-La tercera revolución industrial es un concepto más reciente centrado en los cambios derivados del uso de energías renovables, centrado en la automatización y robotización de los procesos, el uso de Internet, dando lugar a la sociedad de la información.

-En la actual cuarta Revolución Industrial que puede recibir distintos nombres: Industria 4.0, Industria Conectada 4.0, Digitalización, Industria Inteligente, Smart Factories), Ciber-Industria del futuro, Internet Industrial de las Cosas (IIoT), etc. Como en las 3 revoluciones previas, esta nueva revolución se basa en la aplicación de las nuevas tecnologías a los procesos industriales, tanto a nivel de maquinaria y producción como en toda la cadena de valor del proceso industrial y de los procesos de negocio [2].

El modelo productivo de fabricación avanzada Industria 4.0 tendrá como características:

-La flexibilidad, entendida como capacidad de producir de forma personalizada.

-La re-configurabilidad, entendida como capacidad de adaptación de forma rápida y económica a los cambios en el producto.

-La digitalización de los procesos, conectando e integrando las diferentes fases y medios del proceso productivo.

-Hacer que procesos y medios puedan responder de forma inteligente. Esto significa aprender de experiencias previas y responder de forma autónoma a situaciones imprevistas.

### 2.2.1 Tecnologías usadas en la industria 4.0

La industria 4.0 se sustenta en varias tecnologías que permiten la digitalización de los procesos, el principal objetivo de esta revolución. Según estudios de BCG (Boston Consulting Group) existen nueve tecnologías sobre los que se crearan las fábricas inteligentes de futuro [3].



Figura 2. 2 Las nueve tecnologías aplicadas a la industria 4.0 según BCG.

#### 1-Big Data y análisis de datos

El análisis de estos datos puede proporcionar información muy valiosa acerca del comportamiento de estos procesos; se pueden prevenir problemas en un determinado proceso industrial a través de la detección de resultados o medidas anómalas (sin la necesidad de haber definido previamente qué medida es o no es anómala) o determinar qué eventos están relacionados dentro de un proceso más complejo facilitando su gestión a través de la predicción, probabilidad que un evento desencadenará otro con cierta probabilidad. Estos datos a su vez, están permitiendo optimizar diferentes procesos industriales, mejorar el consumo de energía y la calidad de la producción en aquellas factorías donde están sabiendo aprovechar este paradigma tecnológico [4].

## 2- Robótica Colaborativa

En esta nueva etapa, los robots industriales que coopera con los humanos de manera estrecha, sin las características restricciones de seguridad requeridas en aplicaciones típicas de robótica industrial. Su principal características son su flexibilidad, accesibilidad y relativa facilidad de programación.

## 3-Sistemas para la integración vertical y horizontal

Se trata en gestionar sistemas integrados para disponer de una plataforma única, donde los empleados y colaboradores tengan acceso a todos los softwares usados en el día a día. Todos ellos sistemas independientes pero que deben estar conectados en favor de una automatización de tareas y garantía de una gestión integral de la experiencia del usuario.

## 4-Internet de las cosas industrial (IoT)

Esta herramienta es esencial a través del uso de sensores y dispositivos conectados en red. Derivado del acrónimo IoT y adaptado a la industria. En este campo se busca que las máquinas, productos y piezas sean capaces de comunicarse entre sí para facilitar oportunidades de optimización y facilitar la toma de decisiones individualizadas en tiempo real durante el proceso productivo.

## 5-Ciberseguridad

La fábrica del futuro implica que grandes parcelas de la empresa estén conectadas con los riesgos de seguridad que esto conlleva ante la posibilidad de sufrir ataques informáticos. La ciberseguridad se presenta como una tecnología para blindar todos los procesos y el acceso a cualquier intruso.

## 6-Cloud computing

Cada vez más tareas relacionadas con la producción de bienes y servicios requieren del uso de aplicaciones y datos compartidos a través de diferentes localizaciones y sistemas más allá de los límites de los servidores de una compañía. También ofrece excelentes soluciones para almacenar las enormes cantidades de datos procedentes de Big Data. La transformación digital unirá toda la información en una sola base de datos, agilizando todos los procesos desde las necesidades del cliente a la entrega del producto. En este proyecto se trabajará con gran cantidad de datos, esta tecnología permitirá compartir estos datos con fábricas de otros países.

### 7-Fabricación aditiva

La fabricación aditiva (también conocida como impresión 3D) consiste en la fabricación de piezas a partir de la superposición de capas de un material, normalmente en polvo, para la obtención de un modelo 3D, sin necesidad de moldes ni utillajes de ningún tipo. Esto es sin duda un gran avance para el abaratamiento de las series en corto y creación de prototipos. Esta tecnología es importante en el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster, ya que la impresión 3D viene definida anteriormente por un modelo de trabajo en 3D, que en muchos casos está producida por el escaneo de la pieza e incluso permite la variación de tamaño de la pieza.

### 8-Simulación

Dentro de los pilares tecnológicos de la industria 4.0, este es el que más me cuesta entender y más complejo me resulta. En definitiva se trata no sólo de crear entornos virtuales simulados para el departamento de ingeniería sino también sobre el comportamiento en conjunto de máquinas, procesos y personas en tiempo real. Es decir este pilar tecnológico permitirá crear fabricas laboratorio en entornos controlados y virtuales para realizar pruebas y configuraciones óptimas para la fabricación en planta antes de empezar siquiera a producir el producto. En este TFM esta tecnología tiene un gran valor, ya que la simulación permitirá ver a tiempo real como será la pieza, en este caso mediante el escaneo. Este aspecto es importante ya que permite medir la pieza al instante reduciendo así el tiempo como los recursos a utilizar.

### 9-Realidad aumentada y realidad virtual

La mayor accesibilidad de estas tecnologías en los últimos años las ha hecho situarse como una herramienta útil para la optimización de los diseños, la automatización de los procesos y en el control de la fabricación. Una de las aplicaciones es el envío de instrucciones de montaje a través del móvil, a desarrollos para el prototipo de piezas (escaneo 3D) o el uso de dispositivos especiales para el manejo y operación con determinada maquinaria [5]. Es una de las tecnologías más importantes para el desarrollo de este TFM ya que nos permite el modelado de las piezas y su modificación, es decir la obtención de un modelo físico a uno digital en un periodo de tiempo relativamente corto. Esto permitirá la realización de medidas de forma efectiva, rápida y sin contacto.

### 2.2.2. El futuro de la industria 4.0 en España

España se ha esforzado en los últimos años por digitalizar la industria, aunque se encuentra por debajo del resto de países europeos con fuerte tradición industrial. Concretamente, según un reciente estudio de PwC (Price Waterhouse Coopers), “las compañías industriales españolas están claramente por detrás de las del resto del mundo en materia de digitalización. Solo el 8% de las empresas industriales de nuestro país se encuentran en un nivel de digitalización avanzado, muy lejos del 33% del sector a nivel global”.

Los principales obstáculos que están ralentizando la digitalización de la industria española, según este estudio, son (en orden descendente de importancia):

- La falta de cultura digital y formación adecuada.
- La ausencia de una visión clara de las operaciones digitales y el liderazgo de la alta dirección.
- Un conocimiento confuso de los beneficios económicos de invertir en tecnologías digitales.
- Talento insuficiente.

Lo que implica que España deberá centrar sus esfuerzos en mejorar estos obstáculos para llegar a estar más cerca de las potencias europeas. A continuación se ofrece unas tablas del desarrollo en España actual y enfocado al 2020.

## Digitalización de la industria en España y en el mundo

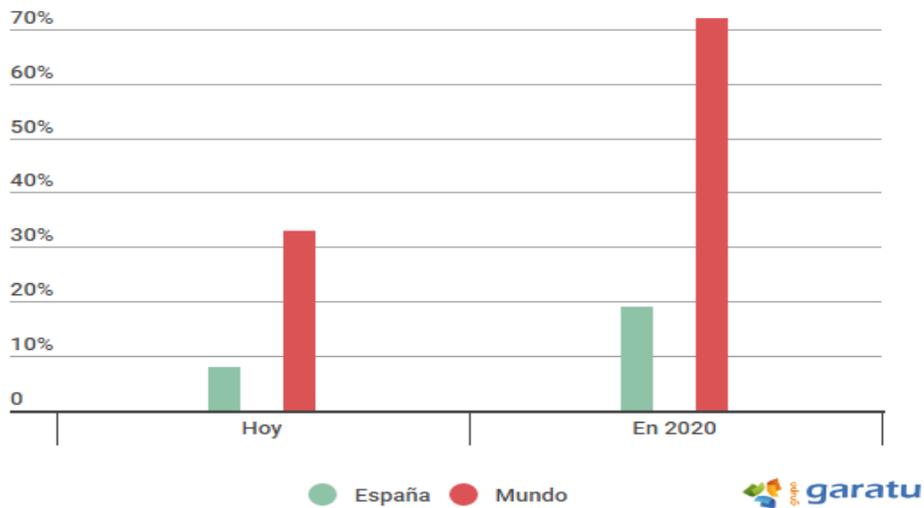


Figura 2. 3 Digitalización en España (Grupo Garatu).

Como se ve gráficamente España se encuentra un peldaño más abajo respecto a otros países. Como perspectiva la digitalización en el 2020 aumentará, aunque aumentará aún más en otros países.

## Adopción de la Industria 4.0 por sectores

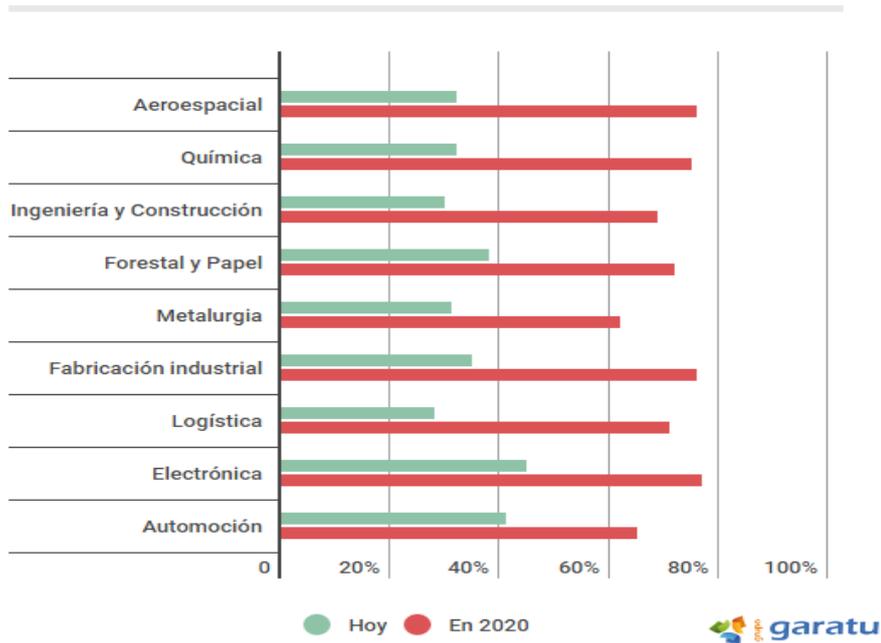


Figura 2. 4 Adopción de la industria (Grupo Garatu).

Se producirá un gran aumento en los diversos sectores, por lo que será fundamental avanzar en ese sentido y no quedarse atrás.

Como conclusión de estos apartados, la tecnología evoluciona a un ritmo vertiginoso y las empresas deben adaptarse a los cambios lo antes posible para generar así una fuente de ventaja competitiva. La digitalización de la industria es una revolución que cambiará muchos aspectos de la fabricación industrial, y aquellas empresas que logren desarrollarse en la Industria 4.0, alcanzarán el éxito en sus respectivos sectores [6].

### 2.3 ANÁLISIS DE EQUIPOS LÁSER ESCÁNER 3D

Según la Universidad Politécnica de Madrid la reconstrucción 3D se define como: “el proceso mediante el cual, objetos reales, son reproducidos en la memoria de una computadora, manteniendo sus características físicas (dimensiones, volumen y forma). Existen dentro de la visión artificial, multitud de técnicas de reconstrucción y métodos de mallado 3D, cuyo objetivo principal es obtener un algoritmo que sea capaz de realizar la conexión del conjunto de puntos representativos del objeto en forma de elementos de superficie, ya sean triángulos, cuadrados o cualquier otra forma geométrica”[7].

El uso del escáner 3D se ha extendido poco a poco en el mundo industria, sobretodo en el sector del automóvil y aeronáutico. Se desarrolla como un sistema que analiza y toma datos de la forma de un objeto, este tipo de escáner recopila información imprescindible a la hora de construir modelos tridimensionales.

Ofrecer un modelo digital 3D de una pieza en un tiempo muy reducido, puede resultar interesante para la utilización de cualquier técnico. A su vez permite una flexibilidad en la fabricación (ya que se puede realizar la modificación de la pieza) y poder ajustarse más rápidamente a lo que buscan actualmente los clientes. Este modelo digital podrá ser usado para compartir información entre varias fábricas en distintas disposiciones geográficas.

También esta tecnología llega al mundo de la impresión 3D, donde las grandes marcas desarrollan modelos capaces de obtener la geometría de una pieza, convertirla en un archivo imprimible (normalmente formato .STL) y de esta forma poder reproducir casi cualquier objeto que sea necesario en la industria y poder imprimirla. Incluso poder llegar a fabricar a gran escala permitiendo un gran ahorro.

En la actualidad existen diversas tecnologías que permiten el escaneado 3D, vienen recogidas en la siguiente clasificación:

Tecnologías de escaneo 3D	Contacto	Guías lineales		
		Brazo articulado		
		Mixto		
	Sin contacto	Activos		Tiempo de vuelo
				Triangulación
				Holografía conoscópica
				Escaner laser de mano
			Luz estructurada	
		pasivos		Sistemas fotométricos
				Sistemas estereoscópicos
	Técnicas de detección de Mixto siluetas			

Tabla 2. 1 Tecnologías de escaneo 3D.

### 2.3.1 Escaneo 3D por contacto

Este tipo de escáneres examina el modelo mediante toques físicos del objeto, cada toque en el objeto corresponde con un punto del modelo. Para ello el objeto a reconstruir debe estar sobre una plataforma plana de precisión, cuando el objeto no es plano y tiene una superficie irregular, por la cual no es posible que se mantenga de forma estable en la plataforma de escaneo, este será aguantado por un soporte transparente. Con este tipo de escáneres se consiguen modelos muy precisos, son típicos en la fabricación de piezas rígidas.

Las propiedades básicas que caracterizan este tipo de escaneo son:

- Tienen una gran elevada precisión. Al tener contacto con la pieza se obtienen mejores resultados y más precisos.
- Aunque se consiga mejor precisión, el proceso es bastante más lento, entre 100 y 1000 puntos es capaz de escanear por segundo. Los sistemas ópticos pueden llegar a funcionar hasta 500 veces más rápido.
- Al mantener contacto con la pieza a escanear, se ejerce presión sobre estos para ser escaneados se puede llegar a producir daños o deformaciones en dicho objeto.
  - No son útiles para la gran mayoría de las aplicaciones de restauración y conservación.
  - No se pueden utilizar con materiales frágiles.

Este método podrá tener tres diferentes configuraciones:

1. Un sistema de guías con brazos rígidos que se mantienen en una relación perpendicular y cada eje se desplaza a lo largo de unas guías.

Un ejemplo de este tipo de máquinas es la CMM (coordinate measuring machine), que poseen elementos móviles que se trasladan a lo largo de guías con recorridos ortogonales, y que miden las coordenadas X Y y Z de piezas, es usada principalmente en procesos que requieren una gran precisión.

Cuenta con un sistema de palpado que hace contacto con la pieza a medir. Cuando el palpador toca la pieza, se adquiere un dato de medición (x,y,z) que posteriormente es procesado por el software de la CMM.

Las CMM constituyen un sistema de medición preciso y flexible, para la medición de superficies complejas, longitudes, ángulos, tolerancia dimensional y geométrica.



Figura 2. 5 Aula de metrología de la Escuela de Ingenierías Industriales.

2. Un brazo articulado con elementos rígidos y sensores angulares de alta precisión. La localización del punto final de la articulación requiere el cálculo por medio de procesos matemáticos.

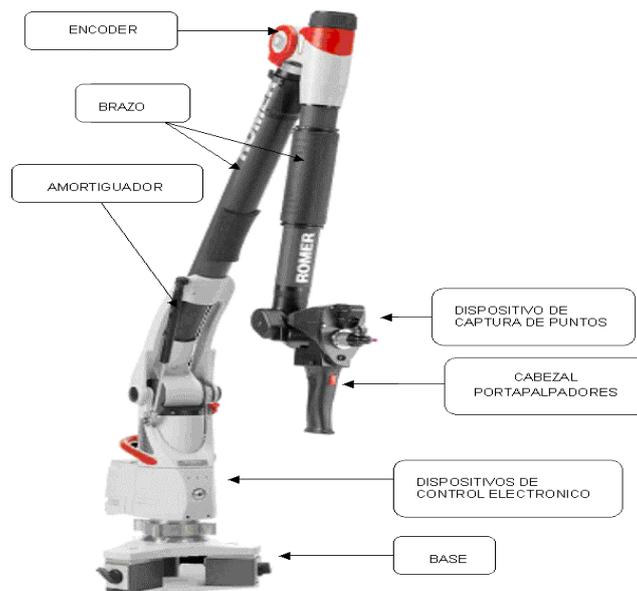


Figura 2. 6 Brazo articulado con elementos rígidos.

3. Se puede usar una combinación de ambos métodos, los cuales pueden ser desde un brazo articulado hasta un vagón deslizante, para mapear grandes superficies con cavidades interiores o superficies superpuestas.

### 2.3.2 Escaneo 3D sin contacto

Este tipo de escáneres no llegan a tocar el objeto a escanear, sino que utilizan alguna tecnología como puede ser la luz o el ultrasonido, entre otros.

Las peculiaridades que presenta el escaneo sin contacto son:

- No hay contacto entre el modelo y el escáner.
- Posee una gran precisión.
- La velocidad de adquisición de datos es altamente superior a los escaneos con contactos.
- Influyen notoriamente las características superficiales del modelo y las condiciones ambientales de la luz (se pueden producir sombras que distorsionen los escaneados).
- Mediante este método es imposible captar zonas no vistas o también llamadas recovecos.
- Permite obtener un modelo digitalizado, permitiendo así la modificación del objeto.

Actualmente debido a los desarrollos en la visión por ordenador y la tecnología de los sensores, se usa la luz de varias maneras para la medición de los objetos. Estas técnicas se pueden dividir en dos: Activas y pasivas.

### 2.3.2.1 Técnicas de digitalización activas

Los escáneres activos emiten algún tipo de radiación controlada y detectan su reflexión con el fin de sondear un objeto. Existen distintos tipos de radiación como la luz, los ultrasonidos o los rayos X. Con esta técnica se requiere un transmisor y un receptor.

Las principales ventajas de estos sistemas son:

- No requieren luz ambiental, ya que son ellos los que generan su propia radiación
- Proporcionan gran cantidad de mediciones de manera automática.
- Se pueden usar en superficies con rasgos distintivos.
- Capturan mucha información en poco tiempo.

#### 2.3.2.1.1. Tiempo de vuelo

Un emisor emite ondas de luz a una velocidad constante a través del medio. Se mide el tiempo por el cual la luz viaja de una fuente a un objeto y regresa a la fuente, dicha superficie puede calcularse mediante la siguiente fórmula.

$$D = \frac{(c \cdot t)}{2} \quad (\text{ec. 2.1})$$

Dónde:

c= velocidad de la luz en el aire.

t= al tiempo que tarda la señal en ir y volver.

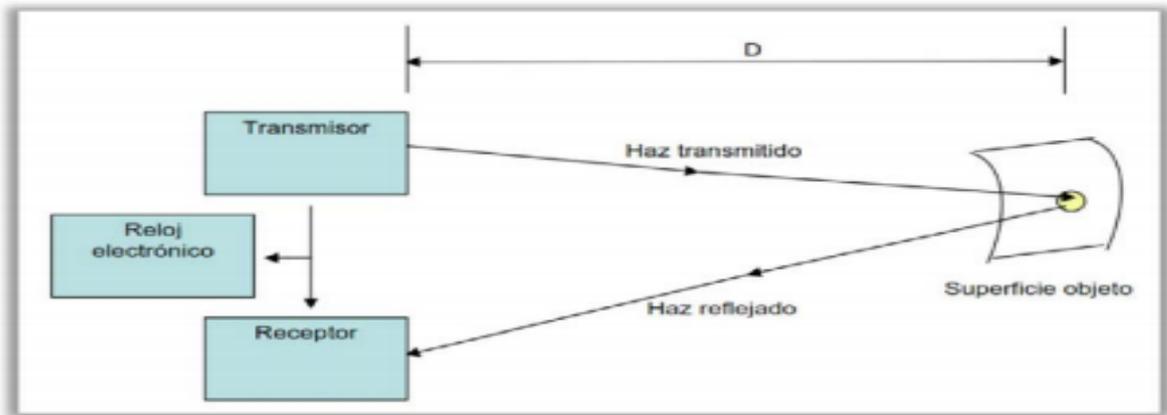


Figura 2. 7 Esquema de tiempo de vuelo.

Los escáneres por tiempo de vuelo o suele usar haces continuos, sino pulsos de láser. Escanean todo su campo de visión punto a punto cambiando la dirección del haz. Un láser escáner 3D típico basado en tiempo de vuelo puede medir de 2.000 a 50.000 puntos por segundo.

Hay tres factores principales que determina la precisión de un sistema de medida por pulsos:

- La capacidad de seleccionar la misma posición relativa en el pulso emitidos y recibido para medir el intervalo de tiempo. Se encuentra limitado por el ruido, fluctuación, la fuerza de la señal y a sensibilidad del detector.
- La precisión con la que se fija un lapso de tiempo.
- La precisión instrumental en la medida de los intervalos de tiempo.

Como principales características de esta tecnología:

- Rápido muestreo.
- Dispone de un sistema de medición (contador) que se reinicia al alcanzar el objetivo.
- Suelen ser equipos de alta precisión.
- Apto para trabajos de alta precisión en momentos o elementos constructivos (para el análisis de las deformaciones).
- Generación de una alta densidad de puntos.
- Velocidad oscilante entre los 10 000-100 000 puntos por segundo.
- Solo sirve para objetos próximos que reflejen en todas las direcciones. Además, estos objetos tiene que cumplir una serie de pautas: que no sean negros, ni especulares ni transparentes.

### 2.3.2.1.2 Triangulación

Algunos de los métodos de reconstrucción 3D están basados en la triangulación activa; estos proyectan un láser sobre un objeto y utilizan una cámara para buscar la ubicación del punto láser. En función de la distancia en la que el láser alcance la superficie, el punto aparecerá en diferentes lugares del campo de visión de la cámara.

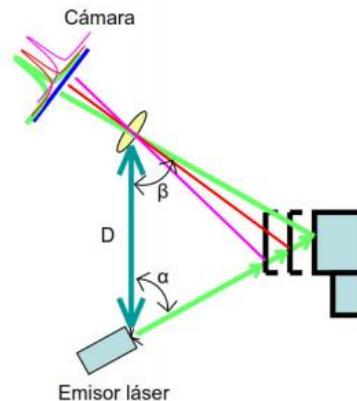


Figura 2. 8 Principio de base escáner basado en la triangulación (J.L. Lerma y J.M Biosca 2007)

En la figura se observa que el lado 'D' del triángulo es conocido, es decir, la distancia entre la cámara y el emisor láser. El ángulo del emisor láser ' $\alpha$ ', también es conocido. El ángulo de la cámara ' $\beta$ ' puede ser determinado encontrando la localización del haz láser en el campo de visión de la cámara. Estos tres elementos determinan completamente la forma y el tamaño del triángulo y proporcionan la profundidad exacta del objeto medido [8].

Se puede demostrar que cuanto mayor es el lado D (base), menor es el error en la estimación de la profundidad del punto medido sobre el objeto. Sin embargo, la base no puede ser muy grande porque entonces el emisor láser y la cámara tendrían un solape en el campo de visión muy reducido y la proyección del láser no siempre podría ser capturada por la cámara.

La desventaja de este sistema es que el tamaño del objeto a reconstruir viene limitado por el ángulo del vértice opuesto al escáner, ya que a medida que este ángulo se aparte de  $90^\circ$  menor será la precisión de la reconstrucción. Ya que este ángulo viene relacionado con la distancia del emisor y la cámara, aumentar la distancia entre ellos supone un incremento en las dimensiones del equipo de medida.

Los escáneres por triangulación se usan en aplicaciones que generalmente requieren una distancia de uso menor de 10 metros. Comparados con los escáneres de medio

y largo alcance, los escáneres por triangulación alcanzan precisiones muy elevadas, del orden de micras.

### 2.3.2.1.3 Holografía conoscópica

La holografía conoscópica es una técnica interferométrica utilizada para la digitalización de superficies cercanas. Además de poder trabajar con luz no coherente (aunque sí ha de ser monocromática), se diferencia sobre otras técnicas por su capacidad de reconstruir superficies muy inclinadas, y también por su menor dependencia a las propiedades ópticas de la superficie.

En el láser escáner interferométrico el haz láser se divide usando un prisma que refleja la mitad del haz en una dirección (brazo de referencia) y transmite la otra mitad (brazo de medición). Ambas partes del haz viajan por diferentes caminos y cuando se combinan producen unas interferencias fringe. Con estas interferencias es posible detectar desplazamientos muy pequeños (del orden de una fracción de longitud de onda) empleando detección coherente, y también permiten medir grandes distancias con baja ambigüedad contando las longitudes de onda.

En la holografía conoscópica, sin embargo, un haz de luz atraviesa un cristal ópticamente anisotrópico (cristal que posee más de un índice de refracción en función del ángulo de incidencia del haz), dividiéndose en dos haces que comparten la misma ruta geométrica, pero que tienen modos de polarización ortogonales. Los índices de refracción de estos dos haces difieren entre sí, por lo tanto, al salir del cristal se genera un patrón de interferencia cuyas características dependen de la distancia desde la fuente de luz [9].

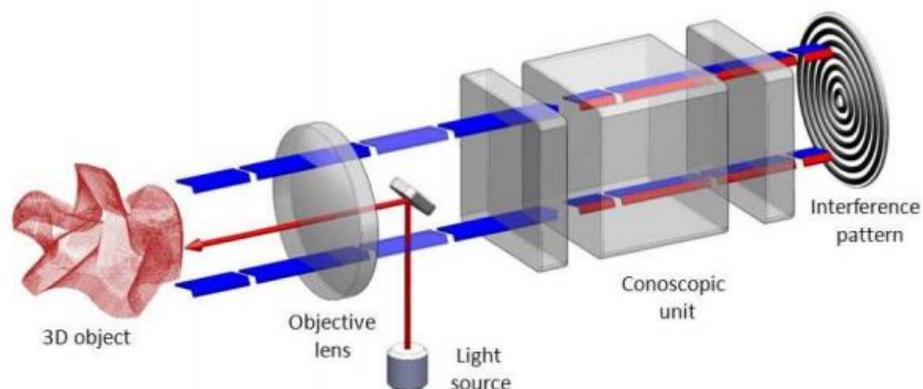


Figura 2. 9 Recorrido de la luz dentro de un sensor de holografía.

#### 2.3.2.1.4 Escáner de laser de mano

Los escáneres láser de mano crean una imagen en 3D a través del método de triangulación activa descrito anteriormente. Se utiliza el láser como instrumento para generar haces de luz usando una estrecha banda del espectro.

Los escaneados láser se realizan proyectando un láser lineal o en forma de punto. La luz se proyecta sobre el objeto a escanear formando triángulos entre la cámara el objeto y el láser. Una de las características positivas que poseen los láseres es que tiene un alto grado de coherencia espacial, por lo que se propaga en una dirección bien definida con un haz divergente.

Los datos se recogen por un ordenador y se registran como puntos de un espacio tridimensional, estos datos más tarde serán unidos entre ellos formando una malla que tendrá la forma del cuerpo 3D.

Las aplicaciones de los láseres son múltiples, de ahí sus buenas propiedades (coherencia, alta monocromaticidad, etc.). Pero hay que tener en cuenta que existen distintos tipos de láseres (según el uso) y que algunos de ellos pueden ser altamente peligrosos. Nunca se debe apuntar directamente a los ojos de las personas.

El programa utilizado en el desarrollo de este proyecto (David Laser Scanner) ofrece la posibilidad de utilizar un láser lineal o luz estructurada mediante un proyector. Para la opción con láser, se debe usar uno lineal (nunca puntero) y no hace falta utilizar un soporte mecánico para rastrear un objeto de manera constante, sino que simplemente con el movimiento de la mano, es suficiente. Solamente hay que tener cuidado con los ojos de las personas y no dirigir el haz del láser directamente hacia ellos.

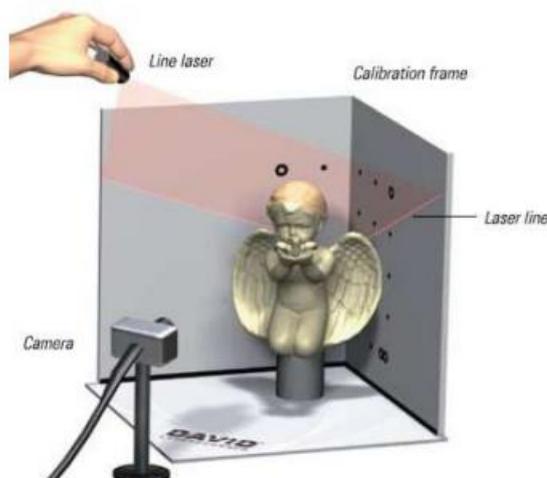


Figura 2. 10 Laser escáner de mano.

### 2.3.2.1.5 Luz estructurada

Los escáneres de luz estructurada, método que será utilizado para el análisis y experimentación en el que se basa este TFM. Los equipos láser escáner 3D de luz estructurada se basan en el principio de la triangulación óptica, este trabajo consiste la proyección de un patrón de luz sobre el objeto de estudio a tratar de tal forma que el objeto sea cubierto completamente, y una cámara web encargada de registrar los sucesos.

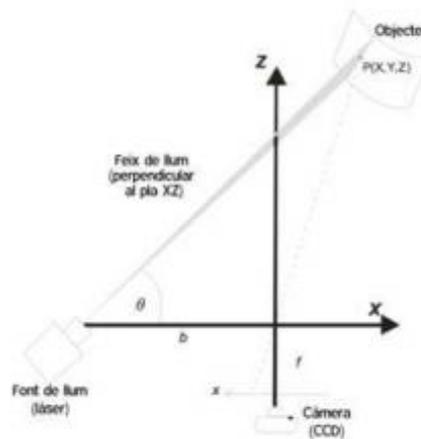


Figura 2. 11 Método de triangulación en luz estructurada.

Los sistemas de luz estructurada se basan en estudiar la deformación que sufre un patrón de luz que intersecciona en cualquier objeto. No vale cualquier sistema de iluminación (bombillas, fluorescentes, etc.,) ya que, están compuestos por ondas de diferentes por lo que solo se utilizará uno proyectos que emita los haces de luz y el resto del habitáculo donde se realizaran los escaneos deberá estar a oscuras, para no dar falsos resultados. En el caso de este Trabajo Fin de Master, se utilizará un proyector [11].

Una vez que ya se conoce el tipo de luz que se va a emplear, será necesario elegir un patrón adecuado. El propio programa, tiene tres opciones, patrón horizontal (las rayas sales verticales), patrón vertical (las rayas son horizontales) o ambas.

Existen dos técnicas en la proyección de los patrones bidimensionales:

- De rayas: es la más utilizada y consiste en la proyección de rayas correlativas entre sí o distribuidas arbitrariamente.
- De reja: proyecta una reja de  $m \cdot n$  puntos que iluminan parte del objeto de una sola tirada. En todo este proyecto solamente se ha utilizado la de rayas.

Estos equipos proyectan un patrón (unidimensional o bidimensional) de luz en el objeto, donde se refleja y es registrado por una cámara coplanaria al emisor del patrón. Una vez recibido de nuevo ese patrón, se analizan las deformaciones sufridas entre el patrón inicial generado y el final captado, que habrá sufrido variaciones por la geometría del objeto.

Etapas que se desarrollan en la tecnología de luz estructurada:

1- Generar patrones de rayas:

El procedimiento por proyección utiliza haces de luz y funciona como lo hace un proyector de vídeo. Los patrones son generados por el display. Una característica es su linealidad en la reproducción de grises, debido a la modulación que emplea. En cambio, una de las grandes desventajas son las discontinuidades que aparecen en las rayas proyectadas.

2- Calibración

Con la calibración de la cámara se consigue estimar los parámetros intrínsecos (longitud focal, punto de enfoque, factores de escalado, etc.) y extrínsecos (definidos por la matriz de rotación, el vector de traslación entre el entorno real y el sistema de coordenadas de la cámara, etc.) los cuales son necesarios para realizar la reconstrucción 3D del entorno y situar la cámara correctamente.

3- Análisis del patrón de rayas

Hay dos formas de realizar el patrón de rayas

Reconocimiento de patrones: consiste en añadir marcas de profundidad en los patrones de rayas, hay que tener en cuenta el desplazamiento de las rayas ya que pueden verse reflejadas como coordenadas en 3D.

Codificación de patrones: que ha sido el utilizado en este TFM, que consiste en proyectar patrones en blanco y negro (mitad y mitad) resultando una secuencia en código Gray. Esta secuencia asigna un valor a cada muestra codificada. De este modo se consigue depurar la información de profundidad relativa del píxel respecto sus vecinos. Una vez adquirida la profundidad de todos los píxeles se reconstruye el objeto tridimensional.

4- Precisión

La precisión o resolución óptica de un sistema está afectada por la anchura, calidad óptica de las rayas y la longitud de onda de la luz. Debido a las limitaciones técnicas de la cámara y la pantalla (profundidad de campo, resolución) resulta ineficaz intentar reducir el grosor de las rayas.

## 5- Barrido

Para obtener la exploración tridimensional completa, se tienen que combinar las diferentes medidas adquiridas para diferentes ángulos, como se realizará en este trabajo. Esto permitirán trabajar con el modelo 3D, que se podrá exportar a programas de diseño para poder trabajar con él.

La principal ventaja de los escáneres 3D de luz estructurada es la velocidad de escaneo. Ya que en vez de escanear de punto en punto, se escanean múltiples puntos o el campo de visión entero. Esto reducirá o eliminara el problema de deformación por movimiento.

Permite una renderización de objetos dinámicos deformables (tales como expresiones faciales) que pueden ir a una velocidad desde 40 hasta 120 fotogramas por segundo.

También es posible aislar superficies para ser reconstruidas, por ejemplo, una expresión facial, gracias al desenfoque binario, este método de reconstrucción 3D puede llegar a cientos de miles de fotogramas por segundo.

Esta tecnología también presenta limitaciones y problemas difíciles de solucionar. Uno de esos problemas es el trabajo con piezas que sean transparentes o reflectantes (piezas metálicas con demasiado brillo), en el desarrollo de este trabajo se trabajara con estas limitaciones a las que se intentará poner solución a la hora de realizar los escaneos 3D [12].

Otra restricción que nos plantea este método de la luz estructurada son las reflexiones dobles o inter-reflexiones. Éstas son causadas el patrón de rayas se superponga luz no deseada, eliminando así la posibilidad de una detección adecuada. Todas las cavidades reflectantes y recovecos son difíciles de “detectar” por la luz por lo tanto, difíciles también de reproducir. Este trabajo se realiza con la luz totalmente apagada buscando no tener ningún tipo de luz residual que interceda en los resultados.

Todos estos problemas están presentes en la realización de este TFM por lo que se pondrá soluciones a estos problemas para evitar falsos resultados.

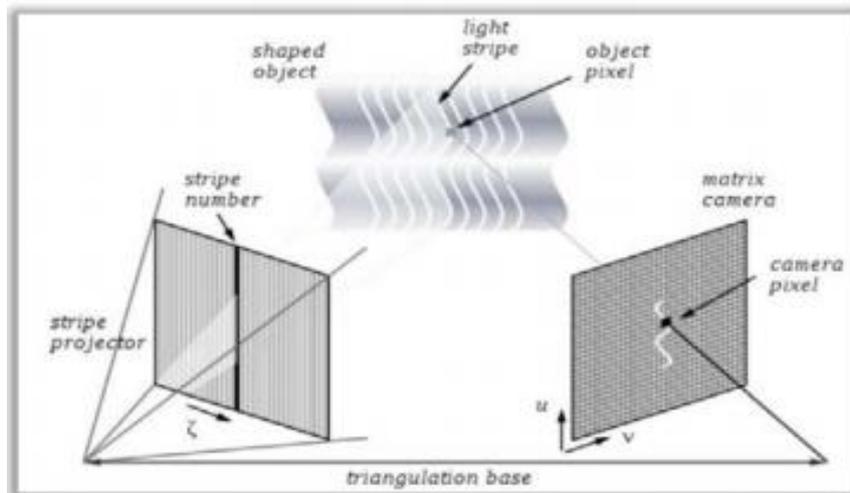


Figura 2. 12 Esquema de escaneo con escáner de luz estructurada.

2.3.2.2

### Técnicas de digitalización pasivas

Las técnicas pasivas no emiten ninguna radiación, pero en cambio pueden detectar la radiación ambiental reflejada. La mayoría de escáneres de este tipo detectan la luz visible porque es una radiación ambiental muy fácil de detectar.

Los elementos pasivos son muy baratos porque en la mayoría de casos no necesitan más hardware que una cámara digital. El problema de estas técnicas es que depende de encontrar correspondencia entre imágenes 2D. Por ejemplo, patrones repetitivos tienden a producir errores. La precisión de estos métodos depende de la resolución de las imágenes y de la densidad de los elementos identificables en ellas.

También podría utilizarse otro tipo de radiación, como la luz infrarroja.

#### 2.3.2.2.1 Sistemas estereoscópicos

Este tipo de sistemas se sirven de dos cámaras de vídeo situadas una al lado de la otra con muy poca distancia entre ellas mirando al mismo objetivo. Este sistema se basa en el principio utilizado por el sistema de visión del ser humano el cual analiza las diferencias entre ambas imágenes para poder determinar la distancia de cada punto.

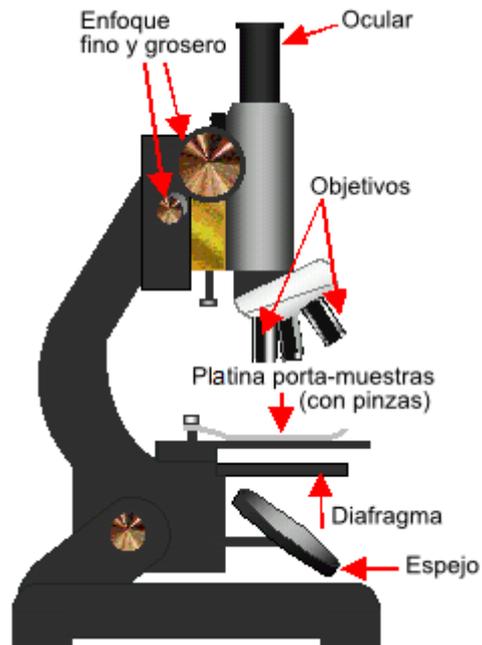


Figura 2. 13 Sistemas estereoscópicos.

#### 2.3.2.2.2 Sistemas fotométricos

Este sistema solo requiere como mínimo de una sola cámara, la cual tomará diferentes imágenes de la misma escena en diferentes condiciones de iluminación. Se consiguen capturas de movimiento partiendo siempre de unos puntos de referencia. Durante todo el proceso, se van definiendo puntos notables del objeto a medir y cada uno de ellos se referencia en las distintas fotos que se tengan.

Sus aplicaciones son muy variadas pero principalmente se utiliza en cartografía, arqueología, ordenación del territorio o arquitectura. Aunque también se utilizan en ingeniería para metrología, control de estructuras etc.

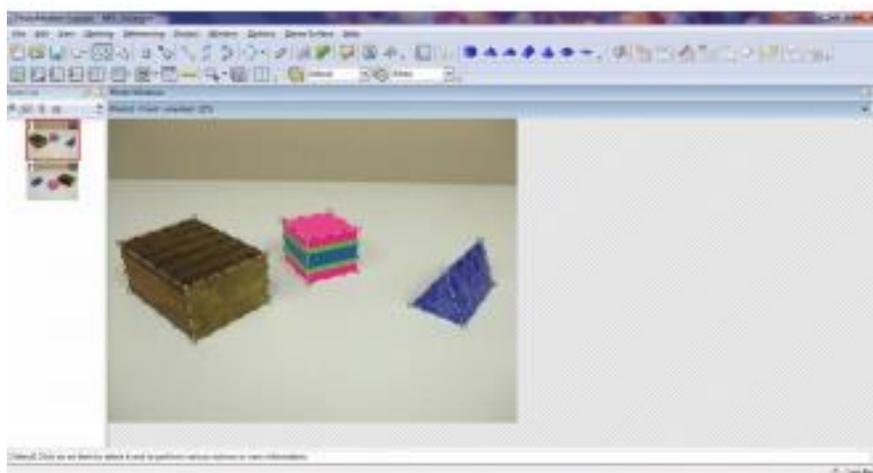


Figura 2. 14 Esquema de sistemas fotométricos

### 2.3.2.2.3 Técnicas de reconocimiento de siluetas

Este tipo de escáneres 3D usan bosquejos creados de una sucesión de fotografías de un objeto tridimensional contra un fondo muy bien contrastado. Estas siluetas se estiran y se cruzan para formar la aproximación visual HULL (es una entidad geométrica creada de la forma de la silueta de la reconstrucción 3D) del objeto. Esta clase de técnicas no son capaces de detectar algunas concavidades de un objeto, por ejemplo, la profundidad de una pieza.

## 2.4 APLICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE ESCANEEO 3D

### 2.4.1 Diseño industrial

El objetivo de este TFM es aplicar este sistema de escaneado en este ámbito de trabajo que cómo funciones principales sería:

- El desarrollo de nuevos diseños de productos
- La toma de medidas de objetos con geometría compleja
- La automatización del trabajo en instalaciones productivas.
- Obtener modelo 3D resultante, que puede ser exportado a una variedad de programas CAD & CAM y desde ahí calibrado y modificado para mejorar el diseño del producto o para integrarlo a un nuevo sistema de producción.

Esta tecnología puede ser usada en el mundo de la automoción o aeronáutica, ya que estos sectores tener un archivo digital de piezas puede agilizar procesos de fabricación.

También puede ser usado como elementos de metrología, utilizando la digitalización, se consigue tener un cuerpo u objeto digitalizado en el ordenador y medir distancias curvaturas etc. con ellos. Así, se puede comparar con las mediciones de otros aparatos.

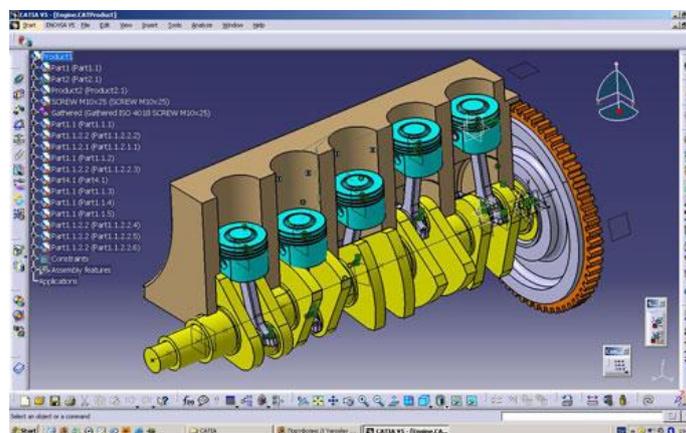


Figura 2. 15 Aplicación en la automoción.

### 2.4.2 Aplicaciones médicas

El diseño de prótesis hechas a la medida y aparatos ortopédicos requiere de verdadera precisión y de prestar atención a la anatomía individual del paciente.

Son usados de manera exitosa para producir escaneos rápidos y precisos del cuerpo o de partes del cuerpo, inclusive si la persona se mueve un poco durante la sesión de escaneo. Fácilmente capturan la geometría del cuerpo y no necesitan de targets de referencia que deban ser dispuestos en el cuerpo del paciente.

Puede ser aplicado a la ortopedia, cirugía plástica e incluso ciencia forense.

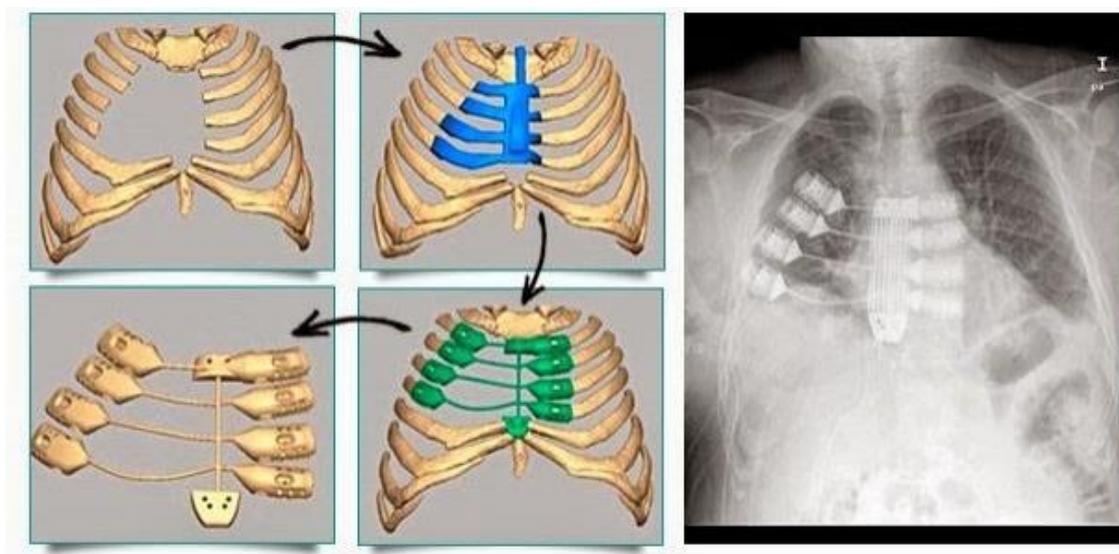


Figura 2. 16 Aplicación en la medicina.

### 2.4.3 Ciencia y educación

Universidades, colegios y laboratorios están aceptando el escaneo 3D como una poderosa herramienta que permite a los estudiantes e investigadores estudiar elementos con mayor detalle que nunca antes sin correr el riesgo de dañarlos.

A diferencia de los objetos originales, los cuales sólo pueden ser vistos a través de un vidrio en un museo en el cual son exhibidos, sus copias 3D pueden ser vistas fácilmente desde cualquier ángulo en diferentes resoluciones.

### 2.4.4 Arte y diseño

El escaneo 3D abre posibilidades ilimitadas para los artistas de cualquier tipo, permitiéndoles traducir sus ideas a la realidad. La tecnología lleva hacia adelante a la industria del cine y de los videojuegos – sería difícil o inclusive imposible lograr muchos trucos o efectos visuales antes de la llegada del escaneo 3D.

Mientras ayuda a crear nuevas piezas de arte, se encargan de realizar antiguos escenarios y monumentos al digitalizarlos en 3D para preservar sus copias exactas para la posteridad pues los objetos mismos pueden desintegrarse con el lapso del tiempo.

Esto ayudaría a la preservación del patrimonio histórico, arquitectura y al mundo de los videojuegos y la moda

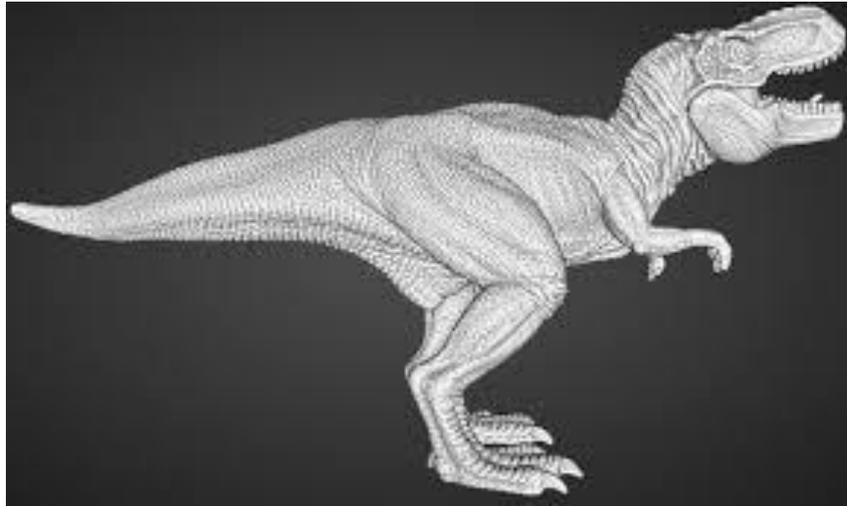


Figura 2. 17 Aplicación en el diseño y el arte

## 3- EQUIPOS DE DIGITALIZACIÓN

### 3- EQUIPOS DE DIGITALIZACIÓN 3D

El desarrollo de instrumentos láser escáner permite la obtención en un corto intervalo de tiempo de modelos de forma sencilla al encontrarse estos instrumentos fijos sobre un punto.

Para este tipo de tareas se han desarrollado instrumentos, que utilizan el principio de triangulación a través de la proyección de luz estructurada que integra mediciones de forma y, en el caso de los escáneres de mano, autorreferenciación.

#### 3.1 EQUIPOS ACTUALMENTE EN EL MERCADO

El desarrollo de esta tecnología ha permitido el desarrollo de multitud de productos, consiguiendo así un gran catálogo de equipos. Hay equipos que ofrecen unas prestaciones excelentes a un precio bastante elevado.

A continuación se muestran las principales herramientas que se encuentran actualmente en el mercado.

##### 3.1.1 HANDYSCAN 3D

Se trata de una nueva generación han sido optimizados para satisfacer las necesidades de ingenieros y profesionales dedicados al desarrollo de productos y que se encuentran constantemente a la búsqueda de formas más eficaces y fiables de realizar mediciones en 3D de objetos físicos.

En su modelo superior consigue una precisión de hasta 0,030 mm y una resolución de 0,05 mm y con unas mediciones de 480.000 por segundo. Utiliza un tipo de láser 2M seguro para la vista. Se utiliza para piezas de 0,1-4 m y tiene diversos formatos de salida como .STL, .WRL, .OBJ o .DAE. Es compatible para distintos software como son CATIA V5, SolidWork, Inventor o Solid Edge entre otros [13].



Figura 3. 1 Handyscan 3D.

### 3.1.2. Artec EVA

Se trata de un escáner 3D portátil de luz estructurada para la captura de objetos en resolución de 0,5 mm y con textura, no requiere de calibración, su manejo es similar a una cámara de video, captura a 16 fps, el equipo da como salida formatos Obj, STL, Vrmf, Ply, etc. El Artec EVA hace captura consiguiendo el escaneo por segmentos, enseguida fusionar las tomas de escaneo y se suaviza la malla, luego texturizas tu modelo para exportarlo.

La facilidad de uso, rapidez y precisión del Eva de Artec lo han convertido en un producto esencial para un amplio rango de industrias. Se utiliza en diversos campos como son: en el control de calidad, conservación del patrimonio histórico, la industria automoción, la medicina y en la industria aeroespacial. Eva ha sido empleado inclusive para escanear a Barack Obama y ayudar a hacer el primer retrato 3D de un presidente americano. Tiene un precio aproximado de unos 13.700 € [14].



Figura 3. 2 Artec EVA.

### 3.1.3 COMET 6

El escáner 3D COMET 6 de Steinbichler es de alta resolución con tecnología de LED luz azul y control de luz inteligente (ILC), que no requiere que la pieza se le aplique spray para escanearla y que viene con un sensor para facilitar el manejo ergonómico. Este equipo es la nueva generación de productos de digitalizado COMET, tiene un diseño modular, consta de una unidad de proyección con una cámara de 16 Mpix, donde se obtiene una alta resolución y velocidad de escaneo desde distancias cortas hasta grandes volúmenes de operación en digitalizado. Su capacidad de escaneo 3d va desde 145x97x80 mm<sup>3</sup> en un punto de vista de 150 hasta 1235x823x600 mm<sup>3</sup> en 1200. La velocidad de escaneo es de 1,2 segundos en su más rápida captura. El equipo requiere un equipo de cómputo, viene con un sensor colocado en el tripie de operación manual y fijación automática con el software STEINBICHLER colin3D / COMETplus.

El digitalizador COMET 6 es utilizado en aplicaciones automotrices arte, esculturas, manufactura, inspección o comparativos. En términos de proceso puedes escanear 3D, automatizar, inspeccionar superficies probar llantas, medir, capturar movimientos... [15].



Figura 3. 3 COMET 6.

### 3.1.4 FARO FOCUS 3D

El Focus3D es un escáner 3D de alta velocidad para la medición y documentación detallada. El Focus3D utiliza tecnología láser para generar imágenes tridimensionales de geometrías y entornos complejos en tan solo unos minutos con un nivel de detalle increíble. Es adecuado para la documentación de espacios grandes, control de calidad de componentes e ingeniería inversa, así como

maquetas electrónicas inteligentes y realidad virtual. Por su precisión milimétrica y su velocidad de medición, el Focus3D ofrece el método más eficaz y preciso para medir y documentar en 3D.

Gran alcance de hasta 120 m, sensor de nivel, forma compacta, facilidad de uso y registro automático sin costo adicional, se traducen en hasta un 50% de ahorro en tiempo de escaneado y procesamiento, en comparación con escáneres láser convencionales. El Focus3D crea una copia virtual y precisa de la realidad con una exactitud milimétrica, a una increíble velocidad de hasta 976.000 puntos de medición por segundo. Gracias al intuitivo concepto de control con pantalla táctil, el Focus3D es tan sencillo de manejar como una cámara digital [16].



Figura 3. 4 FARO FOCUS 3D.

### 3.1.5 Mephisto EX PRO

Con el escáner 3D Mephisto EX PRO de 4D Dynamics puedes capturar escenarios complejos, puede ser utilizado en aplicaciones de seguridad, reconocimiento facial y de cuerpo, investigación médica, automotriz y aeroespacial, entretenimiento, en alta resolución, etc. El escaner 3D Mephisto EX PRO cuenta con componentes de visión de alta calidad, una cámara de visión amplia que puede girar de alta 360grados con resolución HDTV de 1920 x 1080 que incluye sensores Kodak CCD y lentes Nikon con óptica esférica con muy amplios rangos de captura de escaneo 3D.



Figura 3. 5 Mephisto EX PRO.

### 3.1.6 OptiScan Shining 3D

Shining 3D es una empresa localizada en China y es la marca de una línea de escaners 3D con diferentes tecnologías utilizados para captura de partes físicas a información digital para ser usada como información CAD, inspección, etc.

El escaner 3D OptiScan, sistema de medición o escáner 3D portable, se utiliza para captura de piezas usando luz azul basado en los estándares no destructivos, con opciones de doble, cuádruple y lente de alta precisión, los equipos distinguen como OptiScan D, Q y D5. En el caso de múltiples lentes, estos pueden ser intercambiados sin re calibración

Estos escaners pueden ser usados para captura, medición de piezas y comparativos CAD contra ScanData. El equipo crea nubes de puntos de gran precisión y cantidad de datos. La capacidad de captura es para piezas de tamaño 100 mm a 1.5 m, el equipo se auto alinea, la información de salida es en formato STL. Los equipos OptiScan están basados en los estándares alemanes VAID / VDE 2634 publicados en 2002 que aún no se consideran como medida internacional por institutos como el ISO [17].



Figura 3. 6 OptiScan Shining 3D.

### 3.1.7 SMART 3D Escáner Laser

SMART 3D es el primero de una serie de escáneres laser para ingeniería de inversa basado en tecnología de sensores Helix de la empresa Perceptron. El sistema SMART 3D es muy simple de usar, su instalación requiere 15 minutos según su fabricante, viene con una mesa de rotación y el software SCANWORKS STUDIO , la operación del sistema es bastante sencilla a través del comando Auto Rescan.

La tecnología del SMART 3D incluye Helix detección sensorial inteligente con MEMS (Micro-Electro- Mechanical-System) usada en la industria automotriz en procesos de escaneo, una técnica que mantiene la estabilidad al capturar el cuerpo (body) del auto conforme se captura manteniendo una gran precisión.

Perceptron ha estado en el mercado de metrología y escaneo 3D en la industria de la automoción durante 30 años.



Figura 3. 7 Equipo SMART 3D Escáner Laser.

### 3.2 EQUIPO UTILIZADO.

El equipo utilizado en este Trabajo Fin de Grado que fue realizado durante 2017, se compone de un escáner de luz estructurada, DAVID Laser Scanner, que se basa en la proyección de luz estructurada mediante la triangulación, explicado en los puntos anteriores de este TFM.

DAVID Laser Scanner consiste en un software para escaneo láser 3D de bajo coste. Permite escanear y digitalizar objetos tridimensionales utilizando una cámara (por ejemplo, una cámara web), un proyector (que emitirá la luz estructurada) y dos tarjetas planas en el fondo, también llamado córner de calibración (que sirven para calibrar el equipo). Al mismo tiempo, DAVID Laser Scanner genera datos 3D en tiempo real y los muestra en la pantalla del ordenador.

La malla 3D resultante se puede exportar a formatos de archivo bien conocidos (preferentemente en .STL) y, por tanto, puede importarse y procesarse en la mayoría de las aplicaciones 3D. El software también es capaz de agarrar la textura y "coser juntos" escaneados realizados desde diferentes direcciones de visualización.

El desarrollo de DAVID Laser Scanner comenzó en septiembre de 2006 por los científicos alemanes Simon Winkelbach y Sven Molkenstruck, investigadores del Instituto de Robótica y Control de Procesos de la Universidad Técnica de Braunschweig. El concepto ha sido publicado como un documento de investigación y ha recibido el Premio al Mejor Papel en la Asociación Alemana para el Reconocimiento de Patrones (DAGM) el 14 de septiembre de 2006, en Berlín. [18]

DAVID Laser Scanner fue originalmente disponible de forma gratuita, pero ha aumentado de precio desde finales de 2008. El software de compañía, 3D Shapefusion, fue vendido originalmente por 25€. DAVID Laser Scanner ahora la empresa vende pack que viene incluido lo necesario para realizar la digitalización de las piezas.

En el 2016, DAVID Laser Scanner ha sido adquirido por HP. Lo que permite a HP consolidarse en su ecosistema 3D 'end-to-end', desde la adquisición de datos del mundo real, el diseño, la renderización hasta la impresión 3D, una completa integración de los mundos reales y virtuales con aplicaciones en la industria 4.0 en campos como la realidad aumentada y realidad virtual [18].

#### 3.2.1 PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN

David laser Scanner puede trabajar de dos formas, por un lado utilizar un digitalizador láser 3D (por ejemplo de puntero rojo), cuyo barrido de la pieza se realiza de forma manual o bien, la aplicación de una luz estructural sobre la pieza real mediante un proyector, que será la aplicación en este Trabajo Fin de Master.

Para la utilización de este software tenemos varias etapas bien diferenciadas, a continuación se mostrará cómo realizar la puesta a punto de la instalación para posteriormente.

### 3.2.1.2 ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL ESANEADO

- Ordenador: necesario con las especificaciones básicas del software para su correcto funcionamiento

Requisito del sistema:

-Windows XP, vista 7 o 8 (32 bits o 32 bits)

-Tarjeta gráfica 3D

-Puesto libre VGA o HDMI

-Dos puertos libres USB

-Recomendaciones: procesador de doble núcleo, 2GHz, Windows 7/8 64 Bits, 8GB RAM, tarjeta gráfica NVIDIA o AMD.



Figura 3. 8 Software utilizado.

- **Cámara web.** La cámara web utilizada ha sido el modelo Logitech pro C900, requerida para filmar imágenes de alta calidad.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

-Grabación full HD 1080p (1920 x 1080 píxeles)

-Enfoque automático de alta agama y corrección automática de iluminación escasa

-Diseño giratorio

-Tecnología fluid Cristal, imágenes más nítidas y colores más vivos.



Figura 3. 9 Cámara Logitech pro C900.

- **Un proyector.** Instrumento que emitirá la luz estructurada y mediante el software David Laser Scanner que se encargará de realizar los diferentes escaneos de la pieza para obtener nuestro modelo tridimensional dentro del programa.



Figura 3. 10 Proyector Acer.

- **Córner de calibración.** Consiste en una estructura que se utiliza en la calibración del equipo. Se trata de un sistema diédrico formado por dos paneles planos formando un ángulo perfecto de 90°. Sobre estos paneles planos se pegarán el patrón de calibración que nos marca el software David laser Scanner y que servirá para la correcta calibración de la cámara web.

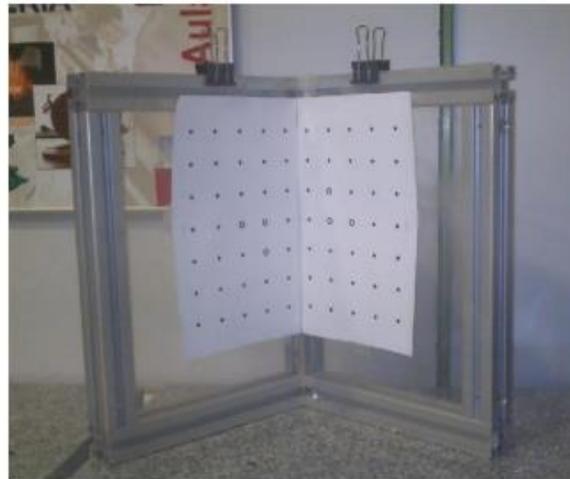


Figura 3. 11 Córner de calibración.

- **Apoyo de rotación.** La base donde apoyará la pieza real para su preciso escaneo permitirá girar la pieza 360°. Se trata de una base hecha a mano y dividida en 360° que nos servirá de guía para saber cuánto hay que girar la pieza en cada uno de los escaneos realizados sobre las piezas a digitalizar, con la finalidad de que cada escaneo se realice de la misma manera y sobre toda la superficie de revolución. El apoyo de rotación se sustenta en una base sólida.

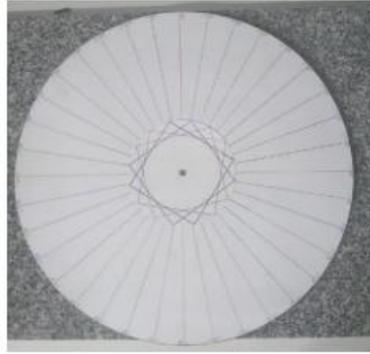


Figura 3. 12 Apoyo de rotación.

### 3.2.1.3 CONEXIÓN Y AJUSTES DE LA INSTALACIÓN

#### 3.2.1.3.1. Conexión del HARDWARE

Ahora que ya conocemos todos los elementos de la instalación necesarios para utilizar el programa, a continuación se muestra una representación de cómo deben conectarse para la utilización de la instalación.

Para un correcto funcionamiento del programa se debe ajustar el proyector y la cámara

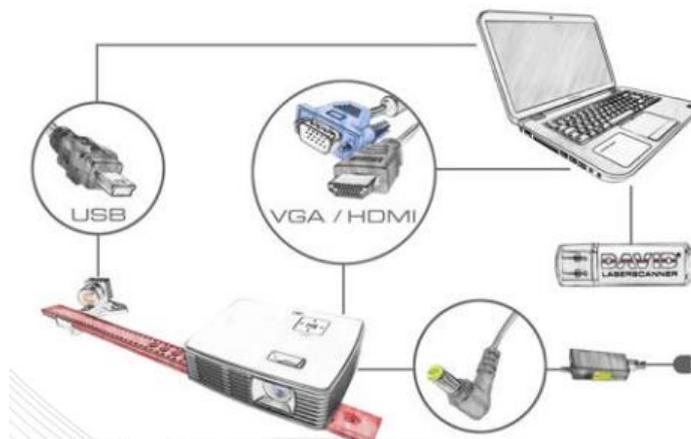


Figura 3. 13 Diagrama de conexión.

En la siguiente figura se muestra cómo se observa la instalación en el laboratorio.



Figura 3. 14 Instalación en el laboratorio.

### 3.2.1.3.2 CONFIGURACIÓN DE LA CÁMARA

La cámara puede instalarse a la derecha o la izquierda del proyector. Aunque el software tiene una recomendaciones dependiendo el tamaño de la pieza en la tabla que se muestra a continuación.

Tamaño del objeto / fragmento escaneado	Posición de la cámara
hasta 110 mm	a la izquierda del proyector
de 110 a 350 mm	cualquiera, recomendable a la izquierda
de 350 mm	a la derecha del proyector

Tabla 3. 1 Recomendaciones del software.

A continuación se muestra una figura de cómo hay que posicionar la cámara.

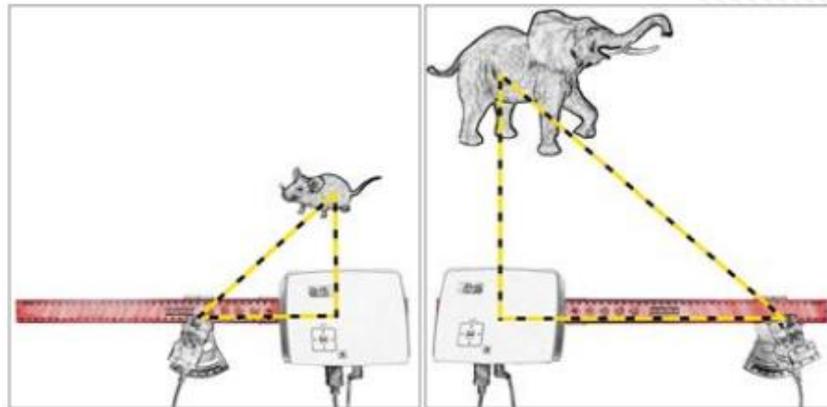


Figura 3. 14 Ejemplo de aplicación.

A su vez también hay que ajustar los controles de la cámara, ya que depende bastante del brillo, contraste, NTSC 60 Hz, hay que quitar el enfoque de la cámara... Todas estas características se han ido afinando y probando para buscar la mejor definición de a la hora de realizar la digitalización. Como se expone en las siguientes figuras.

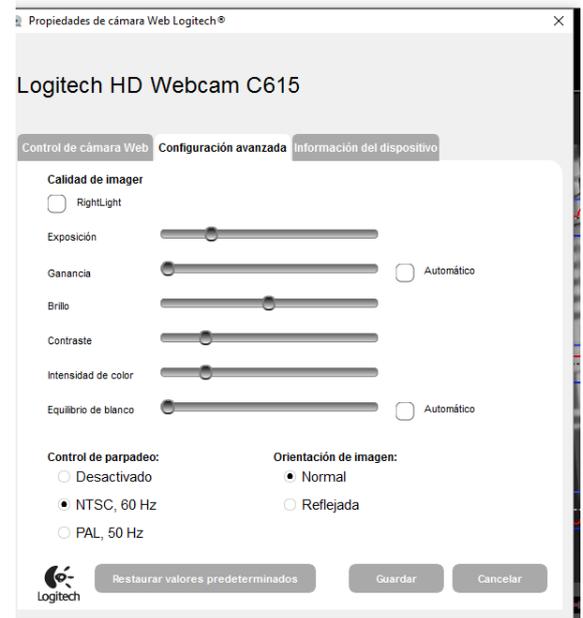
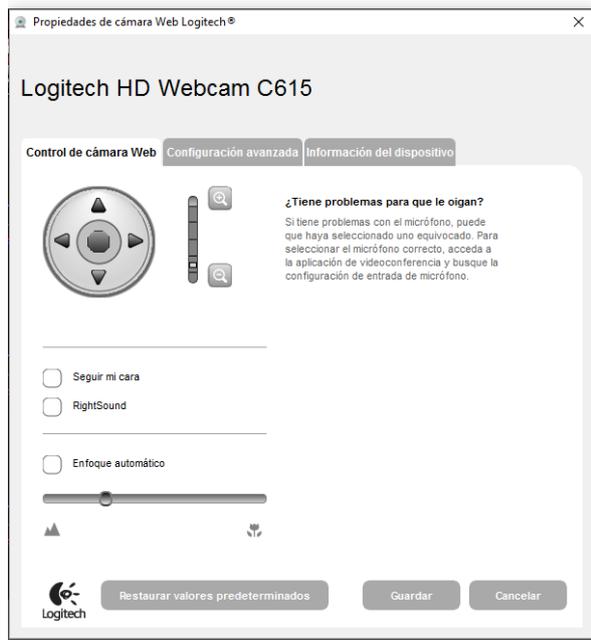


Figura 3. 15 Configuración de la cámara.

### 3.2.1.3.3 CONFIGURACIÓN DEL PROYECTOR

El proyector se suministra con las configuraciones óptimas, no se aconseja cambiar las configuraciones que se muestran a continuación.



Figura 3. 16 Configuración del proyector.

Posteriormente hay que configurar el proyector como escritorio adicional en Windows. Con el botón derecho en el escritorio se entra en la función “resolución de pantalla” o “propiedades” (depende de la versión de Windows).

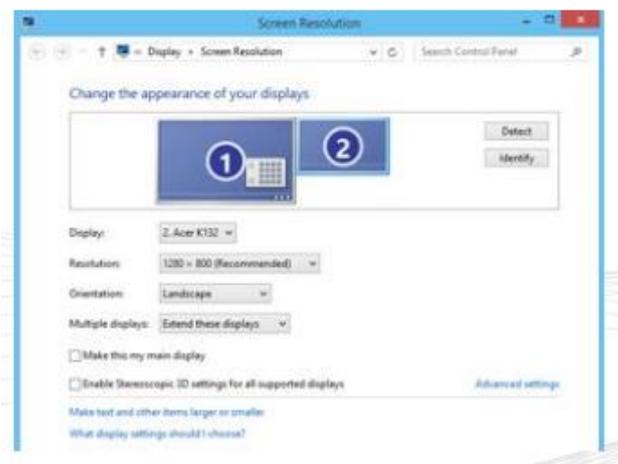


Figura 3. 17 Configuración del proyector en el ordenador.

Se instala la pantalla como un “monitor primario”. El proyector se deberá instalar obligatoriamente como un escritorio adicional (instalar el escritorio en este monitor). Esto es necesario para que David pueda proyectar las imágenes de la red visualizando a la vez la superficie activa de la pantalla

La resolución del proyector se deberá ajusta a su valor ordinario (como regla, 1280\*80 pixeles).

También hay que asegurarse de que el proyector está ajustado a 60 Hz, para esto se selecciona el proyector y se hace clic en “opciones avanzadas”, en esta ventana en el menú “monitor” hay que ajustar el valor de la frecuencia de la actualización de la imagen en 60 Hz.

Cuando las configuraciones son correctas, en la pantalla y el proyector muestra el mismo fondo de pantalla del escritorio (como se muestra en la figura) por lo contrario será diferente. El puntero del ratón puede moverse desde la pantalla hasta la superficie de la proyección. La barra de inicio de Windows y la mayoría de los iconos del escritorio se mostraran solo en la pantalla.

Si la ventana principal DAVID se muestra en el proyector entonces con ayuda del ratón se puede pinchar en el área de título y mover la ventana a la pantalla del ordenador.

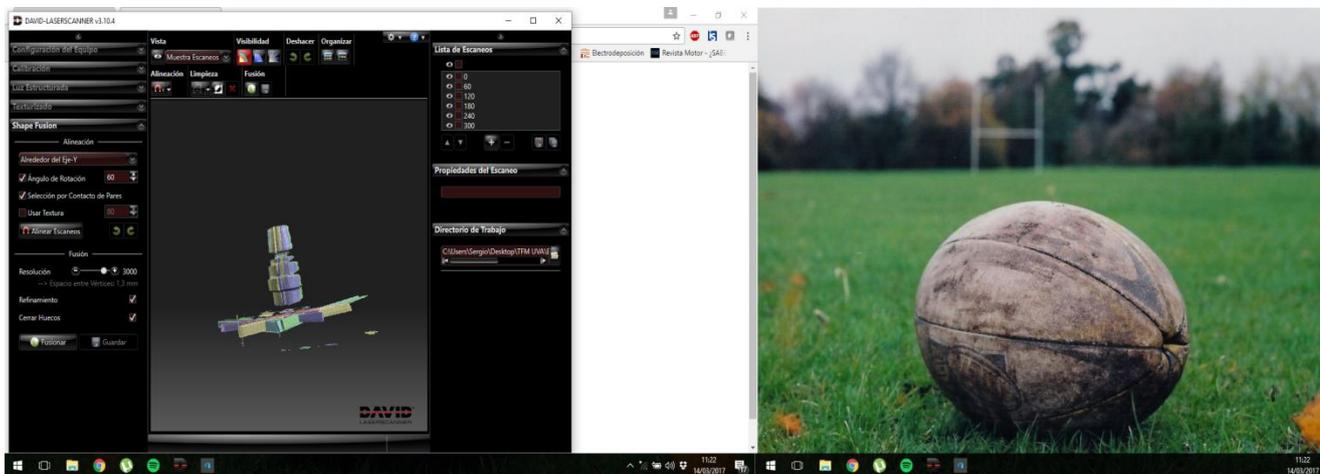


Figura 3. 18 Configuración de la doble pantalla.

### 3.2.1.3.3 CONFIGURACIÓN DE DAVID LASER SCANER

A continuación se muestra la configuración del software y se explicará las principales características de este, en cuanto a sus apartados. En los posteriores apartados se tratará el funcionamiento en cuanto al desarrollo del experimento.

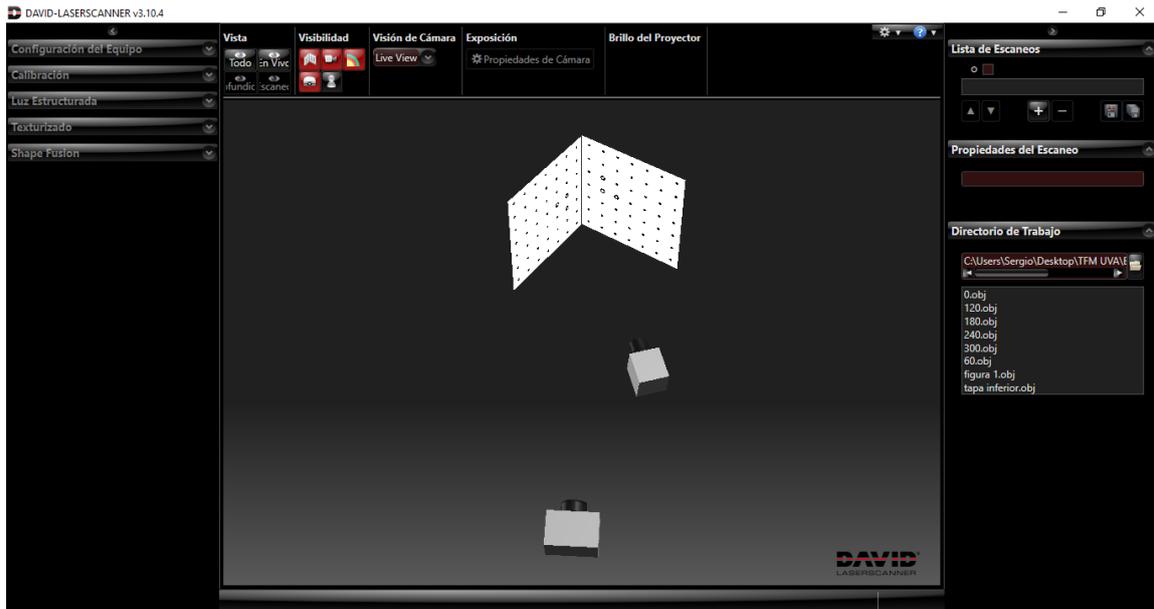


Figura 3. 19 Interfaz de entrada.

En la siguiente figura 3.19 se muestra el interfaz David Laser scanner nada más arrancar el programa.

En el menú de la izquierda de nuestro espacio de trabajo, vemos los cinco divisiones de trabajo que debemos seguir para el escaneo de piezas: Configuración de equipo, calibración, luz estructurada, texturizado y Shape fusion. A la derecha tendremos la lista de nuestros escaneos junto con sus propiedades, y un pequeño cuadro de diálogo de directorio para cargar y guardar escaneos en nuestro ordenador. Por último en la parte superior tendremos diferentes parámetros para la visibilidad, brillo y manejo de nuestros escaneos con el objetivo de poder ver mejor el modelo en el interior de nuestro espacio de trabajo. A continuación se explicarán el menú del software.

- Configuración del equipo. Es la primera casilla que se debe ajustar para comenzar con nuestro análisis y experimentación.



Figura 3. 20 Configuración del equipo.

En este apartado se configura el funcionamiento del software, en la que se puede elegir laser o luz estructurada, en este caso se elige “Structured Light Setup”, se elige la ID de la pantalla ya anteriormente definida y por último la cámara que con la que se va a realizar la digitalización. Los parámetros de la cámara están anteriormente definidos.

- Calibración. En este apartado se realizarán los ajustes pertinentes para posteriormente proceder al escaneado con una mayor precisión.



Figura 3. 21 Configuración de la calibración.

Simplemente se elegirá la opción de V3 Pattern, que se corresponde con el patrón de calibración que marca nuestro software David LaserScanner.

- Luz estructurada. Una vez calibrada la cámara ya se podrán realizar cada uno de los escaneos para obtener el modelo 3D.



Figura 3. 22 Configuración de la luz estructurada.

En cuanto a los parámetros de los patrones se elegirá “default” ya que se han conseguido mejores resultados. Basándonos en estudios anteriores se elige una orientación vertical. En este TFM se han realizado dos pruebas, una grabando la textura y otra sin grabar para comparar los resultados. En cuanto al resto de parámetros se dejan por defecto.

- Texturizado. Este apartado permite recoger la textura de la pieza y obtener un modelo más real que sin usar este apartado. Solo es usado cuando se activa en el apartado de luz estructurada.

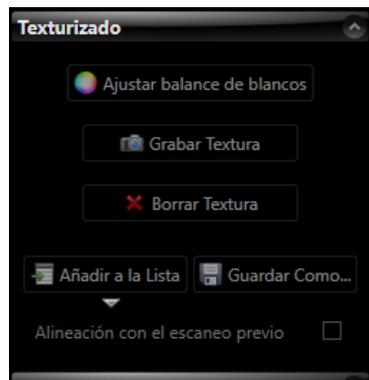


Figura 3. 23 Configuración del texturizado.

En este apartado no hay nada que modificar, únicamente el balance de blancos que se dejara por defecto.

- Shape fusion. Hay un menú desplegable donde se indicará la rotación de la pieza con respecto al eje Y de coordenadas y se irá uniendo uno por uno cada uno de los escaneos mediante el botón “alinear escaneos”, habiendo previamente marcado el ángulo de rotación de la pieza en el menú desplegable. Esto permitirá unir piezas que se encuentran en rotación previa



Figura 3. 24 Configuración del Shape Fusion.

Hay otro tipo de alineamiento que es “libre” el propio programa une los escaneos más cercanos en puntos coincidentes sin tener que girar un número exacto de grados. Si no encuentra estos puntos coincidentes, se produce un error. Por lo tanto, éste modo de alineamiento es el óptimo si se tienen muchos escaneos.



## 4- ESTUDIO EXPERIMENTAL

#### 4- ESTUDIO EXPERIMENTAL

Una vez puesta la instalación y establecido todos los ajustes, ya se puede empezar a trabajar. La forma de trabajo se divide en dos:

- La pertinente calibración que hay que realizar siempre que se ponga en funcionamiento la instalación.
- El proceso de digitalización de la pieza.

##### 4.1 PIEZAS PARA LA DIGITALIZACIÓN

En anteriores Trabajos, se realizaron con piezas fácilmente escaneables, es decir con piezas que no eran brillantes o transparentes.

Otro de los factores que hay que tener en cuenta la zona de la pieza que se quiere escanear, y así colocarla de una manera u otra. No todas las áreas visibles de los objetos se pueden escanear. Así que después de barrer una o dos veces sobre el objeto desde arriba, debe hacerse otro barrido desde debajo de la cámara. Hay que tener en cuenta que esto sólo es posible si la cámara está suficientemente elevada sobre la mesa/suelo. En el caso de esta pieza no hemos realizado escaneos de la parte inferior (parte que apoya) pues no era necesario obtener esa información.

En el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster, se trabaja con distintos recubrimientos. Ya que el principal objetivo era la comparación de medida de una pieza metálica (figura) con un sistema de digitalización y compararlo con una MMC, pero los resultados obtenidos no acompañaban, así que se decide dar a la pieza distintos recubrimientos para poder realizar medidas más certeras y resultados más fiables.



Figura 4. 1 Pieza original.

Cómo se comenta anteriormente se decide dar distintos tratamientos a la pieza.

- Se aplica un negro mate a la pieza. Se trata de una pintura mate para cualquier tipo de superficie.



Figura 4. 2 Pieza con revestimiento negro mate.

- Se aplica un revestimiento blanco. Con una base de resina acrílica para alcanzar un brillo y unas excelentes características contra la acción del clima.



Figura 4. 3 Pieza con revestimiento blanco.

- Se baña en aceite caliente la pieza con un aceite durante 20 minutos. Esto da a la pieza un color un poco más oscuro que la pieza inicial y con la que no se modifica las propiedades del acero.



Figura 4. 4 Pieza horneada.

- Se le aplica polvos de talco a la pieza. Reduce el brillo de la pieza consiguiendo que el equipo pueda medir de una forma correcta. Este mismo procedimiento se aplicará a la pieza tostada para observar sus resultados.

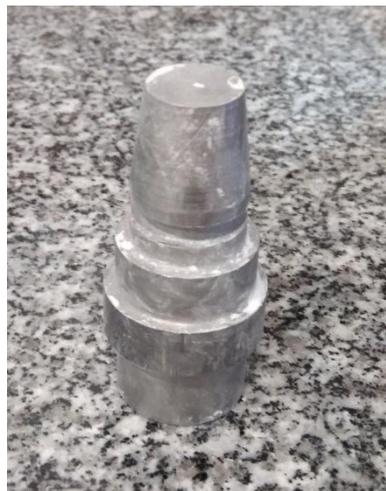


Figura 4. 5 Pieza con polvos de talco

## 4.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Para la realización de las pruebas, previamente hay que realizar la calibración. Para ello la cámara debe apuntar tanto al córner de calibración (los puntos de la plantilla de calibración deben estar iluminados por el proyector y deben aparecer todos en la imagen de la cámara), como a la pieza cuando se haya terminado de calibrar (anteriormente a la colocación del objeto se habrá retirado el córner). Un detalle que se debe tener en cuenta, es que en el mismo lugar donde se coloca la esquina de calibración, se debe colocar el objeto, ya que al ubicar el córner se ha enfocado tanto la cámara con el proyector y este enfoque no puede cambiar al realizar los escaneos.

Los siguientes pasos servirán de guía a través del proceso de diálogo de calibración de la cámara de DAVID:

1. Asegurarse de que la cámara está conectada al PC y que los controladores de la cámara están instalados.
2. Hacer clic en el menú deslizante de la parte superior y elegir la cámara. Si la cámara no aparece en la lista, probar a reconectarla y mirar el menú desplegable de nuevo. Los ajustes han sido realizados anteriormente
3. Colocar la cámara delante del córner de calibración (ver aquí un manual de construcción), de tal manera que el patrón de calibración sea completamente visible en la imagen de la cámara. El proceso de calibración automático de la cámara necesita una imagen con un alto contraste. (Por lo general, los puntos de calibración son de color negro y el fondo es blanco. Si se imprimen los puntos claros sobre fondo oscuro, marcar la opción de “impresión invertida”.) Para obtener un contraste adecuado, se tiene que ajustar la cámara (pulsando el botón “Configuración de la Cámara” y/o cambiando la fuente de luz).
4. Si la calibración falla en modo automático, aparecerá un mensaje de error. A menudo, DAVID ha encontrado demasiadas marcas. Se puede ayudar fácilmente a DAVID seleccionando el modo de calibración “Borrador”. El “tamaño” se refiere al tamaño de la goma de borrar rectangular manejada con el puntero del ratón. Se debe usar el botón izquierdo del ratón para “limpiar” las marcas falsas de la imagen (áreas de imagen oscura).
5. Asegurarse de que la escala del patrón de calibrado impreso es correcta. El valor en el campo de entrada llamado “Escala (mm)” y la distancia (en mm) entre los centros de dos puntos de calibración debe coincidir a la perfección.
6. Asegurarse de que la escala del patrón de calibrado impreso es correcta. El valor en el campo de entrada llamado “Escala (mm)” y la distancia (en mm) entre los centros de dos puntos de calibración debe coincidir a la perfección. Como se observa en a figura.

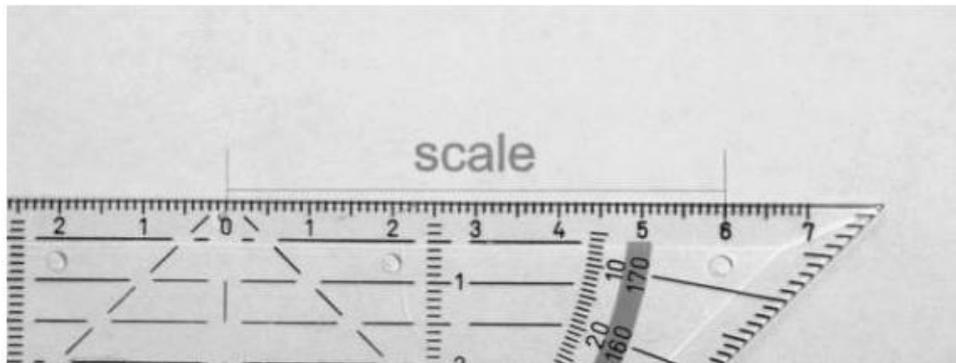


Figura 4. 6 Escala de calibración.

7. Pulsar el botón “Calibración de la cámara”. Si la calibración de la cámara se realiza correctamente, deberían verse pequeñas cruces rojas en la imagen en vivo, los cuales marcan los centros de los puntos de calibración.

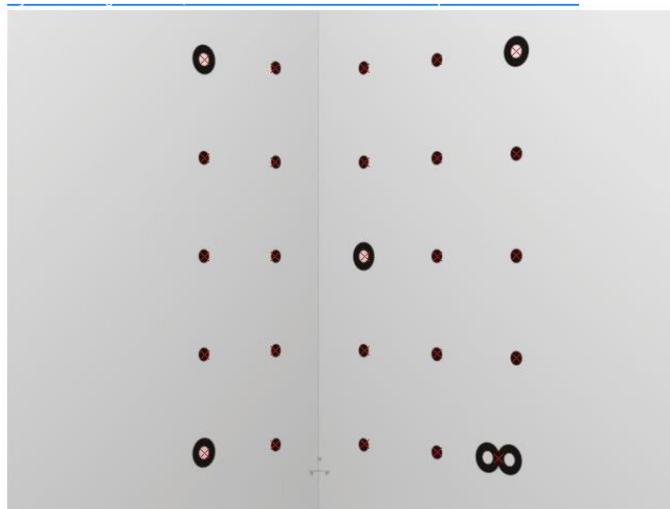


Figura 4. 7 Calibración de la cámara.

También aparece un mensaje que verifica que la calibración ha sido satisfactoria y mostrará los ángulos en los que se encuentra la cámara y el proyector.

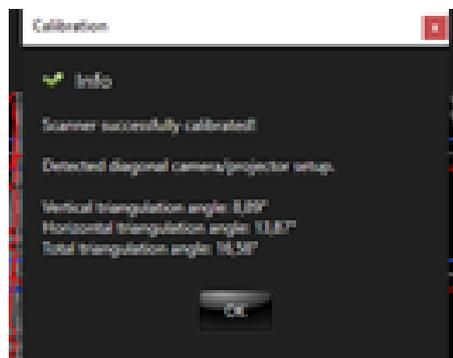


Figura 4. 8 Calibración correcta.

Si la calibración falla, en primer lugar tratar de reajustar la imagen de la cámara (apertura, tiempo de exposición, condiciones de luz). Utilizar el Modo Borrador para limpiar las zonas “sucias”.

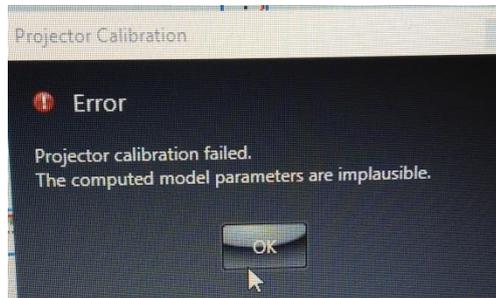


Figura 4. 9 Error en la calibración.

Una vez que se consigue la calibración, en el córner de calibración aparecerán unos cuadrados perfectos que significará que la calibración ha sido un éxito como se expone en las siguientes imágenes.



Figura 4. 10 Instalación calibrada.

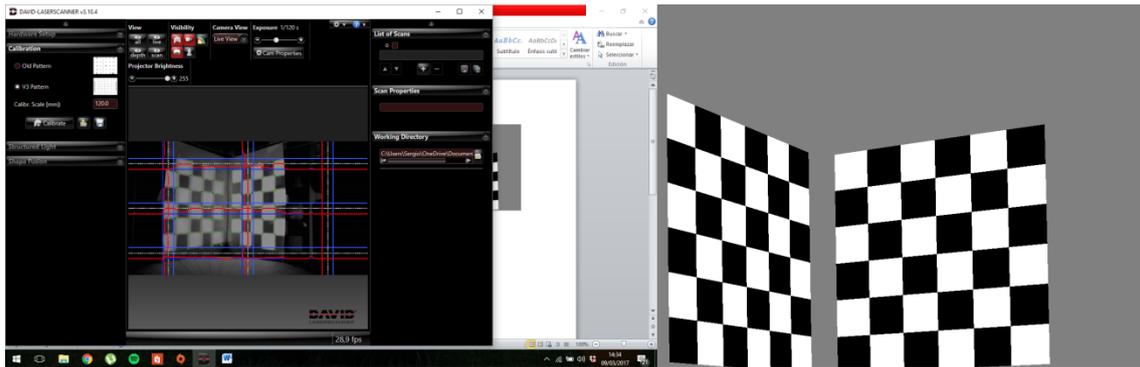


Figura 4. 11 Instalación calibrada vista desde el ordenador

### 4.3 ESCANEADO DE LAS PIEZAS

Después de calibrar la cámara se puede iniciar el escaneo. Al igual que ocurre en la calibración, hay que tener un ambiente oscuro en la habitación para que no se falseen los datos.

En este TFM, se trabaja con piezas de revolución, por lo que las medidas se realizarán cada  $60^\circ$  ( $0,60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ$  y  $300^\circ$ ), para tratar de recoger todas las medidas de la pieza.

Se seguirán los siguientes pasos servirán de guía a través del diálogo del escaneo láser 3D de David:

1. Colocar el objeto que se desea escanear entre la cámara y el Córner de Calibración (o más cerca posible). Debe ser visible en el centro de la imagen de la cámara. No mover el córner de calibración o la cámara.
2. Una vez que se ha configurado el programa, como se ha expuesto anteriormente, únicamente sólo hay que dar a "iniciar"

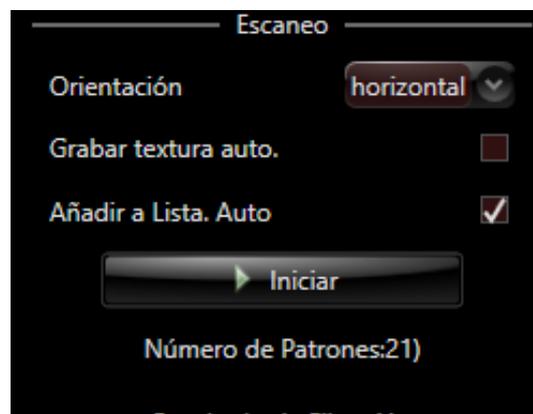


Figura 4. 12 Inicio del escaneo.

Como se observa en la figura 4.13 justo en el momento del escaneo.

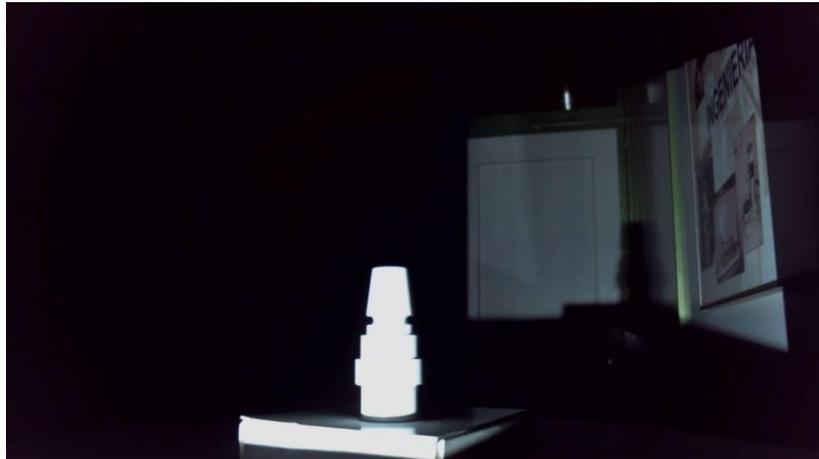


Figura 4. 13 Pieza durante el escaneo.

3. Se realiza una rotación de 60º cada escaneo, para obtener todas las vistas de la pieza.



Figura 4. 14 Todos los escaneos realizados.

Se les indica un nombre ya que puede resultar bastante engorroso.

4. Teniendo todos los escaneos, a continuación lo que se hace es eliminar todas las partes que no representan el objeto, es decir, lo que hemos llamado “ruido”.

El propio programa posee un botón para “limpiar” la imagen de distintas maneras: formando rectángulos, polígonos etc.

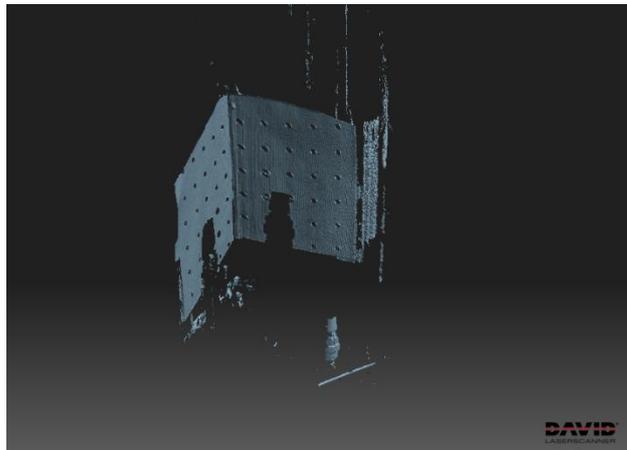


Figura 4. 15 Escaneo de la pieza sin eliminar ruido.

El objetivo de esto es dejar únicamente la imagen para poder trabajar con ella como se ve en la siguiente figura.

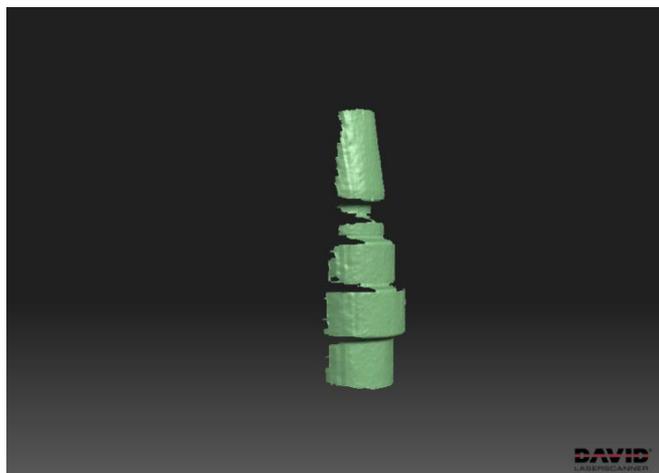


Figura 4. 16 Escaneo de una parte de la pieza.

5. Con los escaneos limpios, se procede a unir, es decir, alinear para que ya se asemeje al objeto que se desea digitalizar. El programa tiene varias opciones de alineamiento.

En este TFM se ha utilizado el método de alineamiento alrededor del eje Y ya que el abanico de grados ha sido muy amplio y todos los giros han sido medidos. En la siguiente imagen se muestra todas las caras escaneadas y alienadas.

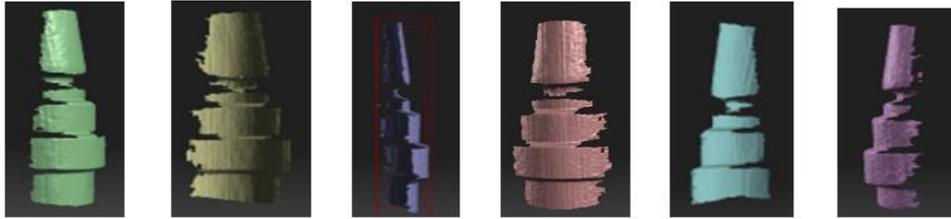


Figura 4. 17 Escaneo de todas las partes de la pieza.

En esta figura se muestra todos los escaneos unidos para las posteriores etapas.

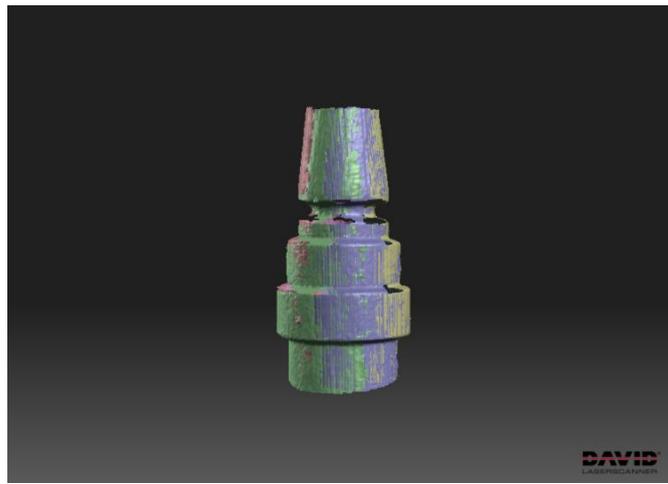


Figura 4. 18 Todos los escaneos unidos

- Después de haber alineado y limpiado los escaneos de forma precisa, la fusión de la malla puede tener lugar. Simplemente presionar “Fusionar” y después de algunos segundos o minutos, se verá el resultado.

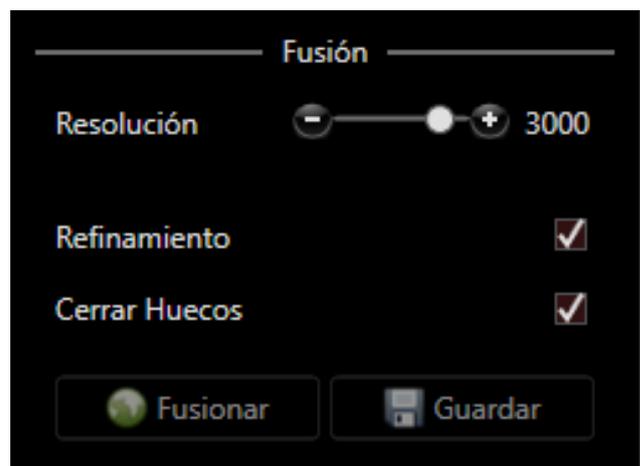


Figura 4. 19 Momento de la fusión de los escaneos.

Y el resultado que se obtiene es el siguiente, del que se puede obtener un archivo OBJ, PLY ó STL para posteriores usos de estos.

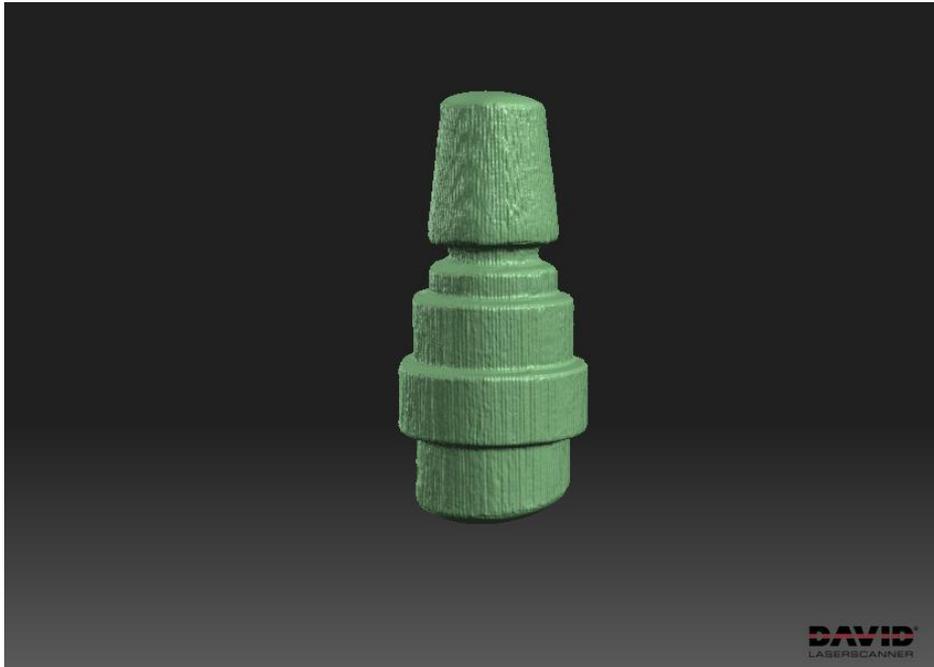


Figura 4. 20 Pieza fusionada.

## 5- RESULTADOS

## 5- RESULTADOS

Se realizan distintas pruebas con la misma pieza, con el objetivo de obtener cual es el mejor revestimiento que se le puede dar a la pieza, viendo así cuál es la mejor forma de medir y digitalizar, así como conocer cuáles son las restricciones del software.

En cada experimento se presentan dos tipos de digitalización, como se dijo anteriormente, la primera sin tener activada la textura y la segunda con esta activada.

### 5.1 PIEZA ORIGINAL

Se toma la pieza original, sin ningún tipo de recubrimiento. El ejemplo en un proceso productivo, sería nada más salir de la fabricación.

En la figura 5.1 se realiza sin textura.

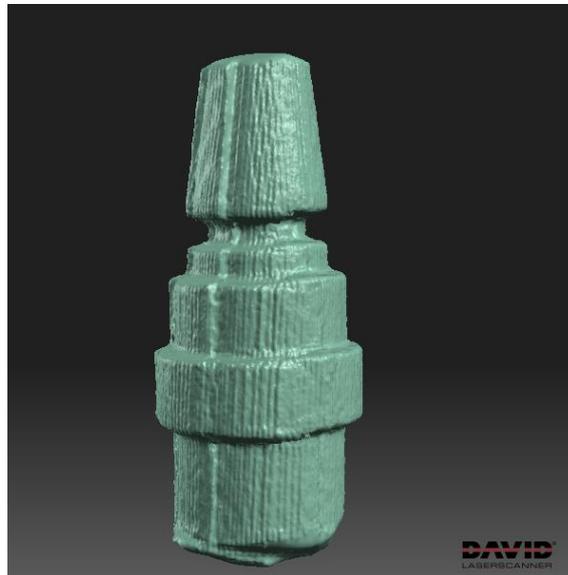


Figura 5. 1 Escaneo de la pieza original.

La pieza original, tiene mucho brillo, lo que produce que la cámara no capte bien la pieza, ya que la luz estructurada hace que se refleje e incluya resultados erróneos. Se observa cómo la superficie es rugosa siendo elegible a la hora de poder medirla.



Figura 5. 2 Escaneo con textura de la pieza original.

En el segundo experimento se mete textura, pero ocurre lo mismo que en el caso anterior se hace casi imposible recoger alguna medida debido al brillo de la pieza.

## 5.2 PIEZA CON NEGRO MATE

Se aplica un negro mate a la pieza, con el fin de evitar brillos a la hora de la digitalización.

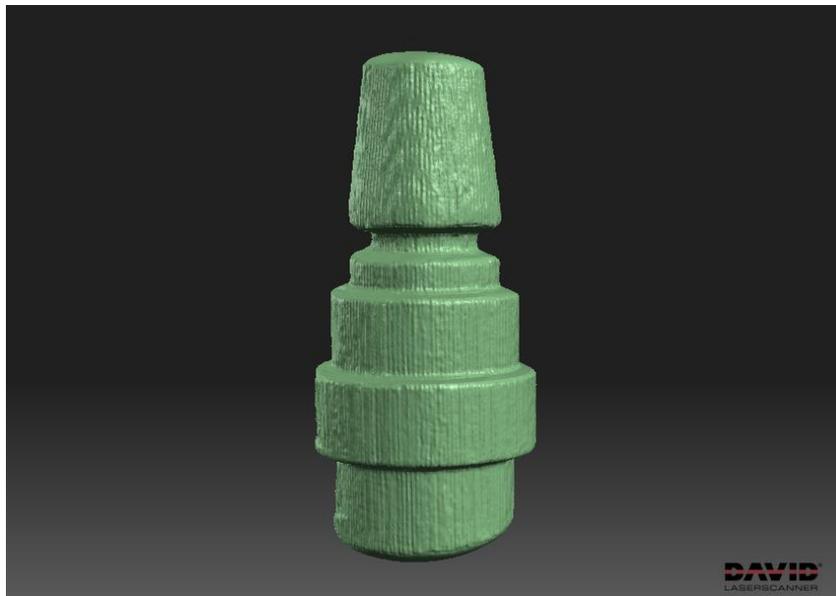


Figura 5. 3 Escaneo de la pieza con revestimiento negro mate.

Se observa que se mejora considerablemente el escaneo de la pieza, así como se evita que aparezcan bordes indeseables debido a los brillos.

Esta pieza actualmente se podría medir en algún software de medida como el MeshLab, y tener resultados tangibles.

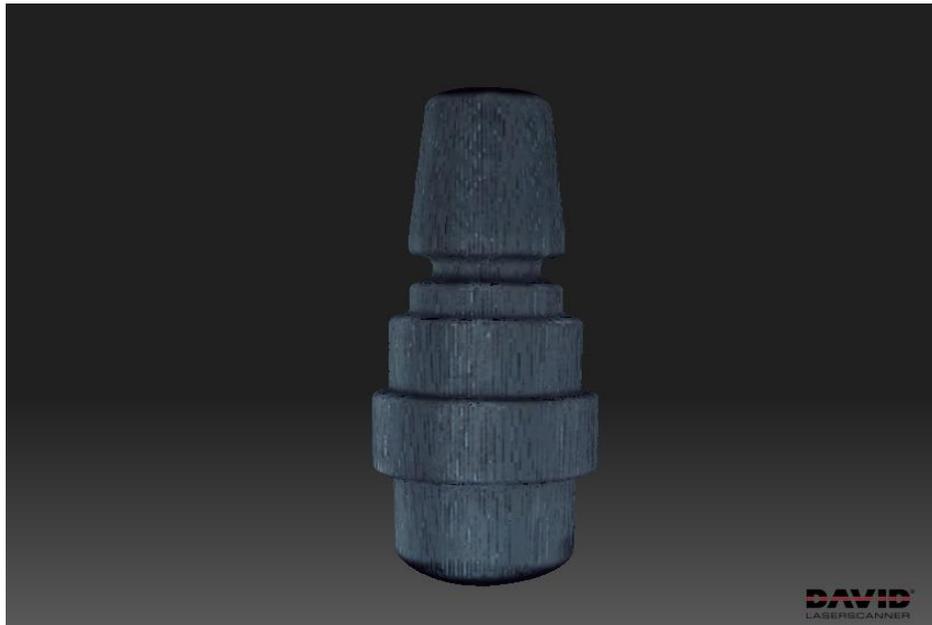


Figura 5. 4 Escaneo con textura de la pieza negro mate.

Al aplicar la textura se ve el color negro de la pieza, se mejora un poco la rugosidad respecto a la anterior. Esta pieza puede ser medida e interpretada por los software de medida.

### 5.3 PIEZA CON REVESTIMIENTO BLANCO

En este caso a la pieza se le aplica un revestimiento blanco con una base de resina acrílica para alcanzar un determinado brillo.

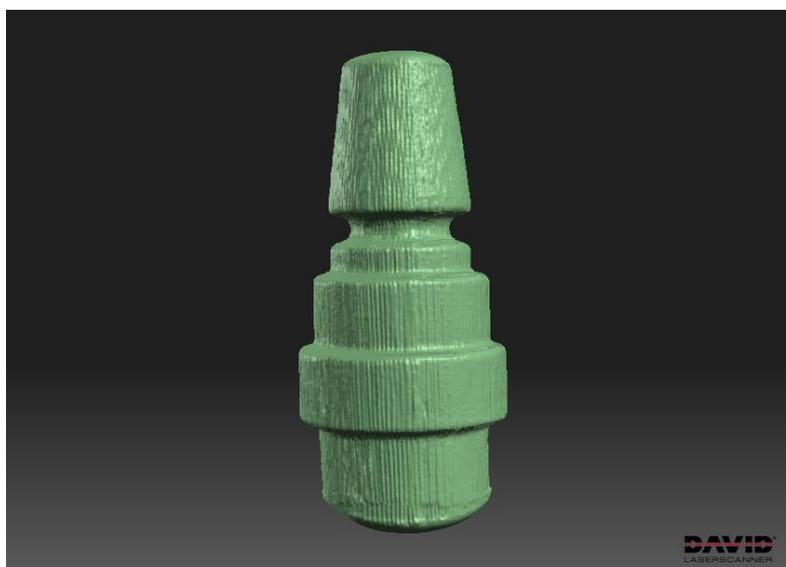


Figura 5. 5 Escaneo de la pieza con revestimiento de color blanco.

Se obtiene unas buenas características, se evita parte del brillo, por lo que la digitalización es bastante correcta. Se eliminan los bordes no deseados obtenidos en la pieza original.

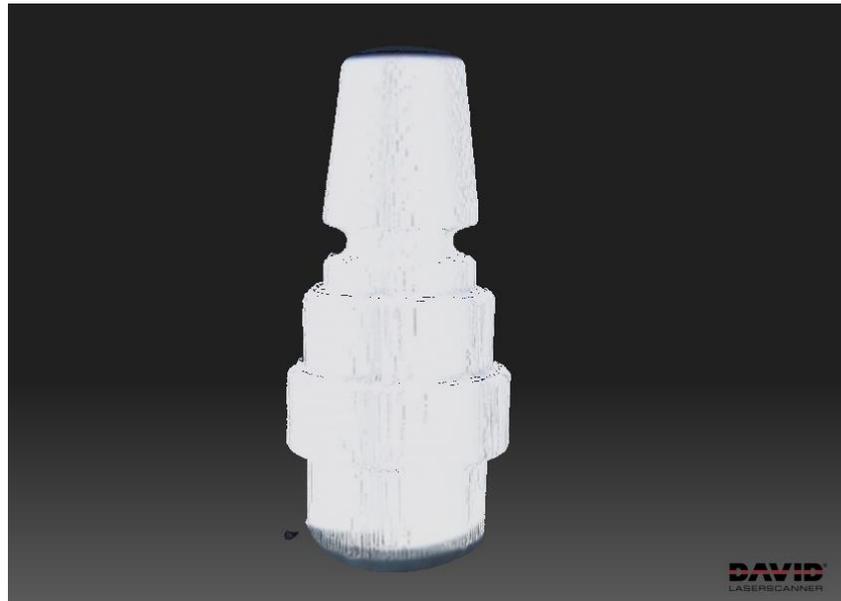


Figura 5. 6 Escaneo con textura de la pieza blanca.

En este caso la textura es mucho peor que el negro mate, que se hace difícil mente visible e incluso se meten colores no deseables.

#### 5.4 PIEZA BAÑADA EN ACEITE CALIENTE

En este caso en vez de dar un revestimiento se decide introducir la pieza en el horno durante 20 minutos para reducir brillos de esta, y conseguir una mejor digitalización.



Figura 5. 7 Escaneo de la pieza tostada en el horno.

En este caso no mejora, e incluso se observan los bordes de la pieza original debido a los brillos.



Figura 5. 8 Escaneo con textura de la pieza tostada.

Al incluir la textura, se observa que los bordes persisten y que este tipo de tratamiento no elimina el brillo, lo que dificulta seriamente la medida de la pieza.

#### 5.5 PIEZA CON POLVOS DE TALCO

Como en casos anteriores, se aplica polvos de talco a la pieza para evitar el brillo de la pieza.

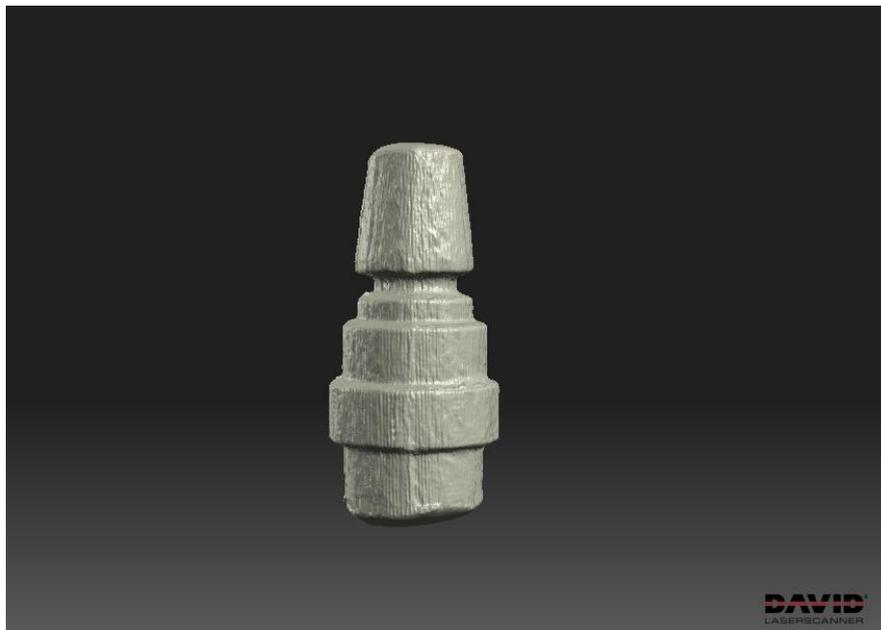


Figura 5. 9 Escaneo de la pieza aplicando polvos de talco.

Se consigue un modelo digitalizado bastante elegible, se ha mejorado los bordes y se ha conseguido una figura uniforme, aunque no se obtienen mejores resultados que con el revestimiento.

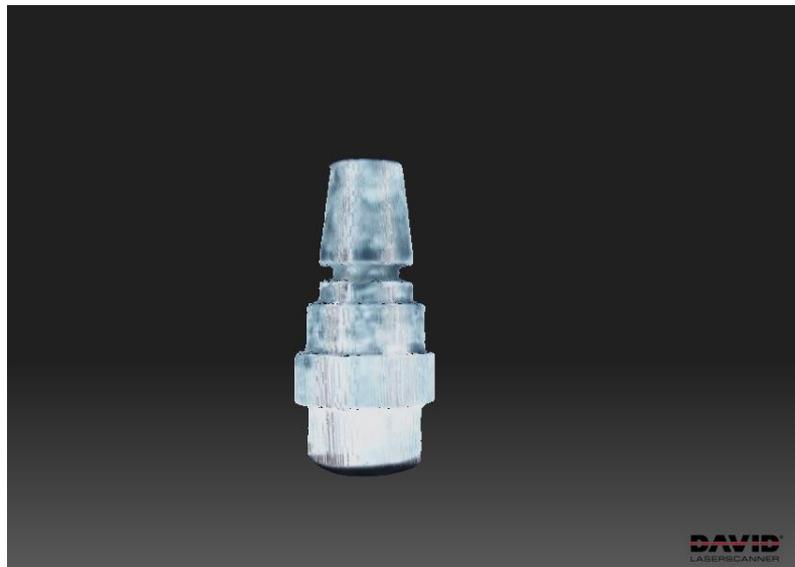


Figura 5. 10 Escaneo de la pieza con textura con polvos de taco.

Al aplicar la textura, se consigue un modelo algo más real, aunque se observan motas de talco en la imagen que podrían dar resultado a error.

### 5.5 PIEZA BAÑADA EN ACEITE CON POLVOS DE TALCO

A la pieza anteriormente hornada y ante los resultados obtenidos se decide aplicar polvos de talco, para intentar mejorar estos resultados.

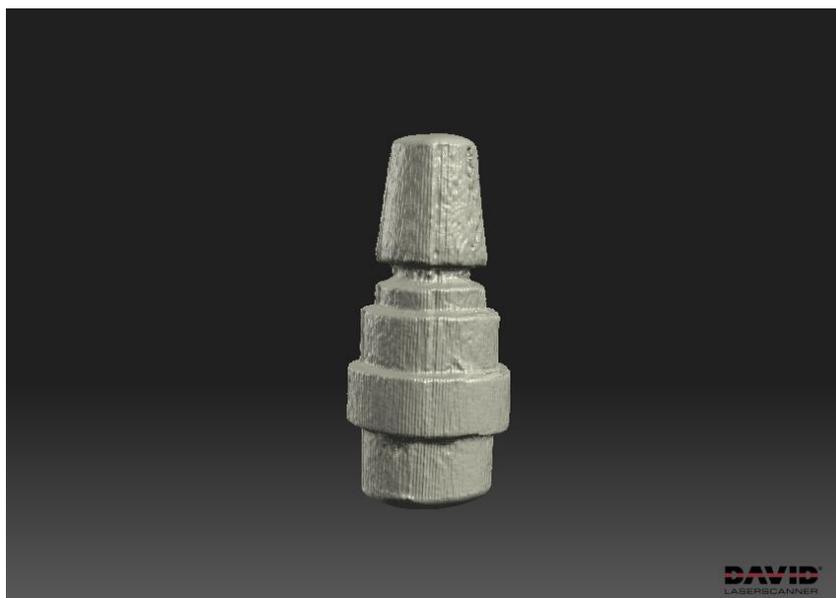


Figura 5. 11 Escaneo de la pieza horneada y con polvos de talco.

No se obtiene buenos resultados ya que se observa que se pueden ver los borde producidos por los brillos y a su vez tambien se ve que se acumulan polvos de talcos en el anillo superior.



Figura 5. 12 Escaneo con textura de la pieza horneada y con polvos de talco.

Aplicando la textura, tampoco se obtienen buenos resultados en la digitaiación, se consiguen rugosidades y se pueden ver los bordes debidos a los brillos.

Se recoge en la tabla 5.1 un resumen de los resultados obtenidos.

Tipo	Brillo	Textura	Rugosidad	Tratamiento permanente	Medición
Original	Alto	Mala	Baja	No	No
Negro mate	Muy bajo	Buena	Media	Si	Si
Revestimiento blanco	Bajo	Regular	Media	Si	Si
Bañada en aceite	Alto	Mala	Baja	Si	No
Polvos de talco	Bajo	Regular	Media	No	Si
Bañada en aceite con polvos de talco	medio	Regular	Baja	Si	no

Tabla 5 1 Resumen de resultados.

## 6- ESTUDIO ECONÓMICO

## 6- ESTUDIO ECONÓMICO

Se presenta un presupuesto que refleja las labores necesarias para la consecución de un modelo digital 3D de una pieza industrial, desde la preparación del equipo de escaneo hasta la entrega digital del modelo.

El estudio económico se puede dividir en dos grandes bloques:

- Costes Directos: Relacionados directamente con la puesta en marcha y desarrollo de la instalación. En la que se tendrá en cuenta:
  1. Coste del personal
  2. Coste del material amortizable
  3. Coste del material no amortizable
  
- Costes Indirectos: se incluirán todos los gastos derivados, pero no directamente relacionados con el mismo.

### 6.1 COSTES DIRECTOS

#### 6.1.1 COSTE DE PERSONAL

En primer lugar, se observan los días efectivos de trabajo anual, así como las horas efectivas trabajadas al año, considerando ocho horas trabajadas por día. Los 365 días existentes durante el año, restamos los días que no se van a trabajar: sábados y domingos, vacaciones, enfermedad, etc.

Tabla 6. 1 Horas anuales trabajadas.

Concepto	Días/año
Días anuales totales	365
Sábados y domingos	-104
Días de vacaciones	-25
Días festivos	-12
Días medios por enfermedad	-15
Cursos de formación	-3
Total días efectivos	206
Total horas anuales (8 horas día)	1648

Tenemos un total de 1648 horas al año. Probablemente la persona responsable y que efectúe este trabajo será ingeniero industrial o ingeniero técnico industrial.

Tabla 6. 2 Coste de un trabajador al año.

Concepto	Euros/año
Sueldo neto	28000
Seguridad social + IRFP	9800
Coste anual	37800
Coste horario (1648 horas)	22,94

Una vez que tenemos conocimiento de las horas que se van a trabajar y cuanto coste va a tener, calculamos el coste por hora del trabajador. Para ello dividimos el coste total del ingeniero entre el número de horas anuales. El coste total por hora será por tanto de 22,94 €/hora, como se indica en la tabla 6.2.

### 6.1.2 COSTE DEL MATERIAL AMORTIZABLE

Como material amortizable nos referimos básicamente a equipos informáticos y software. Dado que la mayoría de estos aparatos se quedan obsoletos aproximadamente en el mismo tiempo que se produce la amortización, no se considerará valor residual.

Tabla 6. 3 Coste material amortizable.

Concepto	Inversión (€)	Amortización (años)	Coste anual(€)
Ordenador Intel Core i5, 8Gb RAM	800,00 €	5	160
Microsoft Windows 10	120,00 €	5	24
Microsoft Office 2010	500,00 €	5	100
Licencia David Laser Scanner	400,00 €	5	80
Proyector Acer	851,00 €	5	170,2
Cámara Logitech c615	90,00 €	5	18
Córner de calibración	10,00 €	2	5
apoyo de calibración	2,00 €	2	1
TOTAL	2.773,00 €		558,2

Cómo resultado tenemos 558,2 €/anuales, que lo dividiremos por las horas de trabajo obtenidas anteriormente (1648 horas) para saber el coste horario. El coste horario del material amortizable que tiene este proyecto es de 0,34 €/año.

### 6.1.3 COSTE DEL MATERIAL NO AMORTIZABLE

El coste de material no amortizable se refleja en la siguiente tabla. Los conceptos relacionados son los de los materiales necesarios para el desarrollo del proyecto.

Concepto	Euros
Material consumible	160
Papel	25
Material laboratorio	100
Total	285
Total + IVA	344,85

### 6.2 COSTES INDIRECTOS

En este apartado se incluirán los costes derivados del proyecto pero no imputables al mismo, como serían los gastos en teléfono, energía o gestión.

Tabla 6. 4 Costes indirectos.

Concepto	Coste (€)
Consumo energético	150
Teléfono e internet	20
Total	170
Total + IVA	205,7

### 6.3 COSTE TOTAL DEL PROYECTO

Para lograr este coste total se deben de sumar todos los costes calculados anteriormente. En primer lugar se calculará el coste asociado al personal en función de la dedicación al proyecto.

Tabla 6. 5 Coste de personal en la duración del proyecto.

Ingeniero Industrial	Horas de trabajo	Coste horario (€)	Coste total(€)
	80	22,94	1376,4

Tabla 6. 6 Coste total del proyecto.

Concepto	Coste (€)
Coste personal	1376,4
Coste material amortizable	2773
Coste material no amortizable	344,85
Costes indirectos	205,7
Total	4699,95

En resumen, el coste total del TFM elaborado asciende a 4.699,95 € en los 4 meses en los que se ha trabajado en la digitalización 3D.



## 7- CONCLUSIONES

## 7- CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

### 7.1 Conclusiones

Tras haber realizado toda la fase experimental, se obtiene una serie de conclusiones llegadas en este Trabajo Fin de Máster.

- Se ha puesto en marcha una instalación de digitalizado 3D con luz estructurada, usando elementos de bajo coste, buscando la integración de este elemento en una línea de proceso productivo. La limitación de este sistema está debido a los brillos emitidos por la pieza de revolución metálica, por lo que se conseguían resultados erróneos e imposibles de sacar unas medidas exactas.
- Se ha trabajado con distintos revestimientos, para tratar de enmendar las limitaciones que tiene este tipo de mediciones. Estos revestimientos son usados en la industria y utilizados dependiendo del proceso productivo en el que se trabaje.
- Tras aplicar el revestimiento de negro mate, se consigue eliminar la mayor parte de los brillos de la pieza, a su vez el modelo resultante es bastante elegible y hace posible la medición de la pieza. En su contra es un revestimiento permanente.
- Aplicando un revestimiento blanco con una base de resina acrílica, se eliminan la mayor parte de los brillos de la pieza, y se consigue una pieza disponible para la medición, aunque se obtienen peores resultados que el revestimiento anterior.
- Tras bañar la pieza en aceite caliente, se reduce el brillo a simple vista, pero los resultados que se obtiene no son buenos, ya que no se consigue eliminar la mayor parte de los brillos. El resultado de esta técnica no es muy favorable a la hora de realizar la digitalización 3D.
- Otra técnica que se ha usado en este TFM ha sido echar a la pieza una capa de polvos de talco. Primero a la pieza original, en la que la digitalización obtenida

ha sido aceptable, se consiguen eliminar brillos lo que hace de esta técnica bastante provechosa ya que no es un revestimiento permanente y que una vez medida estos polvos pueden ser eliminados.

- Esta técnica de polvos de talco se aplica también a la pieza tostada, con el objetivo de mejorar la digitalización de la pieza. Se reducen brillos, y se consigue una digitalización aceptable.

Este TFM ha sido realizado con un software de bajo coste y se ha conseguido solucionar la limitación del brillo de las piezas, con técnicas utilizadas en muchos procesos productivos. Finalmente, David Laser Scanner se presenta como una herramienta muy potente capaz de reproducir digitalmente cualquier objeto, en un reducido tiempo y con una digitalización bastante aceptable.

## 7.2 Líneas futuras

Tras ver que esta tecnología está en auge, se van a exponer unas líneas futuras de mejora.

- Tras solucionar la limitación del brillo de la pieza metálica, poder introducir la luz estructurada como sistemas de medidas en un línea de producción y poder automatizarlos, para obtener modelos de digitalización 3D a tiempo real.
- La digitalización de piezas, almacena una gran cantidad de datos, lo que haría posible implementar un sistema BIG DATA en la línea de producción, haciendo así posible obtener todos los datos y poder anticiparse previamente a averías o bien al desgaste de útiles.
- Una vez obtenida la digitalización, se pueden realizar cambios de la pieza a tiempo real y en cualquier fábrica o línea de fabricación, favoreciendo a la flexibilidad a la hora de los pedidos del cliente.

- Una vez obtenida la digitalización de la pieza, se obtiene un formato .STL que puede ser utilizado por una impresora 3D, un factor fundamental para una tecnología que actualmente también está en alza.

## 8- BIBLIOGRAFÍA

8- BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://es.linkedin.com/pulse/industria-40-digitalización-carlos-nuñez-zorrilla>  
[Consulta: 14 abril 2017]
- [2] <http://www.tekniker.es/es/que-es-la-Industria-40> [Consulta: 14 abril 2017]
- [3] [https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_40\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries/](https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/)  
[Consulta: 14 abril 2017]
- [4] <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/local/im/que-es-big-data/> [Consulta: 14 abril 2017]
- [5] <https://www.gradiant.org/noticia/tecnologias-industria-4-0/> [Consulta: 14 abril 2017]
- [6] <https://grupogaratu.com/que-es-y-que-aporta-la-industria-4-0/> [Consulta: 14 abril 2017]
- [7] DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.  
[http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Investiga/GCII/personal/lrodriguez/web3D/reconstruccion\\_3d.htm](http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Investiga/GCII/personal/lrodriguez/web3D/reconstruccion_3d.htm) [Consulta: 15 abril 2017]
- [8] Agencia Flamenca del programa europeo Leonardo. (2008). 'Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas'. Traductores: J.L. Lerma y J.M. Biosca. Versión 5.
- [9] TORRE FERRERO, C. [et al]. 2004. Fusión de datos para reconstrucción 3D mediante un sistema híbrido de visión.  
[www.intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXV/.../109-areroauorr.PDF](http://www.intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXV/.../109-areroauorr.PDF) [Consulta: 17 abril 2017]
- [10] Besl, P.J., McKay, N.D. (1992): A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI).
- [11] Chen, Jia; Wu, Xiaojun; Yu Wang, Michael; & Li, Xuanfu (2012): 3D shape modeling using a self-developed hand-held 3D laserscanner and an efficient HT-ICP point cloud registration algorithm. Optics and Laser Technology, Volume 45.
- [12] AYUSO PÉREZ L.F. 2011. Adquisición de información de profundidad mediante la técnica Structured light, three phase shift. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.

[13] SARMIENTO, V.J., 2011, Determinación de las dimensiones de objetos 3D usando luz estructurada. Editorial Academia española.

[14]<https://www.creaform3d.com/es/soluciones-de-metrologia/escaneres-3d-portatiles-handyscan-3d> [Consulta: 19 abril 2017]

[15] <https://www.artec3d.com/> [Consulta: 19 abril 2017]

[16]<http://optotechnik.zeiss.com/produkte/3d-digitalisierung/comet-6> [Consulta: 14 abril 2017]

[17]<http://www.faro.com/es-es/productos/topografia-3d/laser-scanner-faro-focus-3d/informacion-general> [Consulta: 19 abril 2017]

[18] <http://www.3dcadportal.com/optiscan-shining-3d.html> [Consulta: 19 abril 2017]

[19] <http://www.david-3d.com/en/support/channellist> [Consulta: 13 abril 2017]

[20]<http://imprimaria3d.com/noticias/2016/07/20/006591/hp-refuerza-su-ecosistema-3d-adquisicion-del-l-der-escaneado-3d-david> [Consulta: 20 abril 2017]

[21][http://wiki.david-3d.com/user\\_manual\\_spanish/general\\_hints](http://wiki.david-3d.com/user_manual_spanish/general_hints) [Consulta: 14 abril 2017]