



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Adrián Romo López

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

DISEÑO Y FABRICACION DE UN SISTEMA DE VISION BASADO EN LUZ ESTRUCTURADA PARA LA RECONSTRUCCION DE OBJETOS DE REVOLUCION

FEBRERO 2025

Adrián Romo López

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:

José María Sebastián



POLITÉCNICA

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor de proyecto José María Sebastián por su dedicación incansable y su inagotable paciencia para lograr sacar este trabajo adelante a pesar de las diversas dificultades que se fueron presentando.

A Paula; por ser un pilar fundamental, tener la paciencia necesaria durante todo este tiempo y la capacidad de absorber mi entusiasmo aún cuando se tratase de temas que, aunque no siempre eran apetecibles, siempre se esforzó por entenderlos y mostrar interés en cada pequeño avance.

A mi familia, por estar siempre en el momento y el lugar cuando era necesario y servir de apoyo constante.

A Gerardo, porque sin él y su ayuda no podría haber sacado adelante este proyecto.

A Juan y Jaime, mis compañeros de camino, que siempre saben sacar el tiempo para tender una mano. No os preocupéis, lo siguiente será un fútbolín.

Resumen

El uso de sistemas de visión artificial en la industria ha visto cómo recientemente ha sufrido un avance significativo. De los distintos tipos de visión, los sistemas basados en luz estructurada destacan por obtener medidas precisas de los objetos utilizando patrones de luz como, por ejemplo, líneas láser. En este sentido, el presente Trabajo Fin de Máster (*TFM*) está orientado principalmente hacia el control de calidad en el sector de la automoción, centrándose en un sistema capaz de reconstruir objetos de revolución mediante una combinación clásica de cámara y láser y el principio de triangulación.

Para lograrlo, en primer lugar, se realizó un profundo estudio de las tecnologías disponibles y su uso en determinadas aplicaciones según la precisión que se requiera, el nivel de detalle, el presupuesto disponible y el tipo de pieza y defectos a inspeccionar. Para el caso del presente *TFM*, se trataba de una pieza con cuatro tipos de defectos que requería control tridimensional. En un principio, se consideró la posibilidad de realizar este control con la pieza sobre una cinta transportadora, utilizando un encoder que enviara pulsos a la cámara para el disparo. Sin embargo, debido a problemas de presupuesto y a la dificultad de implementación por el tamaño requerido de la cinta, esta opción fue descartada, aunque sí que se llegó a esbozar un posible diseño. La mejor solución a este problema era intentar fabricar un sistema con menor coste y tamaño, así que se optó por un sistema de reconstrucción para objetos de revolución, en lugar de lineal. El problema era que en tal caso no se podría inspeccionar esta pieza en concreto, pero sí permitía aplicar de igual manera los mismos conocimientos de visión que en un sistema lineal.

Con el tipo de tecnología necesaria en mente y conocido el sistema requerido, se diseñó y fabricó un primer prototipo que permitiese realizar varias pruebas para comprobar la factibilidad del sistema. Este primer prototipo fue clave para algunos puntos fundamentales como la elección de la cámara y su programación para capturar imágenes, diseño de elementos mecánicos, algoritmos de calibración de los parámetros intrínsecos, compra de un nuevo láser y su posterior validación, algoritmos para sincronizar la captura con el movimiento de la pieza y diseño del primer elemento de calibración para los parámetros

extrínsecos. Aunque este primer prototipo sentó una firme base sobre la que continuar, lo cierto es que tenía algunos problemas importantes que no podían solucionarse sin considerar una solución radical. Como el sistema se sustentaba sobre perfiles de aluminio, los cuales se fijaban con escuadras, tornillos y tuercas, se generaban una gran cantidad de holguras del sistema que eran una desventaja grande que no iba a permitir ajustar todo el conjunto con la precisión requerida. Además, componentes clave como la mordaza, que aseguraba el movimiento en sincronía del motor con la pieza, estaban impresos en plástico y no apretaban como debía, lo que provocaba que la concéntrica entre la pieza y el motor no pudiera asegurarse. Como se explica en el capítulo 5, si la pieza no está concéntrica, entonces la precisión alcanzada por el sistema disminuirá en gran medida porque, además de un giro, se estaría generando un desplazamiento entre ambos ejes que no se estaría teniendo en cuenta.

Teniendo en cuenta los problemas detectados en el primer prototipo, se optó por una solución más robusta que aportase las soluciones necesarias, especialmente a la concéntrica entre pieza y motor. Por diseño, los tornos son elementos pensados precisamente para que pieza y mordaza giren concéntricos, así que la idea final consistió en la restauración de un torno antiguo cuyo resultado puede observarse en la figura 1



Figura 1 Torno antiguo: estado final

Tener un torno restaurado no garantizaba por sí sólo la concéntrica, por lo que fue necesario varios ajustes mecánicos y, más importante aún, la realización de las pruebas presentadas en el capítulo 5 hasta que finalmente se verificó que se estaba en condiciones de poder continuar.

El siguiente reto a abordar era disponer de un elemento de calibración que capturase correctamente la transformación entre la imagen y las coordenadas tridimensionales del mundo. En primer lugar, se comenzó imprimiendo en 3D varias versiones del cilindro, pero

se trataba de un proceso lento con un alto grado de derroche de material. Para agilizar el proceso y en busca siempre de un proyecto sostenible, se diseñó un nuevo tipo de cilindro con peldaños modulares. Este tipo de cilindro permitía que el proceso iterativo que suponía encontrar la mejor combinación de puntos para capturar esa transformación, fuese mucho más rápido y sin necesidad de tirar material. Finalmente, en el capítulo 5, se llegó a una interesante conclusión sobre por qué el cilindro de calibración final, que contaba con pocos puntos, funcionaba mejor que otros con más puntos. Este proceso iterativo permitió entender aspectos fundamentales sobre el problema de mínimos cuadrados y homografía para la calibración de los parámetros extrínsecos del sistema.

Aunque en la mayoría de sistemas industriales se utilice un encoder para el sincronismo entre el movimiento de la pieza y su captura, para este *TFM* se decidió que un motor paso a paso sería igualmente capaz de asegurar una buena simultaneidad. Por tanto, otro punto importante consistía en reducir el número de grados por paso que en un principio daba el motor en el primer prototipo. De esta forma, en el capítulo 5 se explica de manera detallada cómo fue posible conseguir tan sólo 0.1° por paso, lo que permitía capturar mayor cantidad de detalles en cada reconstrucción.

Otro aspecto que contó con especial relevancia fue la velocidad de adquisición del sistema. Aunque en un principio se comenzó disparando la cámara mediante *software*, se pudo comprobar que se trataba de una solución para nada óptima debido a su alto tiempo de ciclo. En el capítulo 5 se explica la solución que se tomó respecto a este asunto y se detallan los diferentes tiempos de adquisición en función de algunos parámetros relevantes del sistema.

Con el sistema correctamente ajustado y calibrado, se pudo observar cómo la precisión del variaba en función de la forma y el material de la pieza escaneada. Por ejemplo, en el caso de una pieza como la de la figura 2 de material plástico, cuyo reflejo especular es menor, la precisión alcanzada se encontraba en el rango de 0.002 y 1.93 mm.

Por otro lado, si se trataba de piezas fabricadas en metal como la de la figura 3, el resultado era bastante distinto. En este caso, la precisión fluctuaba entre los 0.62 y 3.86mm.

En el capítulo 5 se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos, explicando las razones de esta variación entre las distintas formas y materiales y aportando posibles soluciones en el capítulo 6.

Palabras Clave: Visión, tridimensional, 3D, cámara, láser, torno, diseño, fabricación.

Códigos UNESCO: 1203.05, 1203.06, 1204.10, 2209.9, 3311.01, 3311.11.

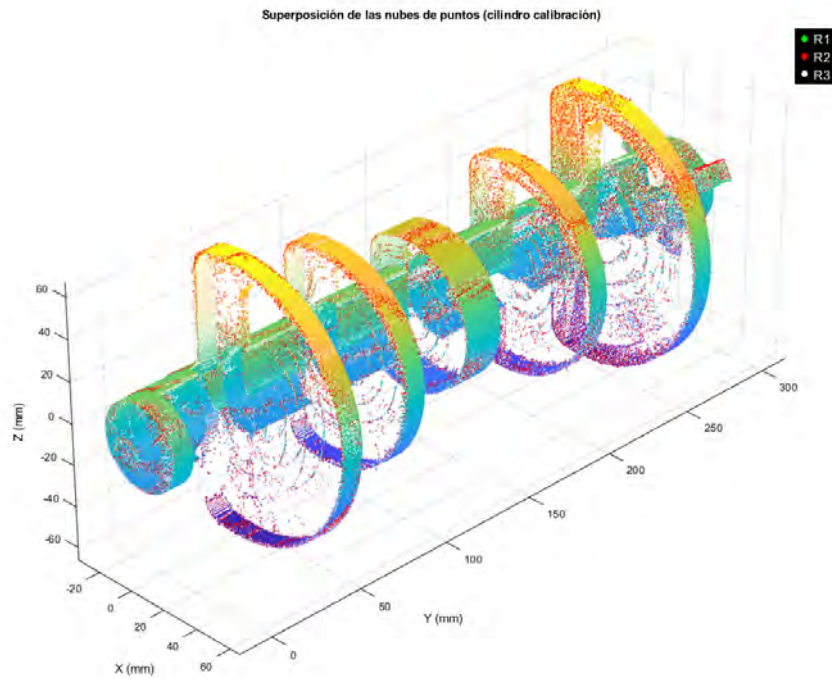


Figura 2 Resultado varias reconstrucciones con nubes de puntos superpuestas en un elemento con material plástico

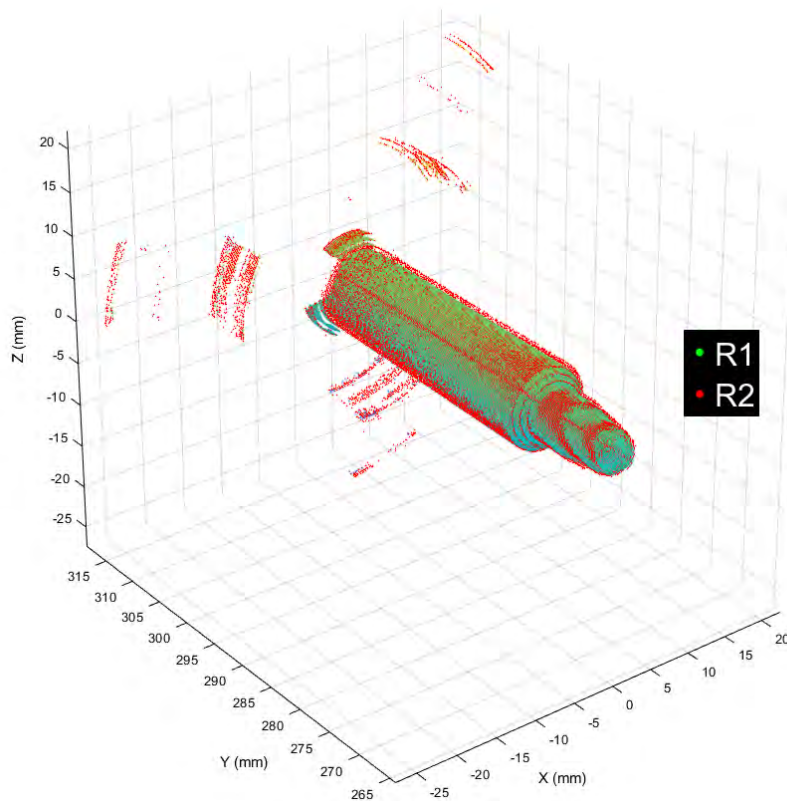


Figura 3 Resultado varias reconstrucciones con nubes de puntos superpuestas en un elemento con material metálico

Abstract

The use of machine vision systems in industry has recently seen significant progress. Of the different types of vision, systems based on structured light stand out for obtaining precise measurements of objects using light patterns such as laser lines. In this sense, this Master's Thesis (*TFM*) is mainly oriented towards quality control in the automotive sector, focusing on a system capable of reconstructing objects of revolution using a classical combination of camera and laser and the principle of triangulation.

In order to achieve a system capable of reconstructing objects three-dimensionally, a first prototype was designed and manufactured, allowing several tests to be carried out in order to verify the feasibility of the system. This first prototype, although it served as a basis to continue, had some serious problems, such as the concentricity between the part and the clamp, which required taking a different route.

Knowing the main problems of this first prototype, it was decided to restore an old lathe, as this type of machine is much more robust and is designed to ensure concentricity between the part and the vice.

Chapter 5 explains the key points in the vision system design process, such as the design of the calibration element, the synchronisation between the part movement and its capture and the acquisition speed.

Finally, with the system correctly adjusted and calibrated, it was possible to observe how the accuracy of the system varied depending on the shape and material of the scanned part. For example, in the case of a plastic part, whose specular reflection is lower, the accuracy achieved was in the range of 0.002 and 1.93 mm. On the other hand, for parts made of metal, the result was quite different. In this case, the accuracy fluctuated between 0.62 and 3.86 mm.

Índice

Índice de Figuras	xix
Índice de Tablas	xxii
Lista de Acrónimos	xxii
1. Introducción	1
1.1. Marco del proyecto	1
1.1.1. Motivación	1
1.1.2. Antecedentes del proyecto	2
1.2. Estructura de los contenidos	3
2. Objetivos	5
3. Estado del arte	7
3.1. Visión 2D y 3D	7
3.2. Métodos y técnicas de visión	9
3.3. Visión 2D	10
3.4. Visión 3D	11
3.4.1. Visión estéreo	11
3.4.2. Tiempo de vuelo (<i>TOF</i>)	15
3.4.3. Triangulación láser	18
3.5. Solución a implementar	23
4. Marco teórico	25
4.1. Definición de componentes de un sistema de visión tridimensional mediante cámara y láser	25
4.1.1. Cámara	25
4.1.2. Óptica	31

4.1.3.	Láser	36
4.1.4.	Filtro	39
4.1.5.	Sincronización pieza e imagen	39
4.2.	Modelos de lentes y distorsión de una óptica.	40
4.2.1.	Modelos de lentes	40
4.2.2.	Distorsión de una óptica. Modelos de distorsión.	42
4.3.	Reconstrucción tridimensional	44
4.3.1.	Espacio proyectivo y coordenadas homogéneas	44
4.3.2.	Parámetros del modelo pin-hole	45
4.3.3.	Modelo físico con distorsión: reconstrucción mediante polinomios.	47
4.3.4.	Homografía	50
4.3.5.	Algoritmos de precisión subpixel	51
5.	Metodología	55
5.1.	Elección de los componentes	55
5.1.1.	Cámara	55
5.1.2.	Láser	61
5.1.3.	Microcontralor, motor y su driver	69
5.2.	Primer prototipo del sistema de visión para la reconstrucción de objetos de revolución	71
5.2.1.	Óptica escogida para el sistema del primer prototipo	73
5.2.2.	Primer elemento de calibración	75
5.2.3.	Algoritmos subpixel: verificación y robustez ante la influencia del ruido	77
5.2.4.	Conclusiones del primer prototipo	82
5.3.	Diseño final del sistema de visión para la reconstrucción de objetos de revolución	83
5.3.1.	Restauración de un torno antiguo	83
5.3.2.	Comprobación de la concentricidad entre la pieza y el eje de giro	88
5.3.3.	Sincronismo entre la captura y el movimiento de rotación de la pieza	92
5.3.4.	Geometría del sistema de visión	97
5.3.5.	Extracción de la línea láser	99
5.3.6.	Calibración de los parámetros intrínsecos	102
5.3.7.	Calibración de los parámetros extrínsecos	108
5.3.8.	Resultados de la reconstrucción	117
6.	Conclusiones y evaluación de impactos	123
6.1.	Análisis de los resultados	123
6.2.	Evaluación de impactos	125
6.2.1.	Impacto socio-económico	125

6.2.2. Impacto ambiental	126
6.2.3. Aspectos legales y éticos. Estándares de aplicación.	126
6.2.4. Contribución a los ODS de la agenda mundial 2030	126
6.3. Trabajos futuros	127
6.4. Reflexión	128
A. Bibliografía	131
B. Láminas de resultados	133
C. Planificación temporal	155
D. Presupuesto	157
E. Hojas de características	161
E.1. Motor 23HM22-2804S	162
E.2. Cámara BFS-PGE-16S2-M	164
E.3. Láser EL450-100G24LP	165

Índice de Figuras

1.	Torno antiguo: estado final	vi
2.	Resultado varias reconstrucciones con nubes de puntos superpuestas en un elemento con material plástico	viii
3.	Resultado varias reconstrucciones con nubes de puntos superpuestas en un elemento con material metálico	viii
1.1.	Tipo de pieza para el control de calidad	2
3.1.	Sensor de visión 2D frente a 3D	9
3.2.	Combinación de técnicas de visión 2D y 3D para extracción de códigos en un neumático. Fuente: www.clearview-imaging.com	9
3.3.	Representación de un sistema estéreo.	11
3.4.	Distancia focal. Fuente: [19]	12
3.5.	Geometría de líneas epipolares. Fuente: [5]	13
3.6.	<i>RealSense D457</i> . Fuente: www.intelrealsense.com	14
3.7.	<i>Ensenso N30</i> . Fuente: www.ids-imaging.com	14
3.8.	<i>HDI Advance R4x</i> . Fuente: www.laserscanningforum.com	14
3.9.	Tiempo de vuelo. Fuente: www.clearview-imaging.com	15
3.10.	Variación del tiempo de integración. Fuente: [7]	16
3.11.	<i>Helios 2</i> . Fuente: www.thinklucid.com	17
3.12.	Geometría de un sistema de triangulación láser. Fuente: [19]	18
3.13.	Proyección y resultado de triangulación láser	19
3.14.	Formas generadas al proyectar la línea. Fuente: [5]	20
3.15.	Cámara Photonfocus MV-D1024E-3D01. Fuente: www.photonfocus.com	21
3.16.	División de pulsos de encoder para la adquisición de imágenes. Fuente: www.photonfocus.com	21
3.17.	Efecto Speckle. Fuente: www.wikipedia.com	23
4.1.	Lectura de coordenadas con sensor PSD. Fuente: [4]	26

4.2. Lectura de coordenadas con sensor CCD. Fuente: [4]	26
4.3. Funcionamiento de un sensor CMOS. Fuente: www.sensorcleaning.com	27
4.4. Resumen de cómo un sensor convierte la luz en una imagen digital. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com	32
4.5. Distancia focal. Fuente: www.diligent.es	32
4.6. Relación entre la distancia focal y ángulo de visión. Fuente: www.blog.foto24.com	32
4.7. Representación gráfica del ángulo de visión.	33
4.8. Relación geométrica entre ángulo de visión y FOV. Fuente: www.ni.com	34
4.9. Resumen gráfico de los conceptos explicados. Fuente: www.ni.com	35
4.10. Apertura del diafragma y su relación con la profundidad de campo. Fuente: www.dzoom.com	35
4.11. Gráfica de los perfiles de intensidad de un láser con distribución Gaussiana y con distribución uniforme. Fuente: www.oem-laser.com	37
4.12. Comparación de los perfiles de intensidad de un láser durante la longitud de su línea con distribución Gaussiana y con distribución uniforme.	38
4.13. Comparación de los perfiles de intensidad de un láser de manera transversal	38
4.14. Modelo Pin-Hole. Fuente: www.opencv.com	40
4.15. Modelo lente delgada. Fuente: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu	41
4.16. Modelo lente gruesa. Fuente: [16]	41
4.17. Distorsión radial. Fuente: https://clickitupanotch.com/lens-distortion/	42
4.18. Ejemplo de distorsión radial. Fuente: www.wikipedia.com	43
4.19. Espacio afín y espacio proyectivo. Fuente: http://blogs.mat.ucm.es/	45
4.20. Modelo físico de un sistema <i>pin-hole</i> considerando la distorsión. Fuente: [2]	47
4.21. Ejemplo gráfico de homografía. Fuente: www.opencv.org	50
5.1. Cámara COGNEX®. Fuente: www.cognex.com	56
5.2. Cámara Basler®. Fuente: www.baslerweb.com	56
5.3. Cámara FLIR-BFS-PGE-16S-M. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com	57
5.4. Eficiencia cuántica de la cámara FLIR-BFS-PGE-16S-M. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com	58
5.5. Eficiencia cuántica de la cámara FLIR-BFS-PGE-16S-C. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com	58
5.6. Entradas y salidas de la cámara FLIR-BFS-PGE-16S-C. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com	60
5.7. Pieza para ajustar la posición del plano láser	62
5.8. Ajuste del plano láser de 650nm	62

5.9. Ajuste del plano láser de 450nm	62
5.10. Pieza para la comparativa de ambos perfiles de intensidad	63
5.11. Vista de la línea del Láser con longitud de onda = 650nm	64
5.12. Vista de la línea del Láser escogido EL450-100G24LP	64
5.13. FWHM. Fuente: www.stellarnet.us	65
5.14. Comparación de los perfiles de intensidad de ambos láseres en toda la extensión de sus líneas	66
5.15.	67
5.16. Comparación de los perfiles de intensidad de manera transversal	68
5.17. Motor Nema23 modelo 23hm22-2804s. Fuente: www.omc-stepperonline.com	70
5.18. Driver para el motor Nema23. Fuente: www.omc-stepperonline.com	70
5.19. Microcontrolador NodeMCU8266-12E	71
5.20. Componentes del primer prototipo del sistema de visión	72
5.21. Diseño 3D final del primer prototipo	72
5.22. Fabricación e implementación final del primer prototipo del sistema de visión	73
5.23. Captura con focal 4mm	74
5.24. Captura con varifocal	74
5.25. Captura con focal 16mm	75
5.26. Captura con focal 25mm	75
5.27. Comparación de imágenes del primer prototipo con y sin distorsión	76
5.28. Vista de los puntos del primer prototipo	77
5.29. Vista de detalle del punto (138,385)	79
5.30. Vista de detalle del punto (387,417)	80
5.31. Vista de detalle del punto (312,4.20)	81
5.32. Torno antiguo en su estado inicial	84
5.33. Proceso de electrólisis. Fuente: www.wikipedia.com	85
5.34. Proceso de restauración de la mordaza del mediante la aplicación de un proceso de electrólisis	85
5.35. Resultado final de la restauración de la mordaza	86
5.36. Restauración del chasis del torno	86
5.37. Resultado final de la restauración: vista isométrica	87
5.38. Resultado final de la restauración: vista de planta	87
5.39. Resultado final de la restauración: vista de alzado	88
5.40. Resultado final de la restauración: vista de detalle del acoplamiento del motor a las poleas	88
5.41. Concentricidad entre punto y contrapunto	88
5.42. Imágenes para la comprobación del eje de giro	90
5.43. Valores de los diferentes puntos para la comprobación del eje de giro	92
5.44. Vista de detalle de las poleas del torno	93

5.45. Movimiento y diámetros de las poleas	94
5.46. Cálculo para la posición del láser	97
5.47. Cálculo para la posición diagonal de la cámara	98
5.48. Cálculo para la posición horizontal de la cámara	99
5.49. Imagen de ejemplo típica utilizada para la reconstrucción	100
5.50. Imagen de ejemplo de la extracción de la línea láser con precisión subpixel	102
5.51. Imágenes para la calibración de los parámetros intrínsecos	103
5.52. Resultado de la reproyección de los puntos en las imágenes de calibración .	107
5.53. Diferentes cilindros de calibración	109
5.54. Formas de imprimir los elementos de calibración	110
5.55. Cilindro de calibración modular	111
5.56. Cilindro final para la calibración de los parámetros extrínsecos	112
5.57. Imagen de comprobación para la calibración de los parámetros extrínsecos	112
5.58. Nivelado de la pieza de calibración	114
5.59. Puntos de calibración para el cálculo de la homografía	115
5.60. Sistema de coordenadas	115
5.61. Problema de brillos en objeto metálico	122
6.1.	128
6.2.	129
6.3.	129
6.4.	129
B.1. Medidas del cilindro de calibración final	134
B.2. Primera reconstrucción tridimensional del cilindro de calibración final . . .	135
B.3. Segunda reconstrucción tridimensional del cilindro de calibración final . . .	136
B.4. Tercera reconstrucción tridimensional del cilindro de calibración final . . .	137
B.5. Medida en el eje Y de la primera reconstrucción del cilindro de calibración	138
B.6. Medida en el eje Y de la segunda reconstrucción del cilindro de calibración	139
B.7. Medida en el eje Y de la tercera reconstrucción del cilindro de calibración .	140
B.8. Superposición de puntos del cilindro de calibración	141
B.9. Vista del plano XZ del cilindro de calibración	142
B.10. Dimensiones del cilindro de ajuste para regular la altura del plano láser . .	143
B.11. Primera reconstrucción tridimensional del cilindro de ajuste del plano láser	144
B.12. Segunda reconstrucción tridimensional del cilindro de ajuste del plano láser	145
B.13. Medida en el eje Y de la primera reconstrucción del cilindro de ajuste del plano láser	146
B.14. Medida en el eje Y de la segunda reconstrucción del cilindro de ajuste del plano láser	147
B.15. Superposición de puntos del cilindro de calibración	148

B.16.	Primera reconstrucción del mango del destornillador	149
B.17.	Segunda reconstrucción del mango del destornillador	150
B.18.	Superposición de puntos del mango del destornillador	151
B.19.	Primera reconstrucción del centrador metálico	152
B.20.	Segunda reconstrucción del centrador metálico	153
B.21.	Superposición de puntos del centrador	154
C.1.	Cronograma del desarrollo del sistema de visión tridimensional para la reconstrucción de objetos de revolución	156

Índice de Tablas

3.1. Exactitud de la cámara Helios 2	17
3.2. Precisión de la cámara Helios 2	18
3.3. Características del láser StockerYale Lasiris Magnum	22
5.1. Coordenadas en píxeles de la imagen 5.27(b)	78
5.2. Coordenadas originales y resultados de algoritmos subpíxel de la imagen .	78
5.3. Valores de intensidad para el punto (138,385)	79
5.4. Valores de intensidad para el punto (417,387)	80
5.5. Valores de intensidad para el punto (312, 420)	80
5.6. Variación de las mediciones subpíxel para cada una de las diez imágenes del punto (312, 420)	81
5.7. Coordenadas de los puntos en 0 grados	91
5.8. Análisis estadístico de las coordenadas para diferentes ángulos	91
5.9. Errores de reproyección en la calibración de los parámetros intrínsecos . . .	106
5.10. Correspondencia entre puntos de la imagen y puntos del mundo	116
5.11. Puntos y sus reproyecciones: cálculo con coordenadas píxel	116
5.12. Puntos y sus reproyecciones: cálculo con coordenadas subpíxel	116
5.13. Comparación de X,Z por escalón en las tres reconstrucciones	118
5.14. Comparación del valor de Y en las tres reconstrucciones	118
5.15. Diferencias absolutas de X,Y,Z en las tres reconstrucciones	119
5.16. Comparación de medidas del cilindro de ajuste del láser	119
5.17. Diferencias absolutas en las medidas del cilindro de ajuste del láser	120
5.18. Comparación de medidas del destornillador	120
5.19. Diferencias absolutas en las medidas del destornillador	120
5.20. Comparación de medidas del centrador	121
5.21. Diferencias absolutas en las medidas del centrador	121
D.1. Lista de componentes y precios	159

- **ADC:** Analog-to-Digital Converter (Convertidor Analógico a Digital)
- **ADU:** Analog Digital Unit (Unidad Analógico-Digital)
- **CCD:** Charge-Coupled Device (Dispositivo de Carga Acoplada)
- **CDG:** Centro De Gravedad (algoritmo subpixel)
- **CMOS:** Complementary Metal-Oxide Semiconductor (Semiconductor Complementario de Óxido-Metal)
- **EMVA:** European Machine Vision Association
- **FIR:** Far Infrared (Infrarrojo Lejano)
- **FOV:** Field of View (Campo de Visión)
- **FPS:** Frames Per Second (Cuadros por Segundo)
- **FWHM:** Full Width at Half Maximum (Ancho Completo a Media Altura)
- **IA:** Inteligencia Artificial
- **IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers
- **IR:** Infrared (Infrarrojo)
- **OEE:** Overall Equipment Effectiveness (Efectividad Total del Equipo)
- **PSD:** Position-Sensitive Device (Dispositivo Sensible a la Posición)
- **RIAI:** Robotics and Artificial Intelligence
- **ROI:** Region of Interest (Región de Interés)
- **SDK:** Software Development Kit (Kit de Desarrollo de Software)
- **SFM:** Shape From Motion (Forma a partir del Movimiento)
- **SFS:** Shape From Shading (Forma a partir de Sombras)
- **SFT:** Shape From Texture (Forma a partir de Textura)
- **SNR:** Signal-to-Noise Ratio (Relación Señal-Ruido)
- **TFM:** Trabajo Fin de Máster

- **TOF**: Time of Flight (Tiempo de Vuelo)
- **USB**: Universal Serial Bus
- **YAG**: Yttrium Aluminum Garnet (Granate de Aluminio e Itrio, usado en láseres)

Introducción

1.1. Marco del proyecto

1.1.1. Motivación

En la industria, los estándares de calidad en el producto final cada vez son más elevados. Estos estándares de calidad siempre compiten con los estándares de producción, ya que se tiene una imperiosa necesidad de fabricar el mayor volumen de productos finales en el menor tiempo posible. Para encontrar el equilibrio entre calidad y productividad, se sigue una tendencia hacia la automatización de los procesos. Es decir, sistemas que reemplacen el control de calidad manual, realizado por operarios, a controles realizados por máquinas que cuenten con sistemas de visión por computador para garantizar la calidad sin sacrificar el número de productos fabricados. Ser capaz de asegurar que un mismo producto ha sido fabricado de manera repetitiva y sin ningún fallo, marca la diferencia entre empresas que se ganan la confianza de sus clientes y empresas que acaban pagando caro un sólo error .

En sus inicios, la visión por computador afrontó varios retos. En primer lugar, los equipos utilizados para procesar las imágenes eran muy costosos, lentos y con una capacidad de memoria muy limitada, obligando a que los algoritmos fueran muy simples. Por otro lado, las cámaras tenían resoluciones muy bajas y altos niveles de ruido, enfrentando problemas para manejar cambios de iluminación. Además, los algoritmos presentaban dificultades para la clasificación de defectos en diferentes tipos de superficies. Aún con todos estos retos a solucionar, ya en 1970 se desarrolló el primer algoritmo para la reconstrucción tridimensional mediante triangulación simple basado en una cámara y un láser. Es en esta época también donde se comienza a utilizar luz estructurada y los primeros sistemas estereoscópicos primitivos. En 1975 se presentaron los primeros sistemas comerciales de inspección industrial utilizando algoritmos para la detección de bordes como el operador

Sobel, y en 1990 los primeros sistemas de visión 3D comerciales con una notable mejora en la precisión de los sensores y en los algoritmos de reconstrucción.

Hoy en día, el continuo y creciente desarrollo de los algoritmos clásicos de visión enfocados en la mejora continua, combinados a su vez con técnicas de Inteligencia Artificial como machine-learning y deep-learning, ha favorecido que cada vez más compañías confíen la calidad de sus productos a este tipo de sistemas, especialmente en aquellos sistemas que permiten realizar el control sin parar la producción.

Uno de los sectores que más ha confiado tradicionalmente en inspecciones de calidad mediante el control por visión ha sido el sector de la automoción. Reconocidas marcas como el grupo General Motors, que en los años ochenta comenzaron a inspeccionar la calidad de las soldaduras y de la pintura, dan fe de la importancia que ha supuesto para el avance del sector. Por otro lado, esta tecnología cada vez se está aplicando más en otros sectores como el sector de la alimentación, donde se debe garantizar la máxima calidad del producto debido a su destino para el consumo humano, o el sector logístico, para mejorar la eficiencia y reducir errores optimizando la trazabilidad de los productos mediante lectores de códigos QR y códigos de barras .

La importancia en todos los sectores de los sistemas de visión por computador, cuyos algoritmos han sido profundamente estudiados, desarrollados y mejorados, junto con los recientes avances en Inteligencia Artificial tras el auge del aprendizaje profundo a partir de 2010, donde la red neuronal AlexNet ganó el concurso de visión ImageNet, sirvieron como motivación para llevar a cabo un Trabajo de Fin de Máster que profundizara en los algoritmos clásicos de visión, con el propósito de establecer una base sólida para seguir explorando algoritmos de Inteligencia Artificial combinados con visión clásica.

1.1.2. Antecedentes del proyecto

Este proyecto, en sus orígenes, surgió de la necesidad de automatizar el control de defectos al final de una línea de perfilado de chapa metálica en el sector de la automoción. La pieza tenía forma de U invertida como la de la figura 1.1¹

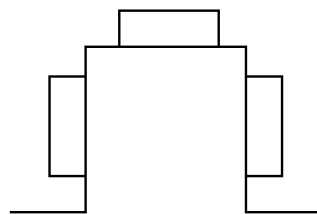


Figura 1.1 Tipo de pieza para el control de calidad

Se consideró que era necesario el control de 4 tipos de defectos:

¹Por razones de confidencialidad no es posible mostrar imágenes reales de la pieza y sus defectos

1. **Longitud del perfil:** las pestañas inferiores de la pieza deben quedar en el mismo plano que la parte frontal y trasera. Por un error de medida en la línea, el perfil puede desplazarse hacia delante.
2. **Defecto de planitud:** en las pestañas inferiores se produce una ondulación a lo largo de toda la longitud del perfil.
3. **Defecto de plegado incorrecto en las pestañas:** que puede suceder en las pestañas inferiores, laterales o en la pestaña superior.
4. **Abertura del perfil:** si la distancia entre caras interiores es mayor que la tolerancia establecida, las piezas no encajarán en el vehículo.

Como se podrá comprobar en capítulos posteriores, teniendo en cuenta los tipos de defectos que se requieren controlar, especialmente aquellos que implican volumen geométrico de la pieza, se determinó que era necesario utilizar sistemas de inspección tridimensional. En un principio, este tipo de inspección se realizaría sobre una cinta en movimiento, pero en el caso del presente *TFM* se tomó la decisión de reconstruir objetos de revolución debido principalmente a que era un sistema más compacto, menos costoso y que podría implementarse fuera de una fábrica o taller. Además, los conocimientos adquiridos serían extrapolables a la inspección lineal.

1.2. Estructura de los contenidos

Para cumplir con los objetivos marcados en este *TFM*, este trabajo está organizado según los siguientes capítulos:

1. **Capítulo 1: Introducción.** Referente al presente capítulo, trata sobre los orígenes del proyecto y la motivación que hizo posible llevarlo a cabo.
2. **Capítulo 2: Objetivos.** Establece de manera resumida, clara, ordenada, simple y directa cada una de las metas marcadas al inicio del proyecto para seguir una pauta bien definida.
3. **Capítulo 3: Estado del arte.** Este capítulo realiza una explicación sobre los diferentes tipos de visión por computador, sus aplicaciones y coste, razonando sobre sus posibles ventajas y desventajas.
4. **Capítulo 4: Marco teórico.** Explica todos los conceptos necesarios para entender la solución propuesta para la reconstrucción de objetos de revolución.
5. **Capítulo 5: Metodología.** Dividido en dos secciones principales, se trata del capítulo donde se explica detalladamente la solución final implantada.

6. **Capítulo 6: conclusiones y evaluación de impactos.** Se discuten los resultados del *TFM* y se analiza su implicación en el desarrollo sostenible.
7. **Anexo A: Bibliografía**
8. **Anexo B: Láminas de resultados.** Se exponen las medidas de los objetos utilizados y sus reconstrucciones.
9. **Anexo C: Planificación temporal** mediante un diagrama de Gantt que recoge los principales hitos del proyecto
10. **Anexo D: presupuesto**
11. **Anexo E: hoja de características** del motor y del láser

Objetivos

El objetivo principal del presente TFM consiste en el diseño, fabricación y desarrollo de un sistema de **visión tridimensional** capaz de realizar la reconstrucción de componentes de revolución. De esta manera, se espera profundizar en el entendimiento de las técnicas clásicas de visión, ampliando los conocimientos adquiridos hasta la fecha mediante la puesta en marcha desde cero de un sistema cámara-láser. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. **Posibles soluciones:** qué tipo de visión y qué estrategia de visión es la más adecuada para lograr controlar los defectos planteados. Toma de decisión sobre su implementación.
2. **Elaboración del prototipo:** diseño de un primer objeto de calibración y los componentes mecánicos.
3. **Elección cámara-láser:** la importancia de solventar posibles problemas mediante implementación hardware.
4. **Análisis de los primeros resultados:** experimentación y observación sobre posibles mejoras en el prototipo.
5. **Mecánica mejorada:** reimplementación para dar solución a los problemas observados.
6. **Mejora de algoritmos**
 - De calibración.
 - Para la captura del movimiento sincronizado.
7. **Implementación de algoritmos** para la extracción de las coordenadas de la línea láser.

8. **Mejora del modelo:** aumento de la precisión mediante rediseño del objeto de calibración.

9. **Preparación del modelo:** para futuras posibles mejoras

Estado del arte

A continuación se exponen algunos conceptos básicos de visión y sus posibles aplicaciones en diferentes ámbitos y problemas, esta sección se centra en el desarrollo y explicación de los principales términos y soluciones; abordando temas que incluyen desde las condiciones ambientales, la precisión o el presupuesto, siendo este último un factor muy relevante en el desarrollo de este trabajo.

3.1. Visión 2D y 3D

Las cámaras de visión proyectan la información tridimensional del espacio sobre el elemento sensor, que es bidimensional. Se define como sistemas de visión 2D aquellos en los que la información de dicha proyección es suficiente para analizar la escena.

En el caso de la visión 3D, se añade una dimensión más. Esta dimensión da la posibilidad de percibir **profundidad**, lo que permite generar nubes de puntos que no se encuentran en el mismo plano, y a partir de los cuales es posible hacer una reconstrucción del objeto de interés.

El hecho de tomar una decisión sobre qué tipo de visión emplear dependerá en gran medida de la problemática que se presente. Por ejemplo, si simplemente se quisiese escanear un código de barras, en el que el problema se puede representar directamente en un plano, entonces se utilizaría un lector de código de barras que hace uso de técnicas de visión 2D para conseguir solucionarlo. Por otro lado, si el objetivo es detectar un objeto o región para separarlo del resto, también se emplearían técnicas de visión 2D para poder segmentarlo. En cambio, si por ejemplo el fin de la visión fuese detectar a qué distancia se encuentra cada objeto de un robot móvil, entonces, al añadir profundidad, la solución sería utilizar técnicas de visión 3D.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la visión 3D conlleva un mayor grado de complejidad que suele venir acompañado de un mayor coste. Aunque depende del tipo de

aplicación, la visión tridimensional suele destacar en el aspecto de la **precisión** cuando se toman medidas del objeto. Esto se debe, entre otros motivos, a cómo afecta las condiciones ambientales cuando se capturan imágenes usando técnicas de visión 2D ¹, ya que una iluminación inadecuada provocará pérdida de información. Por otro lado, la **velocidad de procesamiento** depende intrínsecamente del hardware empleado, la cantidad de datos a procesar y la complejidad de los algoritmos necesarios. Así, por norma general, es este aspecto la visión 2D posee una mayor velocidad de procesamiento debido a su menor nivel de complejidad ².

De manera resumida, la elección del tipo de visión a emplear vendrá determinada por:

1. El **tipo de problema** a resolver
2. El nivel de **precisión** requerido. Aunque si bien es cierto que si únicamente se necesita información bidimensional, el nivel de precisión puede resultar similar, los sistemas de visión 3D aportan un mayor nivel de detalle al ser capaces de generar nubes de puntos que pueden ser interpretadas por un software propio o externo a fin de conseguir realizar mediciones y dar solución al problema.
3. Si la inspección se hace con el objeto de interés en **movimiento** o de manera estacionaria.
4. Las **condiciones** ambientales. Trabajar en condiciones de mucha o poca iluminación, exceso de temperatura o lugares donde el espacio disponible sea mínimo, condicionará significativamente el tipo de visión a emplear.
5. El tipo de **reflectividad** del objeto de interés. No es lo mismo inspeccionar una superficie de madera que una superficie metálica. En el último caso, la cantidad de luz reflejada por el objeto será fundamental para elegir el tipo de visión a emplear así como su posterior diseño.
6. El **tiempo** necesario para realizar la inspección, que vendrá marcado directamente por el problema a solucionar. Es distinto diseñar un sistema de visión que se incorpore directamente a una línea de producción a otro que se encuentre en un ambiente controlado y que no requiera cumplir estrictamente con el tiempo de ciclo que marca dicha línea.
7. El **presupuesto** disponible para la implementación del sistema de visión. Los sistemas tridimensionales conllevan un costo notablemente más alto que los sistemas de adquisición bidimensional. Por ejemplo, un sensor de visión de la marca *IFM*® Modelo *O2D522*, que permite detectar contornos o análisis de superficies

¹Fuente: www.zivid.com/2d-vs-3d-machine-vision

²Fuente: www.linkedin.com/pulse/should-you-choose-2d-vision-3d-vision-sensors-your-robots-inbolt-qdoqe

(visión 2D), tiene un precio de **1766.50\$**. Por otro lado, un perfilómetro de la marca *Gocator*[®], Modelo *2410*, cuyo software es capaz de generar una nube de puntos tridimensional, tiene un precio de **11400\$** (figura 3.1)



(a) Sensor visión 2D O2D500. Fuente: www.w.i.fm.com (b) Sensor visión 3D Gocator 2410. Fuente: www.lm.i3d.com

Figura 3.1 Sensor de visión 2D frente a 3D

Finalmente, es importante mencionar que las técnicas de visión no son excluyentes. Es decir, para una misma aplicación, es posible emplear técnicas de visión 2D y 3D con el fin de conseguir solucionar el problema. Por ejemplo, en una fábrica de neumáticos se requiere el control para extraer el código que lleva impreso y estampado cada neumático. Las diferencias se encuentran en el color y relieve de cada texto. La parte estampada tiene cierto relieve y es de color negra, mientras que la parte impresa carece de ese relieve y es de color blanca. En el caso de no poder manipular la iluminación para detectar los dos tipos de códigos, es posible combinar técnicas de visión 2D y 3D para lograr segmentar cada código del resto del neumático como en la figura 3.2.

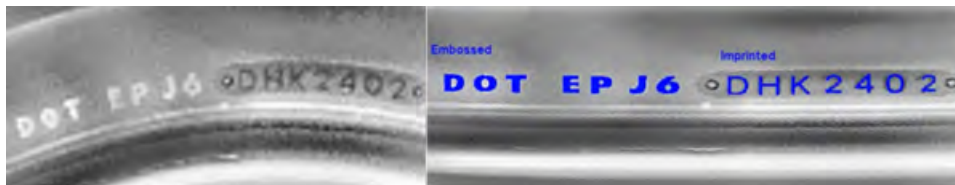


Figura 3.2 Combinación de técnicas de visión 2D y 3D para extracción de códigos en un neumático. Fuente: www.clearview-imaging.com

3.2. Métodos y técnicas de visión

En términos generales, los métodos de visión se clasifican en dos grupos [15]:

1. **Métodos activos:** son aquellos que utilizan luz externa que se proyecta sobre la escena mientras un observador recopila la información. Estos pueden ser [16]:
 - Time Of Flight (*TOF*)
 - Luz estructurada
 - Interferometría: patrón de Moire y holografía
2. **Métodos pasivos:** se refieren a técnicas y algoritmos que se basan únicamente en la información visual capturada por dispositivos de imagen sin necesidad de emitir activamente señales o perturbar el entorno. Estos métodos se utilizan para procesar imágenes y extraer información útil sin interferir con el objeto o el ambiente observado. Estos pueden ser [16]:
 - Visión estéreo
 - Fotometría
 - Forma a partir de sombra (SFS) o textura (SFT).

3.3. Visión 2D

Se puede agrupar los métodos comúnmente empleados en la visión 2D en los siguientes grupos [6]:

1. **Preprocesado:** se utiliza principalmente para tratar previamente la imagen cambiando por ejemplo la escala de color, aplicando operaciones morfológicas como la apertura y cierre, ecualizando el histograma o aplicando filtros con el fin de añadir o quitar ruido.
2. **Segmentación:** cuya finalidad es separar uno o varios objetos de su fondo binarizando la imagen previamente tratada para poder aplicarle un umbral.
3. **Caracterización:** para destacar diferencias o anomalías en la imagen.
4. **Reconocimiento y representación:** tras segmentar la imagen, existen varias formas de representar los objetos a través de distintas descripciones [19]:
 - Descripción basada en el código de cadena
 - Descripción basada en los Momentos
 - Descripción basada en la transformada de Fourier

3.4. Visión 3D

En el caso de la visión 3D, existen tres técnicas que son ampliamente utilizadas actualmente.

3.4.1. Visión estéreo

La visión estéreo es una técnica de visión 3D que trata de imitar el funcionamiento de la visión humana, de tal forma que su principal finalidad es dar solución al problema de la profundidad desde un punto de vista geométrico. Para ello, se dispone de al menos dos sensores separados una cierta distancia entre sí. Esta distancia, entre el centro de la lente de cada sensor, se conoce como **línea de base** (*baseline*). El hecho de disponer de dos sensores a una cierta distancia provoca un desplazamiento relativo o **disparidad** [5]. Asumiendo que la vergencia³ es cero, es decir, los ejes perpendiculares a las lentes son paralelos, es posible tener una representación gráfica de un sistema de visión estéreo simplificado (figura 3.3)

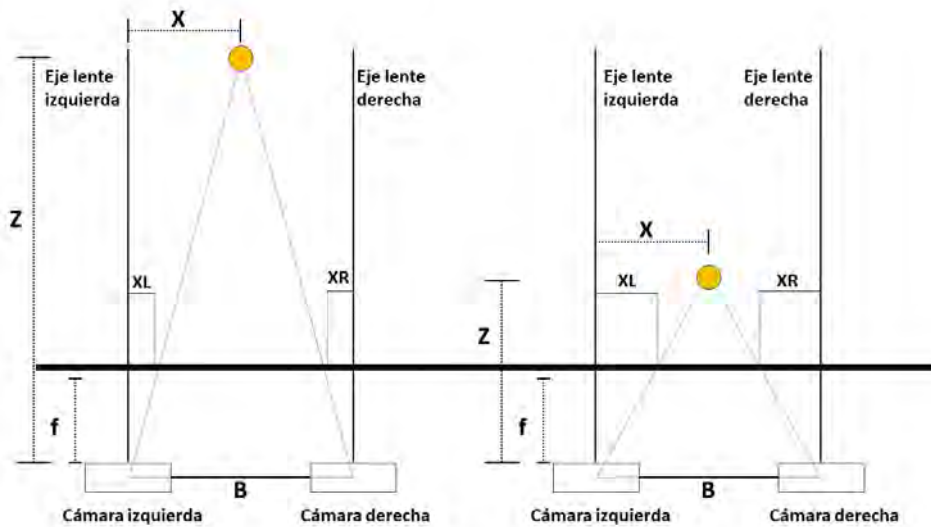


Figura 3.3 Representación de un sistema estéreo.

En la figura 3.3, la imagen izquierda muestra un objeto separado de ambos sensores una distancia Z y la imagen derecha es el mismo objeto pero con una distancia Z menor. De esta representación se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Z}{f} = \frac{X}{X_L} \quad (3.1)$$

³La vergencia es el proceso por el cual los ojos se mueven de manera coordinada y simultánea con el fin de enfocar y mantener una visión binocular nítida de los objetos en distintas distancias. Fuente: www.cun.es/diccionario-medico/terminos/vergenza

$$\frac{Z}{f} = \frac{X - b}{X_R} \quad (3.2)$$

$$X_L = \frac{X}{Z} \cdot f \quad (3.3)$$

$$X_R = \frac{X - b}{Z} \cdot f \quad (3.4)$$

$$D = X_L - X_R \quad (3.5)$$

Donde:

- **Z** es la distancia medida a través del eje Z hasta el objeto. Es decir, la profundidad.
- **X** es la distancia medida a través del eje X hasta el objeto.
- X_L y X_R es la proyección del punto en las imágenes captadas por la cámara izquierda y derecha respectivamente.
- **f** es la distancia focal, que es la distancia del foco al centro óptico de la imagen [19]

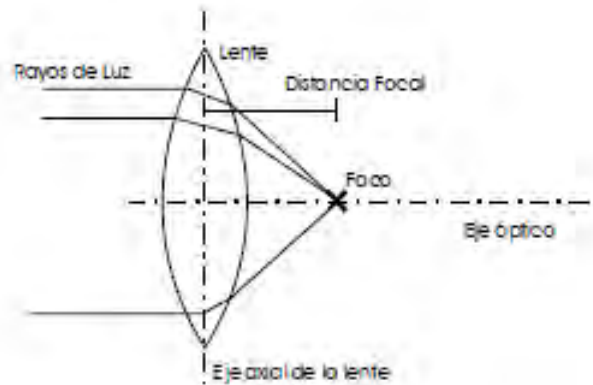


Figura 3.4 Distancia focal. Fuente: [19]

- **B** es la línea de base.
- **D** es la disparidad, que es la diferencia de posición de un objeto visto desde dos puntos ligeramente separados. Debido a esta separación, cada sensor ve la escena de manera ligeramente diferente. Cuanto mayor sea la diferencia, más cerca se percibirá el objeto, mientras que una diferencia menor indica que el objeto está más lejos.

Así, sabiendo el valor de la disparidad en cada instante de tiempo, se puede conocer el valor de la profundidad. El problema de la visión estéreo radica en que, para un correcto

funcionamiento, ambos sensores deben encontrar un punto común que tomar como referencia. Esto obliga a que ese punto esté visible en todo momento, aunque puede suceder que dicho punto no esté visible para ambos sensores, lo que se conoce como *oclusión*, o que el sistema encuentre *falsas correspondencias* [19]. Esto se conoce como **problema de correspondencia** y es el problema más crítico en la visión estéreo. Existen varios enfoques para tratar de minimizar este problema, siendo los dos más importantes: [5]

1. **Rayado de luz** (una forma de iluminación estructurada), que codifica las dos imágenes para que sea fácil ver los pares de puntos correspondientes. Esta solución dicta que para cada valor de \mathbf{Y} hay un punto de la franja luminosa en cada imagen, resolviendo así el problema de correspondencia.
2. **Líneas epipolares**: si se tiene un punto de interés proyectado en el foco de uno de los sensores se puede, a partir de ese punto de interés, trazar una línea de puntos en el foco del segundo sensor que dé una probabilidad de correspondencia correcta entre las dos imágenes.

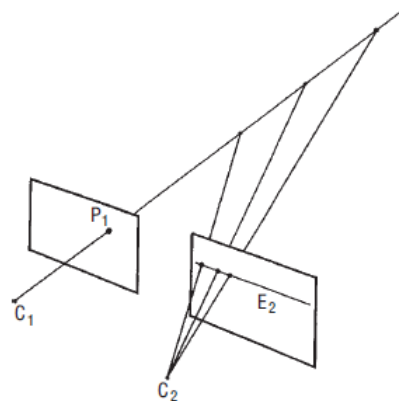


Figura 3.5 Geometría de líneas epipolares. Fuente: [5]

Algunas de las ventajas que ofrece la visión estéreo son⁴:

1. Al no depender de iluminación propia, la visión estéreo puede llegar a resultar más asequible que otros sistemas de visión 3D. Por ejemplo, existen versiones económicas de cámaras estéreo del fabricante Intel con un precio de 499.99\$ para su Modelo más potente, la cámara D457. Una cámara estéreo más orientada a un entorno industrial sería la *Ensenso N30* con un precio aproximado de 5500\$

En el caso de requerir un alto nivel de precisión, de 0.03 a 0.08mm, existen modelos como la cámara HDI Advance R4x de LMI Technologies con un precio de 11441,11 Euros.

⁴fuentes: www.clearview-imaging.com/es/blog/visin-estreo-3d-para-aplicaciones-de-visin-artificial



Figura 3.6 *RealSense D457*. Fuente: www.intelrealsense.com

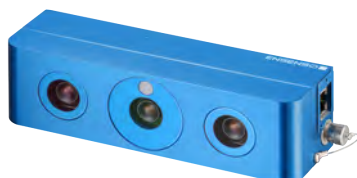


Figura 3.7 *Ensenso N30*. Fuente: www.ids-imaging.com



Figura 3.8 *HDI Advance R4x*. Fuente: www.laserscanningforum.com

2. La visión estéreo puede emplearse en situaciones en las que se requiera medir largas distancias y objetos en movimiento al no depender de restricciones de movimiento.

Para acabar, la visión estéreo está sujeta a una serie de problemas [19]:

1. El **problema de correspondencia** antes mencionado que además genera un problema de repetitividad al tener que elegir un píxel en concreto.
2. Al tratarse de un sistema de visión pasivo está sujeto a **restricciones** de iluminación y textura. Es decir, la visión estéreo puede llegar a funcionar correctamente en la mayoría de condiciones de iluminación ambiental, pero si existe la posibilidad de cambios en dicha iluminación que provoquen saturación del sistema o iluminación insuficiente, además de trabajar con superficies sin textura, su rendimiento tenderá a ser pobre en aplicaciones donde se requiera un alto nivel de precisión.
3. En el caso de necesitar una alta **precisión**, sería necesario aumentar la *línea de*

base, pero esto ocasiona que la correspondencia entre las imágenes decaiga, provocando que sea más complicado encontrar puntos comunes [5], lo que haría necesario la implementación de más de dos cámaras y su correspondiente dificultad de implementación.

Esta tecnología está siendo ampliamente utilizada actualmente en aquellos sistemas que requieran de cierto grado de autonomía como es el caso de la robótica o los vehículos autónomos.

3.4.2. Tiempo de vuelo (*TOF*)

Otra método para el cálculo de la profundidad y la reconstrucción de una escena de manera tridimensional es la técnica de tiempo de vuelo. Las cámaras que utilizan esta tecnología hacen uso de luz infrarroja enviando pulsos a través de un emisor y midiendo el tiempo que tarda en volver a un receptor tras ser reflejada por el objeto. Es posible también que la fuente de energía emitida sea a través de ultrasonidos, pero la energía electromagnética presenta mejor direccionalidad [15]

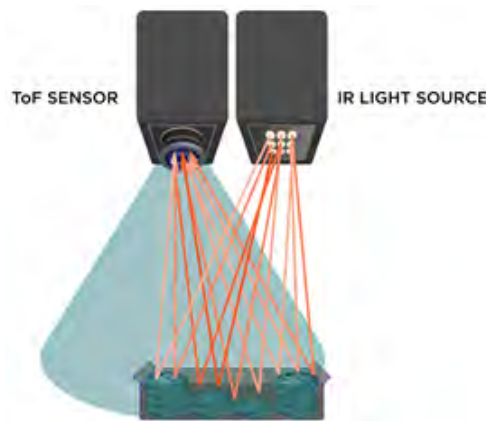


Figura 3.9 Tiempo de vuelo. Fuente: www.clearview-imaging.com

Este tipo de tecnología presenta dos aspectos importantes que deben tenerse en cuenta:

1. **Tiempo de integración:** es el tiempo que necesita el sensor de la cámara para percibir la luz reflejada por el objeto. En caso de tener un tiempo de integración pequeño, la cámara no será capaz de medir correctamente los objetos que se encuentren alejados debido a que la luz no habrá tenido tiempo suficiente de excitar el sensor de la cámara. Si el tiempo de integración es grande, la cámara reducirá su velocidad de adquisición y esto ocasionará valores de distancia incorrectos. Este parámetro puede ajustarse de manera manual (fuera de línea) o automáticamente (calibración en línea), aunque puede ocurrir que el valor de fábrica no sea el más adecuado. Si se incorpora este sistema a un entorno móvil, debe hacerse una calibración en línea, lo que ocasiona una percepción distinta del entorno al cambiar posiciones y escalados

con el cambio de punto de vista de la cámara *TOF*. Por tanto, la estabilidad de las medidas y la precisión asociada dependerá en gran parte del tiempo de integración. [10] La figura 3.10 representa cómo afecta la variación del tiempo de integración con la cámara situada a una distancia constante de un metro de una pared blanca

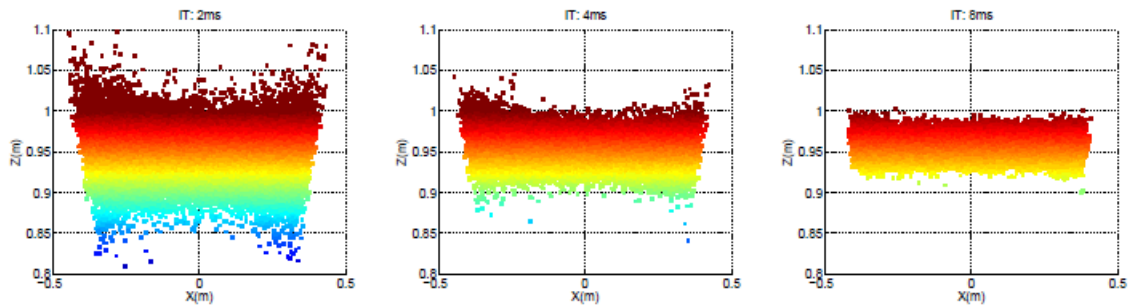


Figura 3.10 Variación del tiempo de integración. Fuente: [7]

2. **Errores en la medición de profundidad:** debido a la arquitectura propia de este tipo de tecnología (errores sistemáticos) o a factores externos que pueden afectar a su rendimiento (aleatorios). Estos errores pueden ser: [7]

- **Distorsión de profundidad** (o error circular): se debe a que en la realidad la luz emitida no puede ser generada de manera sinusoidal por errores en el proceso de modulación, provocando un desfase que depende de la profundidad medida para cada píxel.
- **Errores relacionados con los píxeles:** debido a las propiedades de los materiales del sensor de la cámara, lo que provoca que las profundidades medidas en dos píxeles vecinos sean distintas aunque correspondan a la misma profundidad. Aunque cabe destacar que los errores entre píxeles vecinos son prácticamente despreciables.
- **Errores de amplitud:** la medida de la profundidad depende en gran parte de la amplitud de la luz que el sensor de la cámara recibe, pues cuanto mayor sea la amplitud de la imagen, mayor será la precisión en la medida de la profundidad. Puede deberse a diversas causas, tales como fuentes de luz no homogéneas que provoquen distinta iluminación en la escena o diferencia en las reflectividades de los objetos.
- **Errores relacionados con la temperatura:** debido a que los semiconductores de los sensores de las lentes son sensibles a la temperatura.
- **Distorsión de la relación señal/ruido:** el ruido en la señal aparece fundamentalmente en zonas de baja iluminación.

- **Recepción de múltiples fuentes de luz:** se debe que la luz se refleja en varias superficies antes de llegar al sensor de la cámara ocasionados por la presencia de bordes superficiales y concavidades en el objeto.
- **Dispersión de la luz:** por las múltiples reflexiones de la luz entre el objetivo de la cámara y su sensor.
- **Desenfoque de movimiento:** si el objeto se encuentra en movimiento, puede ocasionar errores en la medida añadiendo ruido en sus bordes.

Algunas de las **ventajas** que presenta esta tecnología son:

1. Debido a que actualmente ya existen soluciones comerciales que incorporan emisor y receptor en un mismo encapsulado, su reducido tamaño facilita su implementación.
2. Por norma general, esta tecnología puede llegar a resultar más asequible que el resto de tecnologías de visión 3D. Por ejemplo una cámara *TOF* que combine una buena relación entre calidad, precisión y precio sería el equipo *Helios 2*, de la compañía Lucid®), con un coste de 1745\$



Figura 3.11 *Helios 2*. Fuente: www.thinklucid.com

En la tabla 3.1 y 3.2 se muestran los valores de precisión y exactitud de esta cámara

Distancia (m)	Exactitud
Modo 1250mm (hasta 1.25m)	± 4 mm
Modo 3000mm (hasta 3.0m)	± 10 mm
Modo 4000mm (hasta 4.0m)	± 10 mm + 0.25 % de profundidad
Modo 5000mm (hasta 5.0m)	± 4 mm + 0.1 % de profundidad
Modo 6000mm (hasta 6.0m)	± 10 mm + 0.5 % de profundidad
Modo 8300mm (hasta 8.3m)	± 4 mm +0.2 % de profundidad

Tabla 3.1 Exactitud de la cámara Helios 2

Por otro lado, este tipo de cámaras presentan algunas **desventajas**:

Distancia (m)	Modo 1250mm	Modo 3000mm	Modo 4000mm	Modo 5000mm	Modo 6000mm	Modo 8300mm
0.5*	1.0 mm	1.9 mm	2.1 mm	0.7 mm	3.6 mm	0.8 mm
1	0.8 mm	1.3 mm	2.1 mm	0.6 mm	2.7 mm	0.6 mm
1.5	1.1 mm	2.5 mm	2.9 mm	0.9 mm	4.0 mm	1.1 mm
2	1.8 mm	3.7 mm	4.9 mm	1.4 mm	7.8 mm	1.7 mm
3		5.7 mm	8.6 mm	2.2 mm	10.0 mm	2.5 mm
4			12.3 mm	3.3 mm	15.7 mm	4.1 mm
5				5.1 mm	28.1 mm	6.1 mm
6					30.1 mm	7.9 mm
7						11.8 mm
8						14.48 mm

Tabla 3.2 Precisión de la cámara Helios 2

1. No es tan preciso en comparación con otro tipo de tecnologías de visión 3D como los perfilómetros láser.⁵
2. Los diversos errores antes mencionados así como el ajuste del tiempo de integración.

Para finalizar, este tipo de tecnología tiene por ejemplo aplicaciones en el campo de la robótica, el mundo industrial para detectar objetos y controlar procesos de fabricación y en el mundo virtual para la industria de los videojuegos a través de la realidad aumentada.

3.4.3. Triangulación láser

La triangulación láser es un método de visión activa 3D en el que se dispone una cámara y una fuente de luz estructurada, en este caso láser, en una configuración espacial cuya geometría es conocida. En la figura 3.12 se observa esta geometría.

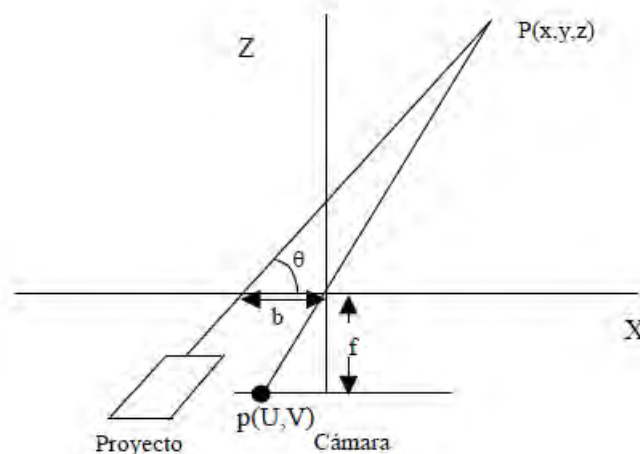


Figura 3.12 Geometría de un sistema de triangulación láser. Fuente: [19]

Donde:

- b es la distancia del punto focal de la cámara al vértice común

⁵La diferencia puede compararse en el apartado *Triangulación láser*

- f es la distancia focal
- θ es el ángulo que forma la fuente de luz con respecto al plano de la cámara
- $P_{x,y,z}$ es el punto de interés
- $p_{U,V}$ es la proyección punto de interés en el sensor de la cámara (plano imagen)

Mediante el cálculo de triángulos semejantes, donde el vértice común es el punto focal de la cámara, y conociendo b , f , U y V es posible obtener las coordenadas tridimensionales del punto P . Las ecuaciones de esta geometría serían entonces:

$$U \cdot Z = X \cdot f \tag{3.6}$$

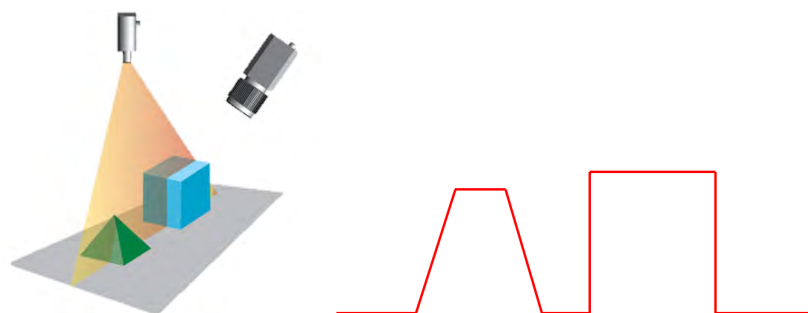
$$V \cdot Z = Y \cdot f \tag{3.7}$$

$$X = \frac{b}{f \cdot \cot \theta - U} \cdot U \tag{3.8}$$

$$Y = \frac{b}{f \cdot \cot(\theta - U)} \cdot V \tag{3.9}$$

$$Z = \frac{b}{f \cdot \cot(\theta - U)} \cdot f \tag{3.10}$$

La proyección de la línea láser sobre el objeto de interés generará una forma bidimensional que puede ser representada en un plano, siendo la cámara la encargada de registrar las alteraciones que se dan al proyectar dicha línea. En la figura 3.13 se muestra una representación aproximada al proyectar una línea láser en un cubo y un prisma triangular.



(a) Proyección de línea láser. (b) Resultado de proyectar la línea láser en el objeto de interés.
 Fuente: www.es.stemmer-i-maging.com

Figura 3.13 Proyección y resultado de triangulación láser

Es inevitable que al proyectar una única línea láser sobre un objeto aparezcan fundamentalmente tres tipos de formas, conocidas como ángulos, saltos y discontinuidades [5]. La figura 3.14 representa cada tipo de forma; siendo *B* ángulos, *J* saltos y *D* discontinuidades por sus siglas en inglés *Bend*, *Jumps* y *Discontinuities*.

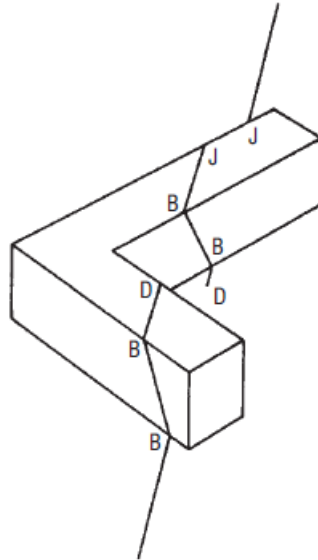


Figura 3.14 Formas generadas al proyectar la línea. Fuente: [5]

Los saltos y discontinuidades generan el problema de identificar un borde de oclusión o un borde ocluido, cuya diferencia radica en que los bordes de oclusión son bordes reales del propio objeto mientras que los bordes ocluidos pueden ser, por ejemplo, regiones de sombra. [5]

Por otro lado, para hacer la **reconstrucción tridimensional** es necesario que la línea láser recorra el objeto para ir trazando punto a punto su forma. Es por ello que esta reconstrucción hace necesario el **movimiento** de dicho objeto o, por otro lado, que sea el propio sistema el que se mueva respecto al objeto. En cualquiera de los dos casos será necesario enviar una señal que indique al sistema en qué punto se encuentra y cuyo responsable, por norma general, será un **encoder**. El tipo de encoder y su ubicación vendrán determinadas por la problemática que se necesite resolver. Por ejemplo, se puede utilizar una cinta transportadora para mover el objeto si su tamaño lo permite y mandar la señal del encoder del motor que mueve la cinta para la sincronización de la captura. En el caso de la **reconstrucción de objetos de revolución**, tanto el sistema cámara-láser como el objeto permanecen fijos, con la diferencia de que el objeto a escanear en lugar de moverse solidariamente con la banda de la cinta, éste rota sobre su propio eje y puede ser un encoder o un motor paso a paso el que se encargue de sincronizar el movimiento de rotación con la captura de la imagen en cada paso del motor.

Respecto a algunas **soluciones comerciales**, se pueden utilizar directamente dispositivos que integran directamente el láser y la cámara conocidos como **perfilómetros**, que ya se mencionaron en la sección 3.1. La principal ventaja de estos dispositivos es su

compacidad y peso por estar todo en una misma carcasa, así como su alta resolución y repetibilidad de hasta $5.8\mu\text{m}$ y $0.2\mu\text{m}$ respectivamente, lo que garantiza una reconstrucción bastante fiable. Otra ventaja si se utilizase un perfilómetro como el de la figura 3.1, es que se podría hacer uso de su software para el control de calidad ya que permite interpretar la lectura del perfilómetro para reconstruir el objeto y realizar mediciones. A pesar de esto, este software tiene algunas limitaciones. Sería necesario desarrollar un software propio que pudiese obtener directamente los datos ofrecidos por el perfilómetro para realizar la inspección de calidad. Además de lo mencionado, el coste elevado puede dificultar su implementación, especialmente si se requiere el uso de más de un perfilómetro.

Otra solución es implementar una triangulación láser clásica mediante una cámara y láser comerciales. Entre las opciones de cámaras disponibles, se encuentra la cámara photonfocus MV-D1034E-3D01, cuyas ventajas también son su compacidad y peso, buena resolución (1024x1024) y buena velocidad de captura (150fps). Esta cámara tiene un coste aproximado de 900\$ y son compatibles con software propio o de terceros como *Halkon*® , *Merlic*® y *Sherlock*®.



Figura 3.15 Cámara Photonfocus MV-D1024E-3D01. Fuente: www.photonfocus.com

El manual de esta cámara especifica, como se explicó anteriormente, que se requiere el uso de un encoder para una adquisición precisa de imágenes 3D. Esto implica ajustar o dividir los pulsos emitidos por el encoder para que coincidan con la frecuencia de adquisición de imágenes de la cámara.



Figura 3.16 División de pulsos de encoder para la adquisición de imágenes. Fuente: www.photonfocus.com

Respecto al láser, tomando como ejemplo un láser utilizado a nivel industrial de la compañía *StockerYale* modelo *Lasiris Magnum*, tiene un coste aproximado de 500 Euros con las características de la tabla 3.3:

Potencia	500 mW
Longitud de onda	670 nanómetros
Ángulo de apertura	10°, 15°, 20°, 30°, 40°, 45°, 55° y 60°
Grosor de línea (enfoque)	ajustable
Clase según IEC 60825-1	3B

Tabla 3.3 Características del láser StockerYale Lasiris Magnum

La triangulación láser presenta varias **ventajas**:

1. Permite un elevado nivel de **precisión**, tanto en dispositivos comerciales vistos anteriormente como en dispositivos de desarrollo propio, tal como detalla el autor en [16], consiguiendo un error mínimo en la medida de 0.01mm y un máximo de 1.45mm.
2. Proporciona **mapas** de puntos tridimensionales altamente **densos**. Por ejemplo, en el caso de los perfilómetros antes mencionados, pueden obtener hasta 4192 puntos por perfil en sus modelos 2600.
3. Utilizar un **sistema de luz activa** ayuda en gran medida a no depender tanto de las condiciones de iluminación ambientales que, aunque sí puedan llegar a afectar a la detección, no de la misma manera que un sistema de visión pasiva.
4. El hecho de utilizar una línea láser con una **longitud de onda conocida** permite emplear filtros que eliminen otras longitudes de onda indeseadas. Esto conlleva una gran ventaja pues esta tecnología no es tan vulnerable a condiciones ambientales donde la iluminación afectaría a las mediciones.

No obstante, la triangulación láser presenta algunas **desventajas**:

1. La aparición de **oclusiones**. Esto generará partes del objeto que la cámara no sea capaz de detectar debido a su posición. Una solución a este problema es la posibilidad de incorporar dos o más cámaras que anulen este defecto, lo que podría a su vez aumentar la precisión en la medición de los puntos más bajos pero complica su implementación y aumenta su precio.
2. Debido al uso de un haz de luz láser, es inevitable la aparición del efecto **Speckle** o ruido *Speckle*. Cuando la luz del láser incide sobre una superficie, no lo hace de forma puntual y perfecta. El láser se esparce en un patrón de luz debido a la propia naturaleza del láser y por las irregularidades microscópicas de la superficie sobre la que se proyecta. Este patrón de luz da lugar a una serie de puntos de luz clara y puntos oscuros que producen un resultado final de patrón granular. Esta distribución de intensidad del láser puede aproximarse a una curva Gaussiana. No

obstante, existen varias formas de atenuar este efecto usando. Por otro lado, aunque suene contradictorio, puede llegar a resultar en cierta manera beneficioso para los algoritmos de detección subpixel ya que aportan más información para el cálculo de las coordenadas.

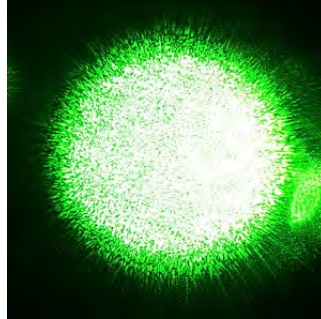


Figura 3.17 Efecto Speckle. Fuente: www.wikipedia.com

3. El uso de láseres con **distribución de línea no uniforme** o Gaussiana puede afectar en la precisión de la reconstrucción. Es decir, por un lado es interesante que el láser siga una distribución Gaussiana de manera transversal (búsqueda por columnas), pero no es de interés que la distribución de la potencia del láser se concentre principalmente en un punto central y vaya decayendo a medida que se aleja de dicho centro (distribución Gaussiana).
4. Son sistemas que suelen requerir de un alto coste.

3.5. Solución a implementar

Como se ha podido comprobar en el presente capítulo, cada sistema de visión por computador presenta ventajas y desventajas. Por un lado, los sistemas de visión bidimensional otorgan una alta velocidad de procesamiento y una implementación relativamente menos complicada que los sistemas tridimensionales. Sin embargo; los sistemas de visión bidimensionales, por su propia naturaleza, no son indicados para la medición de profundidades, que es un parámetro necesario para el control de calidad geométrico del tipo de pieza presentado en 1. Por otro lado, existen distintos tipos de visión tridimensional los cuales no necesariamente son excluyentes entre sí, aunque se suele priorizar su uso según el tipo de aplicación. Para el tipo de aplicación requerida, la precisión del sistema es sin duda el que mayor peso contiene. Es por ello que, atendiendo a lo explicado en este capítulo, para el caso abordado en el presente *TFM*, la mejor solución pasa por la implementación de un **sistema de visión tridimensional tipo cámara y láser** ya que, al menos a nivel comercial, estos sistemas son capaces de entregar precisiones de micrómetros y una alta densidad de puntos para capturar un mayor nivel de detalle. Teniendo en cuenta el coste,

este trabajo tendrá en cuenta este parámetro y se tratará de implementar una solución viable con un presupuesto mucho menor.

Marco teórico

En este capítulo se detalla en profundidad conceptos fundamentales que se deben conocer para poder afrontar el diseño, fabricación y programación de un sistema de visión tridimensional mediante cámara y láser.

4.1. Definición de componentes de un sistema de visión tridimensional mediante cámara y láser

4.1.1. Cámara

¹ La cámara es un componente electrónico capaz de capturar la luz que incide en un sensor y traducirlo en una señal eléctrica que otro dispositivo electrónico, como un ordenador personal, es capaz de interpretar para mostrar una imagen a una determinada resolución. A la hora de escoger qué tipo de cámara es mejor para una aplicación de visión, es importante tener en cuenta estos parámetros:

1. **Tipo de sensor:** según [4], existen fundamentalmente tres tipos de sensores:

- **Position sensitive detector (PSD):** es un tipo de sensor analógico cuyo funcionamiento consiste en medir el desplazamiento de un punto de luz en función de las diferencias de corriente. Esto los hace susceptibles a que la precisión que son capaces de entregar en un sistema de visión se vea comprometida a la forma o intensidad de la luz recibida.
- **Charge coupled device (CCD):** es un tipo de sensor digital que se basa en una matriz de celdillas que generan tensiones proporcionales a la luz medida.

¹Salvo que se exprese lo contrario, las definiciones pueden encontrarse en www.teledynevisionsolutions.com. Las conclusiones han sido extraídas del conocimiento práctico personal



Figura 4.1 Lectura de coordenadas con sensor PSD. Fuente: [4]

Ofrecen de esta forma una mejor solución al problema de la precisión en un sistema de visión, aunque son más sensibles al ruido y requieren un procesamiento más complicado.

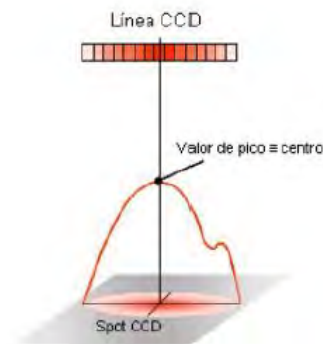


Figura 4.2 Lectura de coordenadas con sensor CCD. Fuente: [4]

- **Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS):** es un tipo de sensor digital en donde cada píxel contiene un amplificador de señal y un fotodiodo que convierte de manera muy eficiente la luz incidente en una señal eléctrica.

Aunque históricamente se ha preferido el uso de sensores CCD en visión por computador dado entre otros motivos porque el CMOS era menos sensible a la luz y muy sensible al ruido, hoy en día los sensores CMOS han ido ganando popularidad al salvar esta diferencia y, además, porque son capaces de capturar imágenes a mayor velocidad, consumen menos energía y tienen un menor coste.

2. **Formato del sensor:** es el tamaño físico del sensor. Un sensor más grande tendrá una mejor *SNR* y mejor rango dinámico con una mayor sensibilidad en condiciones de baja iluminación. A su vez, es un parámetro importante que se debe tener en

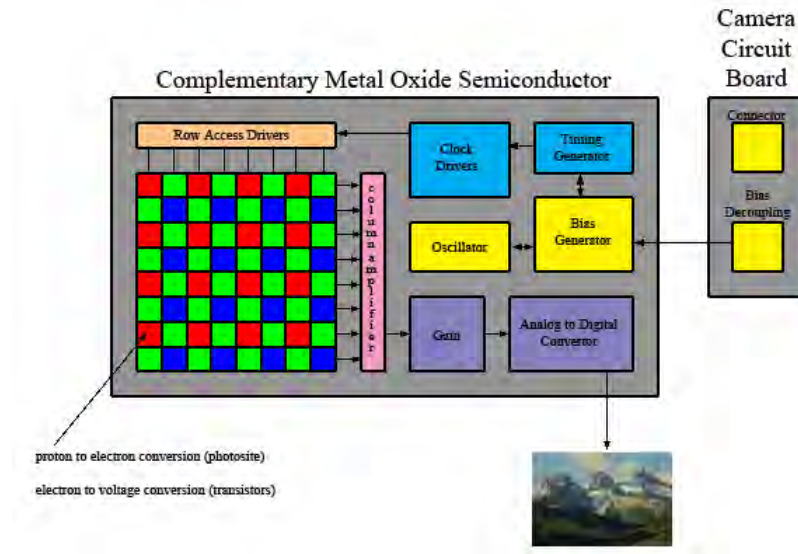


Figura 4.3 Funcionamiento de un sensor CMOS. Fuente: www.sensorcleaning.com

cuenta a la vez que se está seleccionando la mejor óptica para el sistema de visión, ya que un formato de sensor de, por ejemplo una pulgada, tendrá un mayor ángulo de visión pero es probable que a su vez un mayor tamaño de pixel lo que reduciría la resolución espacial y, en consecuencia, menor precisión alcanzable². El tamaño del sensor se utiliza además para saber qué lente es compatible, pues para que así sea, es necesario que el formato de la lente sea mayor o igual al formato del sensor. De lo contrario, aparecerá el efecto de viñeteado [12]. Sería como ver una imagen con un ojo semiabierto.

3. **Tecnología de captura:** en el sensor de la cámara, se distinguen fundamentalmente dos modos de capturar la imagen
 - **Rolling shutter:** o efecto *persiana*, ya que los pixeles del sensor no se exponen a la luz al mismo tiempo
 - **Global shutter:** al contrario que en el caso anterior, los pixeles se exponen a la vez al capturar la imagen

Como es de intuir, el hecho de que los pixeles no se expongan a la misma vez a la luz cuando se toma una imagen, suele generar distorsiones en aquellos casos donde se necesita capturar movimiento o capturar a altas velocidades, ya que en un sensor *rolling shutter* cada fila de pixeles se expone a la luz en diferentes instantes de tiempo.

4. **Eficiencia cuántica:** se refiere a la capacidad máxima que tiene un sensor para transformar el máximo número de fotones en una señal eléctrica para una determi-

²ver apartado 4.1.2.

- nada longitud de onda. Por ejemplo, una eficiencia cuántica del 50 % implica que 50 de cada 100 fotones generan un electrón.
5. **Color o monocromo:** en el caso de las aplicaciones de visión tridimensional mediante un sistema cámara láser, son interesantes porque los sensores monocromo son más sensibles a los cambios de intensidad lumínica frente a los sensores de color puesto que toda la luz que reciben se transforma directamente en señal eléctrica (bajo la condición de a eficiencia cuántica). Además, si en una aplicación de visión por computador el color no es un factor relevante, se debe considerar utilizar sensores monocromo ya que reducirán el coste de la cámara.
 6. **Resolución:** es la cantidad de píxeles que contiene una imagen. Se suele expresar como la cantidad de píxeles a lo largo de una imagen (eje horizontal) por la cantidad de píxeles a lo alto de una imagen (eje vertical). Cuanto mayor sea la resolución, mayor número de píxeles contendrá la imagen y, por tanto, será posible capturar detalles más finos aunque aumentando el peso de la misma. Por norma general, a mayor resolución, mayor será el coste del sensor.
 7. **Tamaño del pixel:** vinculado con la resolución de una imagen, un menor tamaño de pixel favorecerá conseguir una mayor resolución, aunque se debe tener en cuenta también que los píxeles más grandes puede recoger más luz y, en consecuencia, presentar una mejor relación señal/ruido. Es por ello que es importante tratar de encontrar el equilibrio entre resolución y tamaño de pixel para minimizar esa relación. Por lo general, a nivel industrial, se suele utilizar tamaños de píxeles de entre $1.5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$
 8. **Capacidad de llenado:** también conocido como capacidad de saturación o profundidad del pozo, ya que es la cantidad máxima de electrones que admite cada pixel antes de entrar en estado de saturación. Es decir, si se trata de una escena con alta iluminación, se debería considerar tener una capacidad de llenado alta para no obtener una imagen *quemada* o saturada
 9. **Rango dinámico:** es la capacidad que tiene un sensor para capturar detalles tanto en áreas oscuras como en zonas iluminadas. Se puede describir como una relación entre la señal más fuerte y la más débil, pero se suele expresar en decibelios (dB). De esta forma, un mayor rango dinámico implicará que el sensor de una cámara es capaz de captar mejor los detalles. En visión por computador esto es importante en escenas donde se considere que se va a sufrir iluminación variable. El rango dinámico está relacionado con la capacidad de llenado de un sensor y el ruido de lectura según la ecuación

$$\text{Rango Dinámico (dB)} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{Capacidad de llenado (e}^-)}{\text{Ruido de lectura (e}^-)} \right) \quad (4.1)$$

Cuando se habla de ruido en la imagen, se entienden los siguientes tipos de ruido:

- **Ruido térmico:** por la agitación térmica de los electrones en el sensor.
- **Ruido de lectura:** introducido por los circuitos electrónicos de la cámara al leer cada pixel
- **Ruido de disparo:** por la propia naturaleza de la luz
- **Ruido de corriente oscura:** que son cargas que se generan aún cuando la luz no incide en el sensor.

Finalmente, como dato de referencia, el ojo humano posee aproximadamente un rango dinámico de 100dB, mientras que un sensor industrial varía de los 60dB a los 90dB.

10. **Relación señal/ruido (Signal Noise Ratio, SNR):** describe la cantidad de electrones generados por la luz de la escena frente a la cantidad de electrones generados en el interior del sensor y que no contienen ningún tipo de información relevante de la misma, es decir, son ruido. Es por ello que surge el parámetro SNR, el cual mide la calidad de la información en un entorno con ruido. De esta forma, siempre se busca maximizar SNR ya que el sensor de la cámara será capaz de generar una imagen clara aún en presencia de ruido. El SNR se calcula según la ecuación

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{Señal}}{\text{Ruido}} \right) \quad (4.2)$$

Por ejemplo, un SNR de 50 dB conllevaría que la señal es aproximadamente 316 veces mayor que el ruido.

Finalmente, el SNR está intrínsecamente relacionado con el rango dinámico ya que establece el límite inferior efectivo del mismo. En términos de la imagen, un alto SNR nos ayuda a establecer una medida que sirva para distinguir imágenes con información útil de las que no la tienen.

11. **Profundidad de bits:** indica la el número de bits utilizados para representar diferentes tonalidades de color en el caso de los sensores de color, o diferentes valores de intensidad lumínica en el caso de los sensores monocromo De esta forma, un sensor con un conversor analógico/digital (ADC) con profundidad de 8 bits, podríamos representar $2^8 = 256$ valores, con 10 bits serían $2^{10} = 1024$ valores, con 12 serían $2^{12} = 4096$ y finalmente con 16 bits serían $2^{16} = 65536$ valores diferentes. Se puede

comprobar que una cámara que ofrezca una mayor profundidad de bits ofrecerá entonces imágenes más detalladas, aunque a un determinado coste según la ecuación 4.3

$$\text{Tamaño imagen (bytes)} = \text{Ancho} \times \text{Alto} \times \frac{\text{Profundidad}}{8} \quad (4.3)$$

Para que la cámara recoja adecuadamente estos valores, se debe considerar configurar el **formato del pixel** de manera adecuada. Por ejemplo, si se escoge una profundidad de 12 bits pero un formato del pixel tipo *Mono8* que únicamente puede representar 256 valores, se estaría perdiendo 4 bits de información. La mejor forma de entender esta relación es imaginando cómo sería tratar de meter el pie en un zapato con un número menor al suyo. Directamente no cabría. Pues en el caso de la profundidad de bits y el formato del pixel puede caber, pero considerando una pérdida de información que se traduce en menos valores de gris en caso de un sensor mono.

12. **Ganancia y rango de ganancia:** la ganancia es el factor de amplificación del sensor que posteriormente utiliza el conversor ADC. Se mide en electrones por unidad de conversión analógica/digital (e^-/ADU). Es decir, es la cantidad de electrones que se necesitan para cambiar una unidad del valor digital. Una baja ganancia implica una mejor precisión en la medida al requerir más electrones para un cambio de una unidad digital. Es decir, una ganancia de $1 e^-/\text{ADU}$ implica 1 electrón para realizar el cambio y una ganancia de $0.5 e^-/\text{ADU}$ implica $1/0.5 = 2$ electrones para el mismo cambio. En cámaras industriales se suele priorizar una baja ganancia con el fin de obtener una mayor precisión frente a una mayor sensibilidad.

Por otro lado, el rango de ganancia se mide en decibelios y representa el rango de valores que la cámara es capaz de manejar para amplificar la señal. Es interesante mantener el rango de ganancia lo más cercano a cero para disminuir el ruido de la imagen, aunque para ello es necesario tener una buena iluminación. En la práctica, es muy complicado tener este valor cercano a cero.

13. **Threshold:** o umbral de sensibilidad, indica la mínima cantidad de luz que necesita el sensor de una cámara para transformar dicha luz en una señal eléctrica. El threshold y el *SNR* son valores relacionados, pero que indican conceptos diferentes. Si se imagina en mitad de un concierto con multitud de gente, el threshold sería el ruido más débil que sería capaz de distinguir en medio del bullicio mientras que el *SNR* supondría la diferencia entre la propia música del concierto y el ruido generado por el público. En términos de la imagen, el threshold indica la capacidad de la cámara de detectar señales muy débiles y el *SNR* la sensibilidad de distinguir dicha señal del ruido. Es por ello que siempre se debe buscar un menor Threshold.

14. **Fotogramas Por Segundo (FPS):** cuando se escoge una cámara, se debe tener en cuenta la cantidad de imágenes por segundo que es capaz de capturar. En un sistema de visión tridimensional, los FPS estarán directamente relacionados con la velocidad que se desea escanear una pieza. Por norma general, a mayor resolución, menor velocidad de fotogramas.

15. **Tecnología de transferencia de datos:** actualmente en el mercado es posible adquirir una cámara que envíe los datos mediante cable ethernet (estándar GiGe) y mediante cable USB (USB3.0). A la hora de escoger una u otra tecnología, se debe tener en cuenta:
 - **Velocidad de transferencia:** USB3 tiene una velocidad de transmisión de datos de hasta 4,8 Gbit/s (600MB/s). Por otro lado, GigeVisión es capaz de alcanzar velocidades teóricas de 1Gbit/s (125Mb/s) [21]. Aunque hoy en día existe también el estándar GigeVisión 10G que alcanza velocidades de 10 Gbit/s, salvando la diferencia con USB3 pero encareciendo el costo de la cámara.
 - **Alcance:** las cámaras con cables ethernet permiten distancias de hasta 100 metros, lo cual es una distancia plausible en un entorno industrial. Las cámaras con cables USB se recomienda utilizarlas en aplicaciones con una distancia pequeña entre la cámara y el ordenador.

16. **Numero de entradas y salidas:** es importante considerar que, para poder sincronizar la cámara, ésta debe contar con un número y tipo de entradas y salidas. Por lo general, es deseable, al menos, una entrada y una salida de preferencia optoacoplada, que implica que está protegida de lazos de tierra y sobrecorrientes, favoreciendo la calidad de las señales y aumentando su inmunidad al ruido.

La figura 4.4 muestra un resumen gráfico de algunos de los conceptos previamente definidos

4.1.2. Óptica

La óptica es el dispositivo encargado de concentrar la luz de la escena en el sensor de la cámara para poder formar una imagen. Es un elemento fundamental que determina en gran parte la geometría de un sistema de visión, así como la calidad de la imagen que se espera conseguir. A la hora de seleccionar una óptica para un sistema de visión, se debe tener en cuenta los siguientes conceptos importantes:

1. **Distancia focal:** es la distancia que separa el centro de las lentes de su foco [16]. Este es probablemente el parámetro más importante pues a menor distancia focal, mayor será la distorsión aplicada por la óptica pero, a su vez, permitirá trabajar

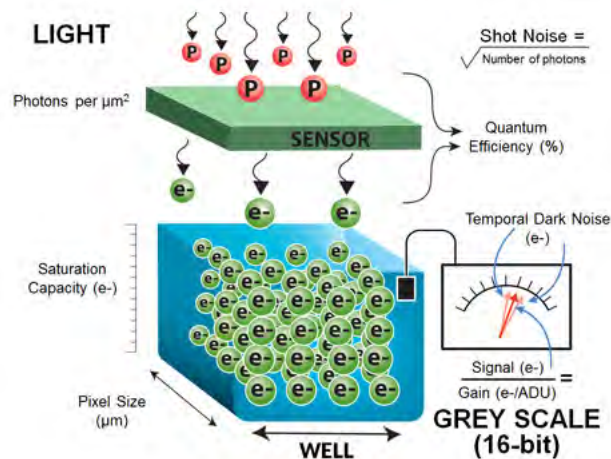


Figura 4.4 Resumen de cómo un sensor convierte la luz en una imagen digital. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com

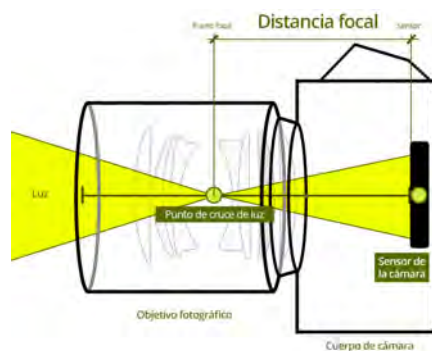


Figura 4.5 Distancia focal. Fuente: www.diligent.es

a una menor distancia ya que las distancias focales cortas tienen un **ángulo de visión** mayor que las distancias focales grandes. Se entiende ángulo de visión como el ángulo que se forma entre la lente y los extremos del sensor. Atendiendo a la figura

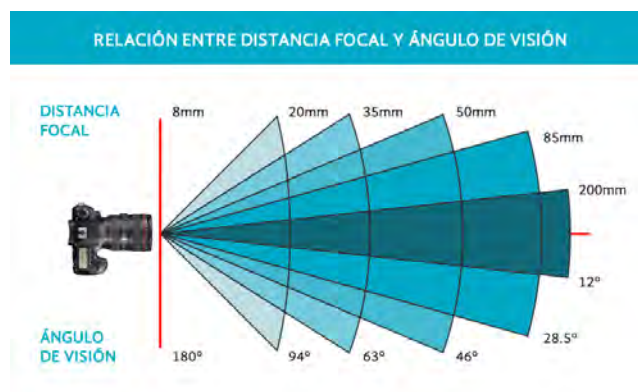


Figura 4.6 Relación entre la distancia focal y ángulo de visión. Fuente: www.blog.foto24.com

4.7, se puede calcular el ángulo de visión según la ecuación 4.4

$$\gamma = 2 \cdot \arctan \frac{a_s}{2f} \quad (4.4)$$

Donde γ representa el ángulo de visión, a_s el ancho/alto del sensor y f la distancia focal de la óptica.

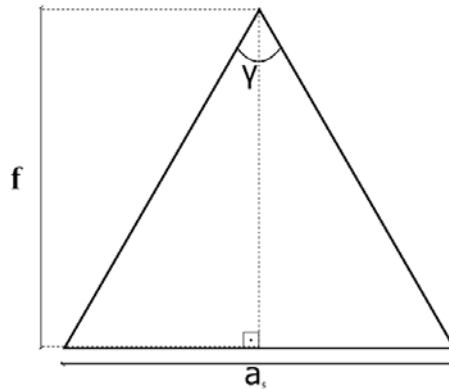


Figura 4.7 Representación gráfica del ángulo de visión.

Un mayor ángulo de visión permitirá a su vez una mayor área de inspección, o **campo de visión** (*Field Of View, FOV* por sus siglas en inglés). El campo de visión es el área bajo inspección que la cámara necesita adquirir [12].

Una menor distancia de trabajo permite concentrar un mayor número de píxeles en un único punto de la imagen, lo que da lugar a apreciar más detalles de la escena en dicho punto. Aunque este hecho está relacionado, como se comentó en el apartado 4.1.1, con el tamaño del píxel y la resolución de la cámara, se debe tener también en cuenta la distancia focal que a su vez marcará la distancia de trabajo.

La relación entre el tamaño del píxel, la distancia de trabajo y la distancia focal se conoce como **resolución espacial** según la ecuación 4.5

$$\text{Resolución espacial} = \frac{\text{tamaño del píxel} \times \text{distancia al objeto}}{\text{distancia focal}} \quad (4.5)$$

Y se suele medir habitualmente en milímetros por píxel.

La resolución espacial ayuda a entender qué tan bien podrá la cámara distinguir pequeños detalles determinando así la precisión máxima que será capaz de alcanzar el sistema de visión. Es decir, distinguir la característica más pequeña posible. Por tanto, es deseable un valor de resolución espacial pequeño.

Aunque campo de visión (*FOV*) y resolución espacial son conceptos relacionados, es importante distinguir entre ellos ya que pueden dar lugar a confusiones. *FOV* es el área de interés que la cámara es capaz de fotografiar a lo largo y ancho. Por otro lado, la resolución espacial es la capacidad máxima de la cámara de distinguir detalles en

el sentido horizontal y vertical. Ambos están intrínsecamente relacionados, ya que si se atiende a la figura 4.8, se puede calcular el valor de FOV según la ecuación 4.6

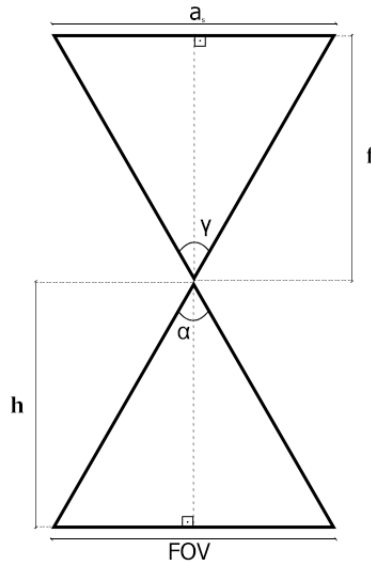


Figura 4.8 Relación geométrica entre ángulo de visión y FOV . Fuente: www.ni.com

$$FOV = \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{2 \cdot h} \quad (4.6)$$

Pero asumiendo un sistema ideal donde el ángulo de visión γ es igual al ángulo de apertura de la cámara α , ya que no se consideran distorsiones, efectos de alineación ni ningún tipo de alteración de los rayos de luz, se puede relacionar FOV con el ángulo de visión según la ecuación

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{FOV}{2h} = \frac{a_s}{2 \cdot f} \rightarrow FOV = \frac{h \cdot a_s}{f} (mm \cdot pixel) \quad (4.7)$$

Que es la misma conclusión que se llega en el artículo de [12]

Es posible entonces concluir que para un mismo tamaño de pixel, a menor distancia focal, mayor será el ángulo de visión, mayor será el FOV pero peor resolución espacial (y viceversa) siguiendo la ecuación 4.5. Es por ello que es importante encontrar un buen equilibrio entre los diferentes conceptos previamente explicados en función de cada caso de aplicación para un sistema de visión por computador, independientemente de que dicha aplicación sea visión bidimensional o tridimensional.

2. **Apertura de la óptica:** describe la cantidad posible de luz que incide en el sensor de la cámara en función de la apertura de su diafragma. Se suele expresar como el *número f* de la forma $f/\#$, donde f representa la distancia focal y $\#$ el diámetro de apertura del diafragma. Una mayor apertura de la óptica implicará un mayor diámetro de apertura del diafragma y, por lo tanto, mayor luz entrará en el sensor

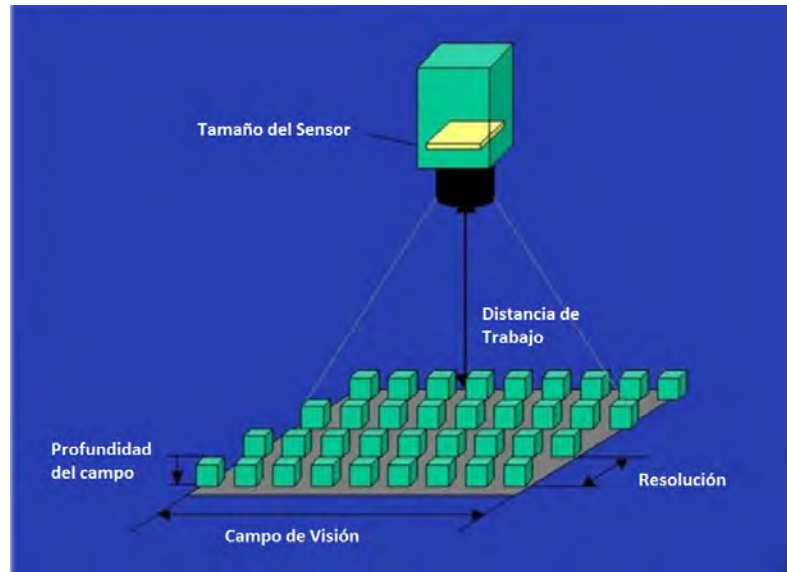


Figura 4.9 Resumen gráfico de los conceptos explicados. Fuente: www.ni.com

de la cámara. La apertura del diafragma está directamente relacionada con la **profundidad de campo**, que es la zona de la imagen que permanece nítida o enfocada, como se puede ver en la figura 4.10

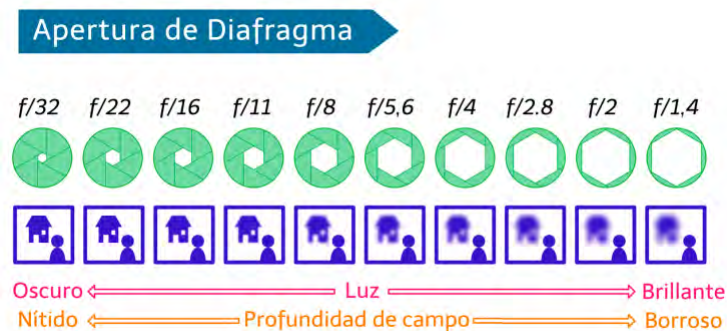


Figura 4.10 Apertura del diafragma y su relación con la profundidad de campo. Fuente: www.dzoom.com

En una aplicación de visión, es importante saber escoger adecuadamente una correcta apertura de la óptica, pues se corre el riesgo de perder detalles por una profundidad de campo incorrecta que provoque que el objeto de interés quede borroso. En el caso de los sistemas de visión tipo cámara y láser, es importante al ser imprescindible ver de manera nítida la línea láser para poder reconstruir correctamente.

3. **Tipo de montura:** no es un parámetro especialmente relevante por tener solución sencilla y de bajo costo, pero se debe tener en cuenta a la hora de elegir cámara y óptica. Existen dos tipos de montaje en las ópticas: montaje tipo CS y montaje tipo C. Es posible utilizar ópticas con montaje tipo CS en cámaras con montaje tipo C utilizando un adaptador específico para ello que compense la diferencia de cinco

milímetros entre el montaje C (distancia focal de brida = 17.526mm) y el montaje tipo CS (distancia focal de brida = 12.5mm).

4.1.3. Láser

Un láser es un sistema que incorpora un fotodiodo capaz de emitir luz en una longitud de onda concreta con un cierto margen de error. Cuando la aplicación de visión consiste en un sistema de visión tridimensional en el que se utilizará una cámara y un láser, se debe tener en cuenta algunos aspectos importantes para poder seleccionar correctamente el tipo de láser a;con el propósito de reducir la complejidad en la detección de la línea. Estos son:

1. **Longitud de onda:** la longitud de onda que debe emitir el láser vendrá determinada fundamentalmente por los siguientes parámetros [1]:
 - **Tipo de material a escanear:** los materiales altamente reflectantes pueden ocasionar mediciones imprecisas en aquellos láseres con una longitud de onda superior. Por ejemplo, un láser rojo con una longitud de onda de 650 nanómetros, que suele ser habitual, incidirá más en la superficie que un láser con una longitud de onda menor. Esto generará mayor ruido en la medición y es por ello que los láseres con una menor longitud de onda suelen ser más eficaces en peores condiciones como materiales muy reflectantes o traslúcidas. [8], [9]. Tampoco es recomendable descartar láseres de mayor longitud de onda como el rojo ya que son igualmente válidos en caso de que se fuese a trabajar con material con objetos cuya superficies sea poco reflejante, añadiendo además que tienen un coste inferior y que se trata de una tecnología muy desarrollada por su popularidad.
 - **Velocidad de escaneo:** debido a la mayor penetración de los láseres con longitud de onda mayores, son más indicados para aquellas aplicaciones donde se requiera una mayor velocidad de escaneo como, por ejemplo, piezas en movimiento sobre una cinta transportadora.
 - **Eficiencia del sensor:** como se explicó en el apartado 4.1.1, los sensores de las cámaras son capaces de convertir de manera más efectiva los fotones en electrones a una determinada longitud de onda de la luz incidente en dicho sensor. Por lo general, los sensores de las cámaras están optimizados para que su pico de eficiencia cuántica se dé en longitudes de onda más larga.
2. **Perfil del láser:** Como se ha visto en el apartado 3.4.3, cuando se necesita extraer las coordenadas de la línea láser en una imagen, idealmente se requiere que la distribución de intensidad a lo largo de dicha línea siga una distribución uniforme

ya que, en caso de seguir una distribución Gaussiana, existirán zonas más iluminadas que afectarán al procesamiento de la imagen [17], perdiendo de esta manera información relevante de la imagen y, con ello, disminuyendo la precisión esperada. Además, este fenómeno obliga a, por ejemplo, aumentar el tiempo de exposición de la cámara para conseguir iluminar dichas zonas y afectando en consecuencia, entre otros parámetros, el número de *FPS* que la cámara será capaz de capturar en un mismo espacio de tiempo. Es por ello que hoy en día existe la posibilidad de adquirir láseres que no sigan una distribución Gaussiana a lo largo de toda la extensión de la línea láser, sino que son capaces de proporcionar la misma intensidad de luz de manera uniforme como se muestra en la figura 4.11

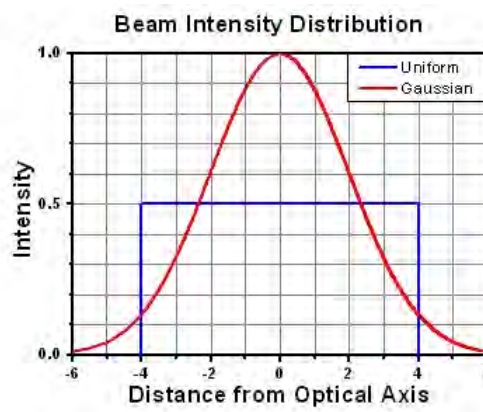


Figura 4.11 Gráfica de los perfiles de intensidad de un láser con distribución Gaussiana y con distribución uniforme. Fuente: www.oem-laser.com

Para comprender mejor cómo influye la distribución del haz láser en su detección, la figura 4.12 muestra una comparación bajo idénticas condiciones de iluminación, distancia de trabajo y configuración de la cámara. En la parte superior se observa un láser de distribución Gaussiana, mientras que en la parte inferior se muestra uno de distribución uniforme. El láser que sigue una distribución Gaussiana ilumina de manera más irregular la pieza frente al láser con distribución uniforme. Además, en el láser con distribución Gaussiana aparece el patrón moteado del efecto *Speckle* que provocará, sumado a su tipo de distribución, medidas más irregulares en comparación con el otro tipo de láser o, por lo menos, una mayor complejidad a nivel de software para lograr los mismos resultados.

Por otro lado, ambos láseres se comportan similar de manera transversal (búsqueda por columnas), aunque no igual. Si se atiende a la figura 4.13, es posible entender que el láser que sigue una distribución uniforme durante de toda la extensión de su línea, además, tiene un mejor comportamiento de manera transversal, pues la reducción del efecto *Speckle* ayuda también significativamente a encontrar más eficientemente el centro de la línea láser estableciendo bordes mejor definidos.



Figura 4.12 Comparación de los perfiles de intensidad de un láser durante la longitud de su línea con distribución Gaussiana y con distribución uniforme.

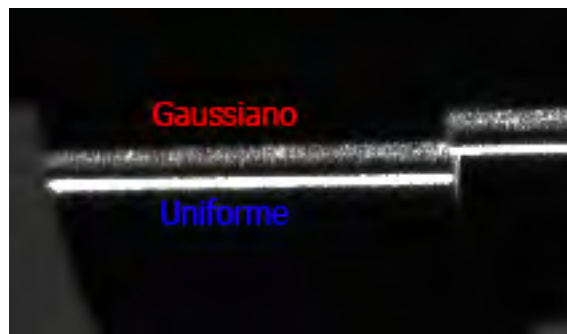


Figura 4.13 Comparación de los perfiles de intensidad de un láser de manera transversal

Es importante también mencionar que ambos láseres tienen una longitud de onda distinta. El láser Gaussiano de luz roja es de 650nm, y el láser uniforme de luz azul de 450nm. Esto ayuda también a comprobar lo mencionado en el punto anterior, pues un láser con una mayor longitud de onda, salvando la diferencia de coste entre ambos, favorecerá también una mayor manifestación del efecto *Speckle*.

Aunque no cabe duda de que un láser de distribución uniforme facilita la detección de la línea láser, se debe tener en cuenta que un láser de estas características encarece el presupuesto de un proyecto, más aún si la longitud de onda es de 450nm.

3. **Ángulo de apertura:** se refiere al ángulo con el que se proyecta el láser. Un mayor ángulo de apertura permitirá una menor distancia de trabajo, lo que implicará aprovechar mejor la potencia del láser.

4. **Potencia:** define la cantidad de energía que el láser es capaz de emitir en función del tiempo. Medido en mili vatios (mW), se debe considerar que una mayor potencia del láser ayudará a que el haz incida mejor en diferentes tipos de material y será más fácilmente visible en la imagen bajo diferentes condiciones de iluminación.
5. **Ancho de línea:** se trata de una medida estándar en la industria de la fabricación láser que describe cómo varía la intensidad del haz desde su punto máximo. Se mide tomando en cuenta el valor $1/e^2$, donde e es el número de Euler. Es decir, mide la distancia entre los puntos donde la intensidad cae al 13.5% del valor máximo. Este valor está relacionado normalmente con la distancia de trabajo del láser, siendo óptimo encontrar el menor ancho de línea posible con el fin de facilitar la tarea de encontrar el pico de intensidad en la imagen. A menor distancia de trabajo, menor será la anchura de la línea láser. Normalmente los fabricantes suelen especificar de manera orientativa varias anchuras de la línea láser en función de la distancia de trabajo.
6. **Tipo de láser:** este es un parámetro importante ya que se clasifican en función de su longitud de onda, tiempo de exposición y potencia [20], siendo los láseres clase 1 los que entrañan menos riesgo para la salud y los de clase 4 los que necesitan la mayor precaución posible. Si la clase del láser es alta, se debe considerar establecer medidas de seguridad para evitar daños o lesiones.
7. **Dimensiones y peso:** finalmente, pero no menos importante, se debe intentar conseguir un láser con el menor peso y dimensiones posibles dadas unas determinadas características para facilitar su posterior implementación.

4.1.4. Filtro

Para minimizar el posible ruido que entre al sensor en forma de longitudes de onda que no concuerden con la longitud de onda del láser, es posible añadir un filtro al final de la óptica que, con cierto margen, deje pasar únicamente dicha longitud de onda. Esto ayuda al sensor a distinguir la línea láser del resto de la escena, aunque para el caso de este trabajo no se han contemplado el uso de este tipo filtros.

4.1.5. Sincronización pieza e imagen

Es importante establecer una buena manera de sincronizar el movimiento de la pieza con la con la toma de las imágenes. En el apartado 3.4.3 se menciona por ejemplo la cámara comercial de la figura 3.15, que establecía una forma de sincronizar el movimiento de la pieza con su captura. Existen varias formas de afrontar este problema, siendo las más comunes el uso de un **motor** con un encoder acoplado a su salida que mande los

pulsos a la cámara o un **motor paso a paso** que cumpla la misma función pero sin la necesidad de utilizar un encoder. En ambos casos es interesante que el número de pulsos por vuelta sea el mayor posible porque, de esta manera, se podrá disparar más veces la cámara en un menor espacio de tiempo, aunque siempre con la limitación de los *FPS*. Disparar más veces la cámara implicará un aumento en el número de puntos capaces de capturar y, en consecuencia, ser capaces de detectar detalles más finos.

4.2. Modelos de lentes y distorsión de una óptica.

4.2.1. Modelos de lentes

Existen principalmente tres modelos matemáticos encargados de definir la transformación de la luz que recibe una óptica [2]

1. **Modelo Pin-Hole:** se trata del modelo más simple de todos pero además el más utilizado. Basado en proyección perspectiva, reduce el sistema óptico a un único punto conocido como centro óptico o *foco* de coordenadas C_x y C_y en la imagen 4.14. Este centro óptico representa un agujero infinitesimal por el cual sólo puede pasar un único rayo de luz, de tal forma que cada elemento de la escena incide en un único elemento del sensor. El eje óptico se representa como la línea perpendicular a la imagen y el único parámetro del modelo es la distancia focal de la óptica.

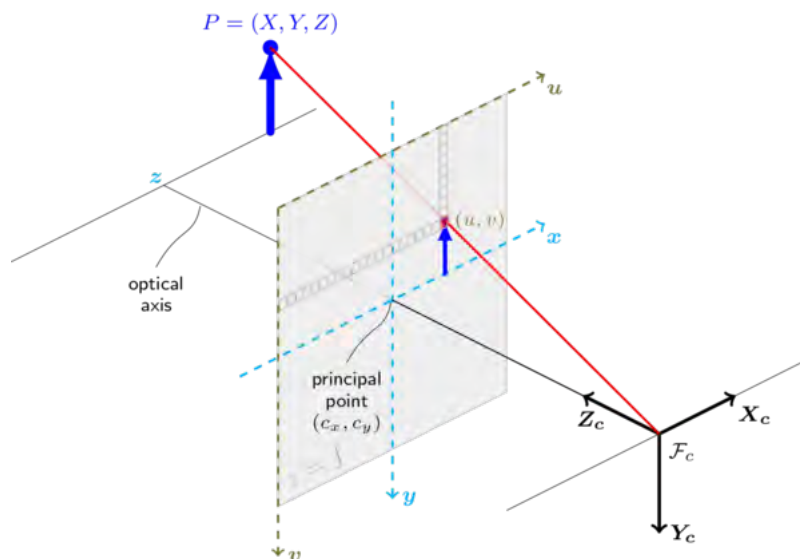


Figura 4.14 Modelo Pin-Hole. Fuente: www.opencv.com

2. **Modelo de lente delgada:** el modelo de lente delgada surge de la necesidad de modelar el sistema óptico no sólo desde el punto de vista geométrico, sino también buscando ampliar dicho punto tomando en consideración más parámetros fundamentales que pueden modelar una óptica. Así, en lugar de que el centro óptico sea

atravesado por un único rayo de luz, considera varios de ellos convergiendo en un mismo punto una vez atravesen las distintas lentes de ancho cero (son planos) que no aportan deflexión. El modelo de lente delgada cumple la ecuación 4.8

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (4.8)$$

Donde según la figura 4.15; d_o es la distancia al objeto, d_i es la distancia la imagen y f es la distancia focal de la óptica.

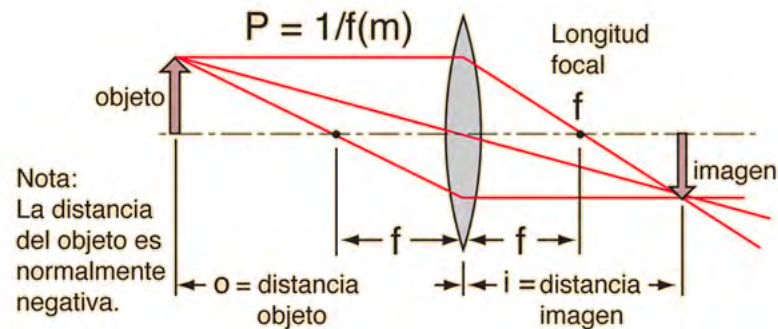


Figura 4.15 Modelo lente delgada. Fuente: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

3. **Modelo de lente gruesa:** una óptica real está construida en base a una serie de lentes cuya combinación trata de reducir las aberraciones en cada una de ellas. El modelo de lente gruesa tiene en cuenta este hecho, pues añade grosor a cada lente para replicar el comportamiento real de una óptica. Este modelo se suele emplear en ópticas con zoom y ópticas con lentes más complejas.

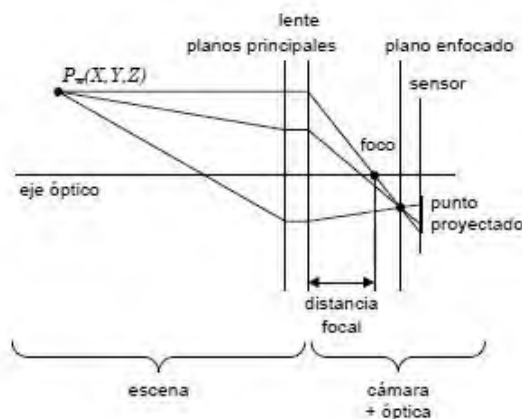


Figura 4.16 Modelo lente gruesa. Fuente: [16]

La complejidad que añaden los modelos de lente delgada y lente gruesa y el poco aumento en la precisión que aportan frente al modelo pin hole [2], ha favorecido que el modelo pin-hole sea el más utilizado de los tres presentados.

4.2.2. Distorsión de una óptica. Modelos de distorsión.

Al añadir una óptica a una cámara, es prácticamente irremediable que se introduzcan cierto tipo de distorsiones en la imagen final debido a que sus procesos de fabricación son muy complejos y a las propiedades intrínsecas de cada una de las lentes que las componen. Esto provoca que un punto teórico ideal de coordenadas (u, v) en la imagen cambie su posición a otro punto (u', v') de coordenadas distorsionadas. Por tanto, en los sistemas de visión es especialmente relevante tomar en consideración las distorsiones que aplica la óptica y corregirlas para obtener medidas precisas.

La distorsión puede expresarse según la ecuación 4.9 [2]:

$$\begin{aligned}u' &= u + \delta_u(u, v) \\v' &= v + \delta_v(u, v)\end{aligned}\tag{4.9}$$

Donde $\delta_i(u, v)$ es la función que modela la distorsión en ambos ejes.

Existen fundamentalmente tres tipos de distorsiones [2]:

1. **Distorsión radial:** también conocida como distorsión de *efecto barril* (barrel distortion en inglés). Ocurre cuando la distorsión es positiva por la forma que adquiere la imagen distorsionada, que tiende a abombar la parte central de la imagen. En el caso de ser negativa, el centro quedaría hundido en lugar de abombado y se conoce como distorsión *de efecto cojín* (pincushion distortion en inglés). En la figura 4.18 se puede ver un ejemplo de una gran distorsión radial positiva, donde los puntos son desplazados radialmente a partir del centro.

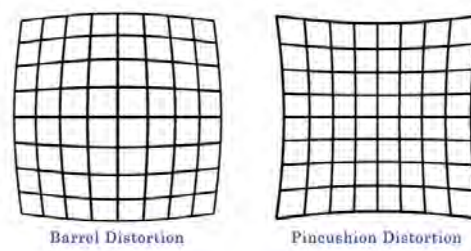


Figura 4.17 Distorsión radial. Fuente: <https://clickitupanotch.com/lens-distortion/>

Si tomamos en cuenta una lente perfectamente centrada, la distorsión radial de una lente se puede modelar según la ecuación 4.10 [2]:

$$\delta_r = 1 + k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + k_3\rho^6 + \dots\tag{4.10}$$

Donde ρ es la distancia radial desde el punto principal del plano de la imagen y k_n los coeficientes de distorsión radial.



Figura 4.18 Ejemplo de distorsión radial. Fuente: www.wikipedia.com

Este tipo de distorsión se suele producir por defectos en la curvatura de las lentes y se da fundamentalmente en ópticas con distancias focales cortas.

2. **Distorsión tangencial:** dado que las lentes de las ópticas no son perfectamente colineales con el centro del sensor, se introduce una distorsión que provoca desplazamientos radiales y tangenciales conocida como distorsión descentral. Esta distorsión provoca que las líneas rectas aparezcan curvadas, ocasionando desplazamientos perpendiculares a las líneas radiales. Este tipo de distorsión, al contrario que la radial, no es simétrica respecto al centro óptico de la imagen y suele ser menos notoria. Matemáticamente, esta distorsión puede expresarse según la ecuación 4.11

$$\begin{aligned}\delta_u(u, v) &= p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv \\ \delta_v(u, v) &= p_2(3v^2 + u^2) + 2p_1uv\end{aligned}\tag{4.11}$$

Donde p_1 y p_2 son los coeficientes de distorsión.

3. **Distorsión Prismática:** con origen en los defectos de fabricación, diseño y/o montaje de las lentes, este tipo de distorsión ocurre cuando una óptica actúa como un prisma no deseado y desviando así los rayos de manera uniforme, lo que provoca un desplazamiento en la imagen sin llegar a deformarla. Se puede expresar según la ecuación 4.12

$$\begin{aligned}\delta_u(u, v) &= s_1(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) &= s_2(u^2 + v^2)\end{aligned}\tag{4.12}$$

Se puede considerar un **modelo de distorsión total** si se suman los tres tipos de distorsión, pero despreciando todos los términos de orden superior a tres según la ecuación 4.13

$$\begin{aligned}\delta_x(u, v) &= uk_1r^2 + p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2uv + s_1(u^2 + v^2) \\ \delta_y(u, v) &= vk_1r^2 + p_2(3v^2 + u^2) + 2p_1uv + s_2(u^2 + v^2)\end{aligned}\tag{4.13}$$

Donde $r = u^2 + v^2$.

En la práctica, el peso de cada tipo de distorsión vendrá condicionado por las características de cada sistema de visión. Por ejemplo, utilizar ópticas con focales cortas añadirá un tremendo efecto de distorsión radial que implicará corregir muchos píxeles de la imagen, sacrificando en consecuencia bastante resolución. Se considera que una óptica tiene una distancia focal neutra, es decir, no añade mucha distorsión, si tiene un valor de $f = 50$ milímetros. Esta focal es similar a la vista del ojo humano.

4.3. Reconstrucción tridimensional

Para que un sistema de visión por computador se considere tridimensional, éste debe ser capaz de medir distancias en los tres principales ejes cartesianos. En el punto anterior se hizo mención, sin entrar en más detalle, al modelo *pin-hole*. Este modelo sienta las bases para la reconstrucción tridimensional, pero considerando la proyección ideal de un rayo de luz a través de un punto infinitesimalmente pequeño que llega al sensor de la cámara sin distorsión. Tomando como base este modelo, en las tesis de [2] y [17] se precisan los parámetros de un modelo físico considerando la distorsión que introducen las lentes de la óptica y se explican las posibles soluciones para relacionar las coordenadas del mundo con las coordenadas de la imagen

4.3.1. Espacio proyectivo y coordenadas homogéneas

Los modelos considerados para la reconstrucción tridimensional se basan en transformaciones definidas en el espacio proyectivo. Este espacio extiende matemáticamente el espacio afín para poder incluir elementos en el infinito. En él, las líneas paralelas pueden intersectarse en un punto llamado *punto del infinito*. Este hecho marca una diferencia fundamental con el espacio afín donde se preserva el paralelismo.

Las **coordenadas homogéneas** son la forma de representar el espacio proyectivo, de tal forma que un punto en coordenadas cartesianas (X, Y, Z) puede representarse en el espacio proyectivo a través de coordenadas homogéneas como (wx, wy, wz, w) . Así, es posible cambiar entre espacios haciendo:

- $(X, Y, Z) \rightarrow (X, Y, Z, 1)$ como el paso de cartesianas a homogéneas
- $(x', y', z', w) \rightarrow (x'/w, y'/w, z'/w)$ como el paso de homogéneas a cartesianas

La cuarta componente w en las coordenadas homogéneas tiene una especial relevancia pues representa la coordenada proyectiva del punto, permitiendo así representar la profundidad.

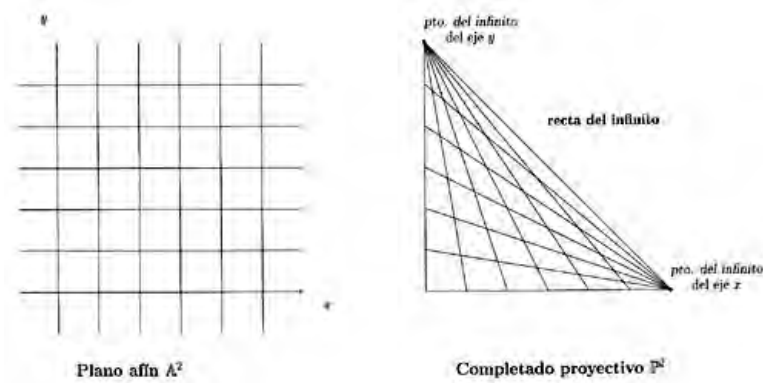


Figura 4.19 Espacio afín y espacio proyectivo. Fuente: <http://blogs.mat.ucm.es/>

Finalmente, si w es distinto de cero, representa un punto en el espacio. En caso contrario, sería un punto en el infinito.

4.3.2. Parámetros del modelo pin-hole

Tomando como referencia la figura 4.14, se definen:

- X_c, Y_c, Z_c como el sistema de coordenadas de la cámara
- C_x, C_y como el centro de la imagen por el que pasa el centro óptico, el cual se encuentra alineado con el sistema de coordenadas de la cámara.
- f como la distancia focal
- x_f, y_f como el sistema de coordenadas de la imagen, situado en la esquina superior izquierda.
- x_u, y_u como las coordenadas del punto proyectado en el plano de la imagen.
- $P(X_c, Y_c, Z_c)$ como el punto que se proyecta desde el sistema de coordenadas del mundo
- X_w, Y_w, Z_w no aparece en la imagen, pero se define como el sistema de coordenadas del mundo que no necesariamente tiene por qué estar alineado con el eje óptico. Es decir, puede encontrarse en cualquier parte del espacio.

A partir de los anteriores atributos del modelo *pin-hole*, se pueden definir dos tipos de parámetros que definen el proceso de transformación de la imagen [17]:

1. **Parámetros intrínsecos:** son los propios del conjunto cámara y óptica y representan el comportamiento en conjunto de ambas al capturar una imagen. Siguiendo la notación anterior, según [17], la proyección a través del punto infinitesimal por

el que pasa el rayo de luz se puede expresar por semejanza de triángulos según la ecuación 4.14

$$\frac{x_u}{X_c} = \frac{y_u}{Y_c} = \frac{f}{Z_c} \quad (4.14)$$

Que matricialmente puede escribirse en coordenadas homogéneas según la ecuación 4.15

$$\begin{bmatrix} nx_u \\ ny_u \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Además de la distancia focal, hay otros parámetros de interés como las coordenadas del punto en el sistema de de referencia de la imagen x_f, y_f . Tomando en consideración los valores C_x, C_y y asumiendo que se trata de imágenes sin distorsión, estas coordenadas se pueden calcular según la ecuación 4.16

$$\begin{aligned} x_f &= k_x x_n + C_x \\ y_f &= k_y y_n + C_y \end{aligned} \quad (4.16)$$

Donde k_x y k_y es un factor de escala para convertir las coordenadas de pixeles a milímetros.

- Parámetros extrínsecos:** definen la manera de relacionar el sistema de coordenadas de la cámara con el sistema de coordenadas del mundo. En esencia, consiste en calcular tres rotaciones y tres traslaciones necesarias para poder relacionar ambos sistemas. Matricialmente puede expresarse según la ecuación 4.17

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Combinando las ecuaciones 4.15, 4.16 y 4.17 se obtiene una relación entre el sistema de coordenadas de la imagen, x_f, y_f y el sistema de coordenadas del mundo X_w, Y_w, Z_w según la ecuación 4.18

$$\begin{bmatrix} nx_f \\ ny_f \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & f_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Donde $M^{4 \times 3}$ representa la matriz de proyección que relaciona ambos sistemas de coordenadas

4.3.3. Modelo físico con distorsión: reconstrucción mediante polinomios.

Como cabe esperar, un modelo que no considere la distorsión no podrá ofrecer la misma precisión en las medidas que un modelo que sí lo haga. En [2] se puede encontrar un modelo físico que tiene en cuenta la distorsión según la figura 4.20

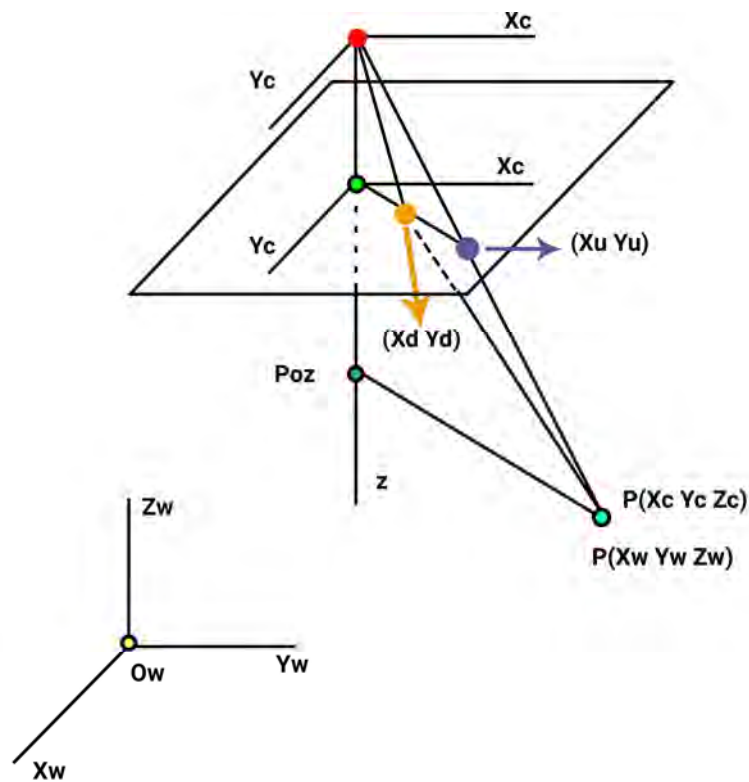


Figura 4.20 Modelo físico de un sistema *pin-hole* considerando la distorsión. Fuente: [2]

En esta ocasión, el rayo de luz que pasa por el punto infinitesimal mencionado en el modelo *pin-hole* no llega perfectamente recto con coordenadas x_u, y_u de la imagen, sino que sufre una distorsión dando lugar al punto de coordenadas distorsionadas x_d, y_d . De este modelo se pueden extraer la relación entre los sistemas de la cámara y el mundo 4.19 y las ecuaciones de proyección ?? y distorsión 4.21

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} X_u &= f \frac{X_c}{Z_c} \\ Y_u &= f \frac{Y_c}{Z_c} \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} x_u &= x_d(1 + K_1 r^2) \\ y_u &= y_d(1 + K_1 r^2) \\ r &= \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Si se define el sistema de coordenadas del mundo de forma que se establezca la restricción de $Z_w = 0$, teniendo en cuenta la figura 4.20, las ecuaciones de proyección y distorsión y la relación entre los sistemas del mundo y de la cámara, se obtienen las ecuaciones 4.22, 4.23 y 4.24

$$Z_c = \frac{T_{z_w}}{r_{13} \frac{X_u}{f} + r_{23} \frac{Y_u}{f} + r_{33}} \quad (4.22)$$

$$Y_c = \frac{T_{z_w} \cdot Y_u}{r_{13} X_u + r_{23} Y_u + r_{33} f} \quad (4.23)$$

$$X_c = \frac{T_{z_w} \cdot X_u}{r_{13} X_u + r_{23} Y_u + r_{33} f} \quad (4.24)$$

Donde T_{z_w} define una traslación en el eje Z del sistema del mundo, r_{ij} es el componente i,j de la matriz de rotación R , f es la distancia focal y X_u, Y_u son las coordenadas del punto sin distorsionar en el plano imagen.

Si se introducen estas ecuaciones en 4.19, se obtienen la función de transferencia que relaciona las coordenadas del mundo X_w, Y_w en el plano láser con las coordenadas de los puntos X_u, Y_u en el plano imagen sin considerar la distorsión. Esta relación puede expresarse según las ecuaciones 4.25 y 4.26

$$X_w = \frac{K_1 X_u + K_2 Y_u + K_3}{K_4 X_u + K_5 Y_u + K_6} + A \quad (4.25)$$

$$Y_w = \frac{K_7 X_u + K_8 Y_u + K_9}{K_4 X_u + K_5 Y_u + K_6} + B \quad (4.26)$$

Donde $A = T_{x_w}$, $B = T_{y_w}$.

Introduciendo los valores de las coordenadas sin distorsión X_u, Y_u en función de las coordenadas distorsionadas X_d, Y_d , se obtiene la función de transferencia que relaciona las coordenadas del mundo X_w, Y_w en el plano láser en función de las coordenadas distorsionadas X_d, Y_d en el plano imagen según las ecuaciones 4.27 y 4.28³

³Para mayor detalle acudir a la tesis desarrollada por [2]

$$X_w = \frac{P_1(X_d, Y_d)}{P_2(X_d, Y_d)} + A \quad (4.27)$$

$$Y_w = \frac{P_3(X_d, Y_d)}{P_4(X_d, Y_d)} + B \quad (4.28)$$

Donde X_d, Y_d son polinomios de orden tres.

Se trata entonces de un problema no lineal basado en el ajuste de los coeficientes de los polinomios. Para ello, se utiliza un grupo de puntos cuyas coordenadas son conocidas, tanto en el sistema de coordenadas del mundo como en el sistema de coordenadas de la imagen, utilizando técnicas clásicas de interpolación. Se pueden definir dos funciones de transferencia que modelen el sistema según 4.29

$$\begin{aligned} X_w(x, y) &= a_{p-1, q-1} x^{p-1} y^{q-1} + \dots + a_{j,k} x^j y^k + \dots + a_{11} xy + a_{10} x + a_{01} y + a_{00} \\ Y_w(x, y) &= b_{p-1, q-1} x^{p-1} y^{q-1} + \dots + b_{j,k} x^j y^k + \dots + b_{11} xy + b_{10} x + b_{01} y + b_{00} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Entonces, para cada punto de calibración, se obtendrá un sistema de ecuaciones para hallar X_{Wn}, Y_{Wn} donde n representa el número del punto de calibración utilizado en el momento del cálculo. Este sistema tiene rxs a_{ij} incógnitas y N ecuaciones, donde r y s dependen del grado del polinomio elegido.

Para compensar los errores en la calibración, es aconsejable que el número de ecuaciones N (puntos de calibración) sea mayor al número de incógnitas a_{ij} , estableciendo así un sistema sobredeterminado. Se trata entonces de resolver el sistema $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$ de la ecuación 4.30

$$\begin{bmatrix} x_1^{r-1} y_1^{s-1} & \cdots & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^{r-1} y_2^{s-1} & \cdots & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^{r-1} y_N^{s-1} & \cdots & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m-1, n-1} \\ \vdots \\ a_{10} \\ a_{01} \\ a_{00} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xw_1 \\ Xw_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ Xw_N \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Siendo A una matriz de dimensiones $m \times n$ ($m = rxs$, $n = N$) y x, b dos vectores de dimension n .

Al tratarse de un sistema sobredeterminado, no tiene solución exacta y, por tanto, se vuelve un sistema incompatible. La mejor manera de hallar una solución al problema es tratando de minimizar $\|Ax - b\|_2$ o bien $\|x\|_2$ utilizando mínimos cuadrados.

La solución directa de dicho problema de mínimos cuadrados se expresa según la ecuación 4.31

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4.31)$$

4.3.4. Homografía

La homografía es una transformación proyectiva cuya forma se expresa según 5.35

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Su función es relacionar las coordenadas homogéneas de un punto (x',y') en un plano π' , con las coordenadas (x,y) de dicho punto en el plano π según la ecuación 4.33

$$w \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

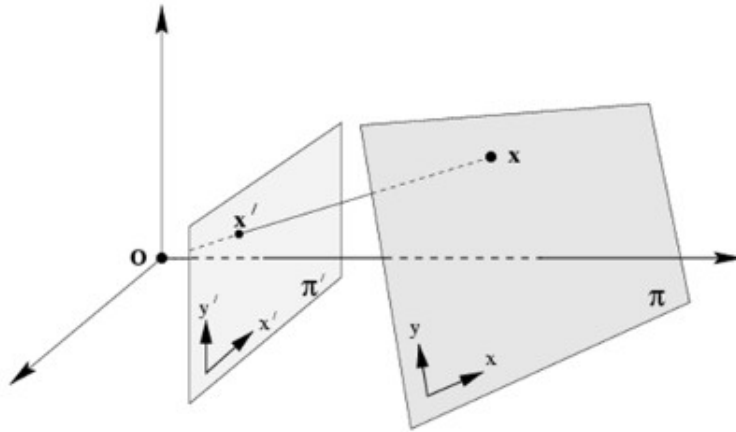


Figura 4.21 Ejemplo gráfico de homografía. Fuente: www.opencv.org

Como se puede observar, la matriz de homografía es de dimensiones 3x3 y, aunque cabría esperar que en ese caso tuviese nueve grados de libertad, típicamente h_{33} representa un factor de escala ya que, si H es una matriz de homografía válida, λH también es una matriz válida, $\forall \lambda \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$, permitiendo fijar h_{33} como factor de escala y dando así lugar a una matriz de ocho grados de libertad.

Que la matriz de homografía tenga ocho grados de libertad implica que se necesitan al menos ocho ecuaciones para resolver el sistema de la ecuación 4.33. Si expresamos de forma lineal dicha ecuación, obtenemos la expresión 4.34

$$\begin{aligned} x' &= \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \\ y' &= \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Esto es interesante porque indica que cada punto correspondiente $(x,y) \leftrightarrow (x',y')$ genera dos ecuaciones, por lo que entonces sólo se necesitan cuatro puntos para resolver

el sistema.

Desde el punto de vista de un sistema de visión tridimensional, la homografía es un concepto fundamental pues lo que se pretende a fin de cuentas es relacionar la proyección del láser con lo que *ve* la cámara. Es decir, relacionar un punto del plano láser con su proyección en el plano imagen. Tomando en cuenta lo explicado hasta ahora, se puede extraer la conclusión de que se necesitan al menos cuatro puntos de calibración para poder relacionar ambos sistemas.

La forma de hallar los valores de los coeficientes de la matriz H , viene dada por la solución del sistema $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$ explicada en 4.3.3. Si se reorganiza el vector x para contener los elementos de H , obtenemos el vector de incógnitas 4.35

$$x = [h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33}]^T \quad (4.35)$$

Finalmente, sería necesario hallar la solución del sistema según la ecuación 4.31. Una vez se tienen X_w, Y_w, Z_w proyectados en el plano láser, su reconstrucción tridimensional vendrá determinada según la ecuación 4.17

4.3.5. Algoritmos de precisión subpixel

La idea fundamental de estos algoritmos es tratar de ofrecer una precisión mayor a un pixel para determinar el pico de intensidad de la línea láser dadas unas coordenadas x, y . En este *TFM* se ha considerado el uso de tres tipos de algoritmos subpixel basándose en la tesis de [18]:

1. **Centro de gravedad:** o método del centroide, el cual calcula el punto medio ponderado de la intensidad de los píxeles según la ecuación 4.36

$$y_s = \frac{\sum_{i=-W/2}^{W/2} \sum_{j=0}^{W/2} (y_c + i) \cdot I(y_c + i, x_c + j\alpha)}{\sum_{i=-W/2}^{W/2} \sum_{j=0}^{W/2} I(y_c + i, x_c + j\alpha)} \quad (4.36)$$

Donde:

- y_s : posición subpíxel calculada en Y
- y_c : coordenada Y central (pixelY en el código)
- x_c : coordenada X central (pixelX en el código)
- W : tamaño de la ventana de análisis
- $I(y, x)$: intensidad en la posición (y, x) de la imagen

- α : dirección de avance (+1 o -1) según la intensidad inicial:

$$\alpha = \begin{cases} +1 & \text{si } I(y_c, x_c) > I_{th} \\ -1 & \text{si } I(y_c, x_c) \leq I_{th} \end{cases} \quad (4.37)$$

- I_{th} : valor umbral para determinar la dirección de avance

2. **Borde suavizado**: trata de reconstruir cómo sería la transición real entre la zona donde no hay iluminación láser y donde sí la hay teniendo en cuenta una transición de intensidad gradual. Es decir, este algoritmo trata de modelar la *sombra* o efecto *Speckle* del láser según la ecuación 4.38

$$x_s = x_p + \frac{(I_{max} + I_{min}) - (I_n + I_{n+1})}{2(I_n - I_{n+1})} \quad (4.38)$$

$$\begin{cases} (I_n > I_{th}) \wedge (I_{n+1} \leq I_{th}) & \text{transición descendente} \\ (I_n \leq I_{th}) \wedge (I_{n+1} > I_{th}) & \text{transición ascendente} \end{cases} \quad (4.39)$$

Donde:

- x_s : posición subpíxel calculada
- x_p : posición del píxel donde $|I_n - I_{th}|$ es mínima
- I_{max} : nivel máximo de intensidad en la imagen
- I_{min} : nivel mínimo de intensidad en la imagen
- I_n : intensidad en el píxel actual n
- I_{n+1} : intensidad en el píxel siguiente $n + 1$
- I_{th} : valor umbral que define la transición del borde

Con el valor de x_p según la ecuación 4.40

$$x_p = x_c - \frac{W}{2} + p \quad (4.40)$$

Donde:

- x_c : coordenada central de la ventana de análisis
- p : offset dentro de la ventana donde se encuentra la transición
- W : tamaño (ancho) de la ventana de análisis

3. **Escalón puro:** al contrario que el borde suavizado, este algoritmo asume que la transición entre bordes es un escalón perfecto. Utiliza las intensidades de los píxeles vecinos para interpolar linealmente la posición subpíxel según la ecuación 4.41

$$x_s = x_p + \frac{I_{n+1} - I_n}{I_{n+1} - I_{n-1}} \quad (4.41)$$

- x_s : posición subpíxel final calculada
- x_p : posición del píxel que minimiza $|I_n - I_{th}|$, calculada como:

$$x_p = x_c - \frac{W}{2} + p_{min} \quad (4.42)$$

- I_n : intensidad del píxel actual (donde la diferencia con el umbral es mínima)
- I_{n+1} : intensidad del píxel siguiente
- I_{n-1} : intensidad del píxel anterior
- p_{min} : offset dentro de la ventana donde:

$$p_{min} = \underset{p}{\operatorname{arg\,min}} |I(y_c, x_c - \frac{W}{2} + p) - I_{th}| \quad (4.43)$$

- I_{th} : valor umbral
- W : tamaño de la ventana de análisis
- x_c : coordenada central de la ventana

El método del centro de gravedad es particularmente útil en la dirección del eje Y ya que la línea láser se distribuye horizontalmente a lo largo de la imagen cayendo entre una o más filas de píxeles, lo que favorece que la distribución de intensidad que recibe el sensor en esa dirección se distribuya naturalmente entre esas filas. De manera resumida, aprovecha el concepto explicado en 4.1.3 de la distribución Gaussiana del láser en la dirección vertical. Por otro lado, los métodos de borde suavizado y de escalón puro se adaptan mejor al comportamiento del láser en la dirección horizontal ya que tratan de buscar dónde comienza y termina la línea láser. Es decir, no buscan el pico exacto de intensidad, sino que buscan el punto donde se produce la transición. Ambos son igualmente válidos, pero cada uno se adapta mejor a diferentes circunstancias y el uso de uno u otro dependerá de, por ejemplo, factores como el tipo de distribución del láser o parámetros de la cámara.

Metodología

En este capítulo se aborda la solución para la reconstrucción tridimensional de objetos de revolución con precisión subpixel. Para ello, se expondrá detalladamente cada uno de los retos acontecidos para lograr el objetivo, tales como; diseño del primer prototipo, elección y justificación de los componentes, diseño de elementos de calibración, enfoque definitivo adoptado, calibración del sistema y programación de algoritmos para sincronización de captura y modelado 3D.

5.1. Elección de los componentes

En el apartado 4.1, se detalló qué aspectos deben considerarse para realizar el diseño de un sistema de visión. En ocasiones, no siempre se podrá disponer de los componentes ideales pues, factores como por ejemplo el presupuesto del proyecto, pueden limitar el alcance del mismo, obligando a la persona encargada a buscar y tener que elegir entre las diferentes opciones para lograr los mejores resultados.

5.1.1. Cámara

Existen multitud de formas de abordar la elección de una cámara. En el capítulo 3 se hizo un repaso a las diversas cámaras comerciales que pueden utilizarse para integrar en un sistema de visión. Cada aplicación requerirá de un tipo diferente de cámara dependiendo de la estrategia o camino por el que se decida ir. Por lo general, una buena práctica a la hora de escoger la cámara es basarse en los conceptos explicados en el apartado 4.1.1.

A nivel industrial, existen marcas bien conocidas tales como COGNEX® que incluyen su propio software, el cual puede resultar bastante útil en multitud de aplicaciones de visión por su facilidad de uso y de integración. En general, las cámaras COGNEX® son un sistema todo en uno con un software robusto y un buen soporte técnico, pero a cambio tienen la desventaja de un precio más elevado que el de sus competidores, una mayor

hermeticidad a nivel software y mayores costos por licencias para usar sus diferentes funciones.



Figura 5.1 Cámara COGNEX®. Fuente: www.cognex.com

Por otro lado, existen otras marcas también muy especializadas en sistemas de visión como BASLER® con una amplia experiencia desde 1988 y un catálogo muy amplio con multitud de configuraciones de lentes, cámaras, iluminación y tarjetas de adquisición. Además, sus cámaras son compatibles con el estándar *GigeVision*®, son de software abierto con un entorno SDK y drivers bien documentados. Por lo general, BASLER® destaca por sus cámaras con una buena calidad de imagen, buena relación calidad precio y la gran variedad de modelos diferentes.



Figura 5.2 Cámara Basler®. Fuente: www.baslerweb.com

Competidor directo de BASLER® es la marca FLIR®. Originalmente conocida como Teledyne® antes de su adquisición por parte de FLIR®. Teledyne® es una marca fundada en 1960 y que cuenta también con mucha experiencia en cámaras especializadas en sistemas de visión. Las cámaras FLIR® se destacan por su buena calidad de imagen, versatilidad, una robusta interfaz SDK, compatibilidad con lenguajes de programación tales como C++®, C#®, Python® y Matlab®¹, multitud de opciones de configuración, compatibilidad con estándares actuales de visión como *GigeVision* y *USB3 Vision* y una excelente relación calidad precio. Además, el fabricante proporciona una documentación

¹Matlab como tal no es un lenguaje de programación ya que principalmente está escrito en C/C++ y se puede considerar mejor como una interfaz de usuario. En este caso se nombra a MatLab para dejar constancia de la versatilidad de este tipo de cámaras

sólida y consistente con diversos ejemplos para poder utilizar sus cámaras con cualquiera de los lenguajes de programación mencionados.

En el caso de este *TFM*, se decidió optar por la opción de adquirir una cámara FLIR-BFS-PGE-16S-M.



Figura 5.3 Cámara FLIR-BFS-PGE-16S-M. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com

Los motivos fueron los siguientes: [3], [11], y [14]

1. **Tipo de sensor:** en el apartado 4.1.1, se llegó a la conclusión de que los sensores tipo CMOS, como el de esta cámara, han evolucionado mucho en los últimos años ganando la carrera a los sensores tipo CCD que se han venido usando hasta el momento.
2. **Formato del sensor:** en este caso, la cámara monta un sensor SONY®IMX273 de 1/2.9". Este sensor es de grado industrial con un formato relativamente compacto y utilizado ampliamente en diversas aplicaciones como sistemas de guiado robótico, metrología o inspección de alta velocidad. Ofrece buen equilibrio entre resolución, velocidad y calidad de imagen, garantizando buena precisión y fiabilidad. Su formato compacto garantiza un menor coste de la cámara donde se integre, aunque en comparación con sensores más grandes requerirá de una mejor iluminación, tiene menor rango dinámico, mayor sensibilidad al ruido y un menor *FOV* para una misma lente.
3. **Tecnología de captura:** el sensor de la cámara es de tipo Global Shutter, por lo que así se garantiza no introducir distorsiones en la imagen.
4. **Eficiencia cuántica:** la eficiencia cuántica del sensor depende de la longitud de onda de la luz incidente y sigue el rendimiento de la figura 5.4, alcanzando el pico a los 525nm con un 63.24%. Es una eficiencia cuántica típica que se sitúa en el rango habitual de entre el 60 y el 75% para los sensores CMOS tipo Global Shutter que, por su arquitectura, tienen a rebajar la eficiencia cuántica. Este dato indica que 63 de cada 100 fotones se convierten en electrones, necesitando así 1.6 fotones para generar un electrón.
5. **Monocromo:** en este caso, al no ser el color un factor relevante, se optó por utilizar un sensor monocromo ya que rebajan el coste de la cámara y además tienen una

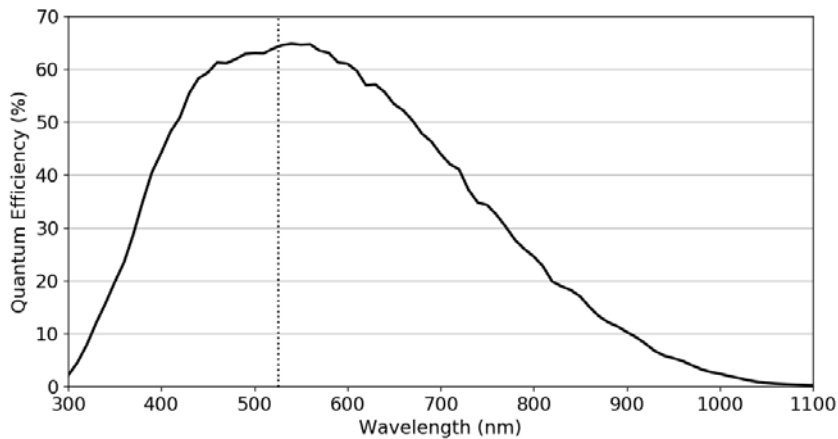


Figura 5.4 Eficiencia cuántica de la cámara FLIR-BFS-PGE-16S-M. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com

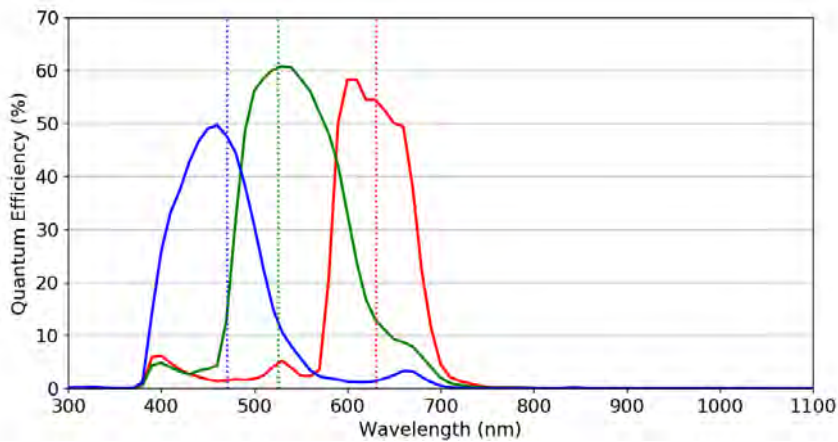


Figura 5.5 Eficiencia cuántica de la cámara FLIR-BFS-PGE-16S-C. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com

mejor eficiencia cuántica que si fuese el mismo sensor en versión a color como se puede ver en la figura

- 6. Resolución:** este sensor cuenta con una resolución nativa de 1440x1080 píxeles, lo que resulta en 1.6Mpx. Esta resolución es buena para mediciones a distancias relativamente cortas, ofreciendo la precisión adecuada para detectar detalles y defectos finos con *FOV* reducidos. Teniendo en cuenta que el tamaño del sensor es 1/2.9", es una buena optimización entre resolución, tamaño, sensibilidad y velocidad.
- 7. Tamaño del pixel:** con $3.45\mu\text{m}$ por pixel, ofrece una buena calidad de imagen, un buen balance entre resolución y sensibilidad y es menos susceptible a difracción que píxeles más pequeños, siendo adecuado para la mayoría de lentes estándar. A pesar de esto y como se mencionó en 4.1.1, un menor tamaño de pixel influye es una menor sensibilidad a la luz (reflejado en la eficiencia cuántica además), un rango dinámico

más limitado y la necesidad de tener un entorno iluminado mejor controlado para obtener los mismos resultados.

8. **Capacidad de llenado:** con un valor de 10499 electrones, se trata de una capacidad de llenado adecuada para la mayoría de aplicaciones de visión, buena para aplicaciones donde se requiera velocidad y suficiente para mediciones precisas donde se controle la iluminación, pero con la limitación del rango de intensidades capaz de capturar.
9. **Rango dinámico:** con 71.20dB, se sitúa en mitad de los valores que se comentó en el apartado 4.1.1, siendo un rango moderado-bueno. Esto implica que la cámara es capaz de captar la mayoría de los detalles tanto en áreas brillantes como oscuras.
10. **Relación señal ruido *SNR*:** con 40.21dB, es un valor algo limitado debido al formato del sensor, pero adecuado para aplicaciones de visión por computador si se tiene la iluminación adecuada. Para este caso, este valor indica que la señal es 115.77 mayor que el ruido. Es decir, la señal es dos órdenes de magnitud mayor que el ruido, suficiente para distinguir señal útil y ruido de fondo.
11. **Profundidad de bits:** siendo posible capturar a 8, 10 o 12 bits, esta cámara es capaz entonces de representar hasta 4096 valores diferentes de gris en función también del formato del pixel adecuado, siendo posible escoger los formatos *Mono8*, *Mono10p*, *Mono10packed*, *Mono12p*, *Mono12packed* o *Mono16*. Menor profundidad equivaldrá a menor peso de la imagen según la ecuación 4.3 y mayor número de FPS, lo que disminuye el tiempo de escaneado.

Ganancia y rango de ganancia: con $0.17 e^-/ADU$, la cámara necesita menos de un electrón para cambiar una unidad del valor digital. Con 12 bits se tendrían 4096 posibles niveles de gris y cada nivel estaría representado por 0.17 electrones, lo que asegura una alta sensibilidad para detectar variaciones pequeñas en la cantidad de luz que recibe. Este valor va en concordancia con el del rango dinámico, que precisamente describe esta capacidad de detectar detalles en distintos tipos de áreas. Por otro lado, aunque siempre sea recomendable mantener el rango de ganancia lo más bajo posible para evitar ruido en la imagen, esta cámara ofrece la posibilidad de aumentar la señal hasta 48dB. Este amplio rango es útil por ejemplo en situaciones donde se tiene poca iluminación o, en caso de sistemas de visión basados en luz estructurada, donde la potencia del láser pueda no llegar a ser suficiente.

Threshold: con $2.89 e^-$, se necesitan entonces casi 3 electrones para generar una señal distinguible del ruido. Sabiendo que cada fotón que interactúa con el sensor sólo puede generar un electrón, este umbral se puede considerar entonces como eficiente. Además, la cámara tiene una relación entre el threshold y el ruido temporal oscuro

de $2.26e^{-}$, valor bastante favorable que indica que la cámara es capaz de distinguir de manera eficaz las señales débiles del ruido de fondo.

FPS: con un valor de entre 78 y 137 *FPS* en caso de compresión sin pérdida, esta cámara asegura poder capturar cada paso del motor a una velocidad suficiente sin tardar demasiado tiempo. Aunque es importante mencionar que la tasa de *FPS* dependerá de factores como por ejemplo la profundidad de bits, el formato del pixel, utilizar o no compresión, el uso de la resolución completa o usar un *ROI* y la velocidad de transferencias de datos.

Tecnología de transferencia de datos: usando cable ethernet, que además permite alimentación *POE*, combinado con el estándar *GigeVision*, la cámara permite velocidades de hasta 1Gbit/s.

Número de entrada y salidas: cuenta con una entradas y una salidas optoacopladas para prevenir ruido en la señal, así como una entrada y una salida sin optoacoplar. Como se verá más adelante, esta característica es recomendable en una cámara pues permite sincronizar de manera precisa el movimiento de la pieza con la captura de la imagen.


Diagram	Color	Pin	Line	Function	Description
	Green	1	3	V_{AUX}	Auxiliary Input Voltage (DC)
				GPI	Non-isolated Input
	Black	2	0	OPTOIN	Opto-isolated Input
	Red	3	2	VOUT	Camera Power Output
				GPIO	Non-isolated Input/Output
	White	4	1	OPTOOUT	Opto-isolated Output
	Blue	5	N/A	Opto GND	Opto-isolated Ground
Brown	6	N/A	GND	Camera Power Ground	

Figura 5.6 Entradas y salidas de la cámara FLIR-BFS-PGE-16S-C. Fuente: www.teledynevisionsolutions.com

Aunque en el caso de un sistema cámara láser esta cámara pueda tener algunos parámetros en contra, como una capacidad de llenado moderada que puede saturar antes de tiempo, o un rango dinámico moderado, las configuraciones que ofrece la propia cámara, como tiempos de exposición cortos, buena tasa de *FPS*, amplio rango de ganancia y sumado a la posibilidad de utilizar *ROI* o el modo multi-frame, desembocan en la compensación de esas desventajas pues, además, su contenido precio, buena calidad general, facilidad de integración y versatilidad fueron factores fundamentales para la elección de esta cámara frente al resto de posibilidades del mercado actual.

5.1.2. Láser

En el apartado 4.1.3 se especificaron algunos parámetros importantes a la hora de escoger un tipo de láser. Para el caso de este *TFM*, se han tenido en cuenta:

1. **Longitud de onda:** depende directamente de parámetros como el tipo de material a escanear, velocidad de escaneo y eficiencia del sensor, siendo necesario encontrar el balance entre todos ellos. En el caso del material, se asume que puede ser de cualquier tipo menos materiales que difracten o no reflejen bien la luz incidente como es el caso del cristal. La velocidad de escaneo depende directamente de parámetros como los FPS de la propia cámara y, al no tratarse de una velocidad excesivamente elevada como puede ser el caso de la inspección de productos que se sitúan en una cinta transportadora a gran velocidad, es posible utilizar longitudes de onda más cortas. En el caso del láser escogido, se tomó la decisión de utilizar una longitud de onda de 450nm debido a estos dos factores y a que la eficiencia cuántica del sensor con este valor sigue estando igualmente cerca del pico de la curva de la figura 5.4
2. **Perfil del láser:** como se explicó anteriormente, es deseable que el perfil del láser siga una distribución uniforme en toda la extensión de su línea. Atendiendo a la hoja de características E.3, se puede ver que el láser escogido sigue este tipo de distribución.
3. **Ángulo de apertura:** con un valor de 75° , es posible acercar bastante el láser para aprovechar su potencia sin desaprovechar su área de influencia.
4. **Potencia:** para poder trabajar en cualquier tipo de condiciones de iluminación se escogió un láser de 50mW.
5. **Ancho de línea:** aunque depende de la distancia de trabajo, el sistema se diseñó para permitir la menor distancia de trabajo y así tener el menor ancho de línea posible. En el caso del laser escogido, el fabricante indica una anchura $1/e^2$ de 260 μm a 320mm con una tolerancia de $\pm 50\text{mm}$.
6. **Tipo de láser:** en este caso el láser es de clase IIIB. Este tipo de láser es seguro mientras no se tenga visión directa del haz, aunque la reflexión se considera segura siendo recomendable el uso de gafas protectoras como única medida de seguridad.
7. **Dimensiones y peso:** en el caso del láser escogido, es de forma cilíndrica y reducido peso.

La elección de un láser de calidad puede suponer una diferencia importante en términos de tiempo y precisión.

Comparación perfiles láser

Para verificar y poder comparar el comportamiento del láser escogido frente a un láser con mayor longitud de onda y, en términos generales, de peor calidad, se realizó una prueba para comparar los perfiles de intensidad de ambos láseres bajo las mismas condiciones. Para ello, se diseñó la pieza de la figura 5.7, la cual permite ajustar la altura del plano láser de manera que corte exactamente por el eje de giro del conjunto máquina/pieza, como puede verse en las figuras 5.9 y 5.8

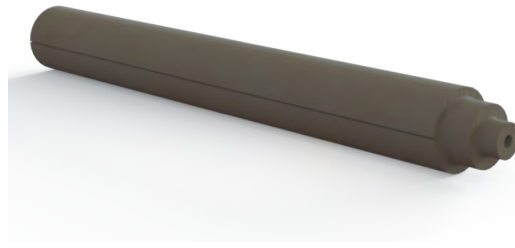
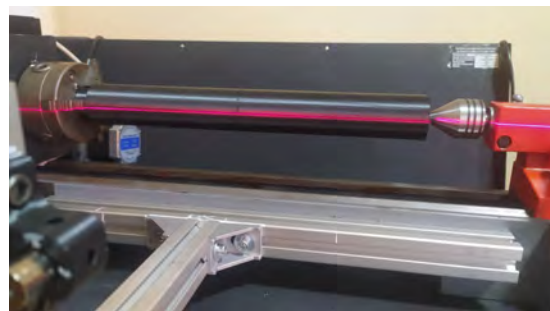
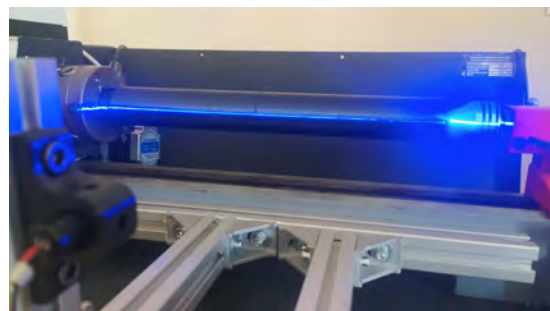
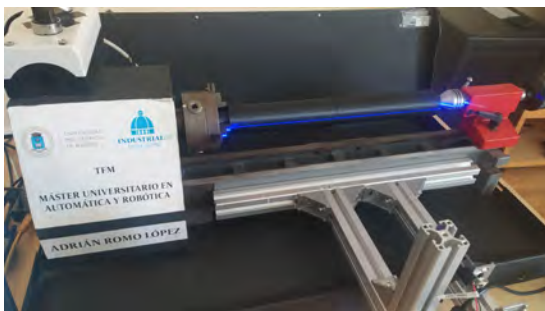


Figura 5.7 Pieza para ajustar la posición del plano láser



(a) Ajuste del plano láser 650nm: vista superior (b) Ajuste del plano láser 650nm: vista desde el alzado

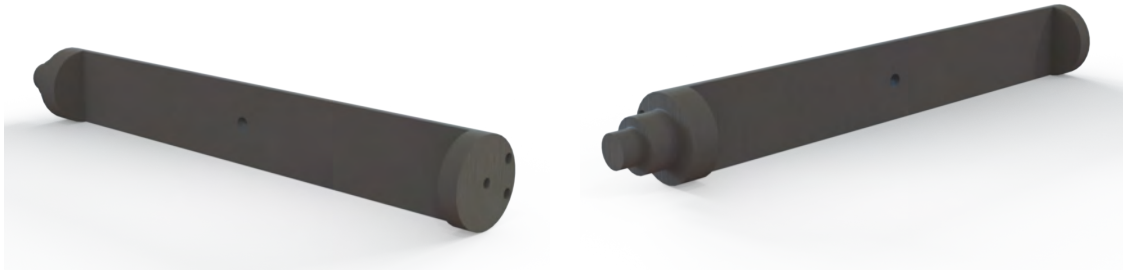
Figura 5.8 Ajuste del plano láser de 650nm



(a) Ajuste del plano láser 450nm: vista superior (b) Ajuste del plano láser 450nm: vista desde el alzado

Figura 5.9 Ajuste del plano láser de 450nm

Además de la pieza anterior, se diseñó la pieza de la figura 5.10 con un corte exacto en el eje de forma que se crease una cara plana y así poder comprobar el perfil de intensidad de la línea láser en toda su extensión. Además, se añadió un perforado en el centro para evaluar el comportamiento de ambos láseres cuando hay pérdida abrupta de luminosidad.



(a) Pieza para comparar perfiles de intensidad de los láseres: vista 1 (b) Pieza para comparar perfiles de intensidad de los láseres: vista 2

Figura 5.10 Pieza para la comparativa de ambos perfiles de intensidad

Una vez se tiene el plano láser ajustado correctamente, se toma captura de la pieza de la figura 5.10 con ambos láseres teniendo en cuenta los siguientes parámetros de captura:

1. **Tiempo de exposición** = 15000 μ s
2. **Ganancia** = 17,9dB
3. **Gamma** = 0.8
4. **Profundidad de bit** = 8 bits
5. **Formato de pixel** = Mono8
6. **Distancia del láser al eje de la pieza** = 270mm

El resultado se muestra en las figuras 5.11 y 5.12. Estas capturas son de imágenes a las que se les ha corregido la distorsión.

Hay dos formas exhaustivas de comparar ambos láseres: de manera cuantitativa mediante los valores numéricos obtenidos del análisis de intensidad, y cualitativamente, a través de la inspección visual de las figuras resultantes.

Para el análisis cuantitativo se tuvo en cuenta la gran diferencia de potencia entre ambos láseres, donde el láser rojo es de 5mW y el láser de 50mW según la hoja de características E.3. Es por ello que se normalizaron los valores de intensidad según la ecuación 5.1

$$I_{normalizada} = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (5.1)$$

Donde:

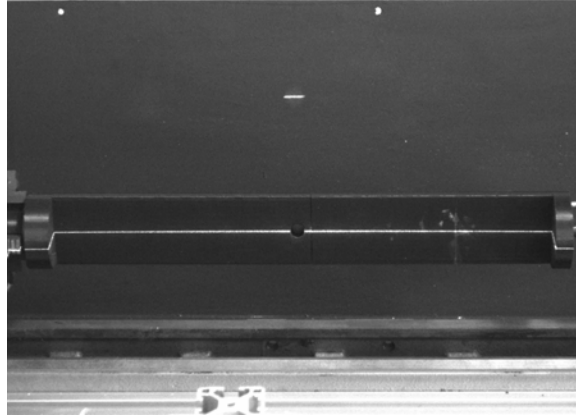


Figura 5.11 Vista de la línea del Láser con longitud de onda = 650nm

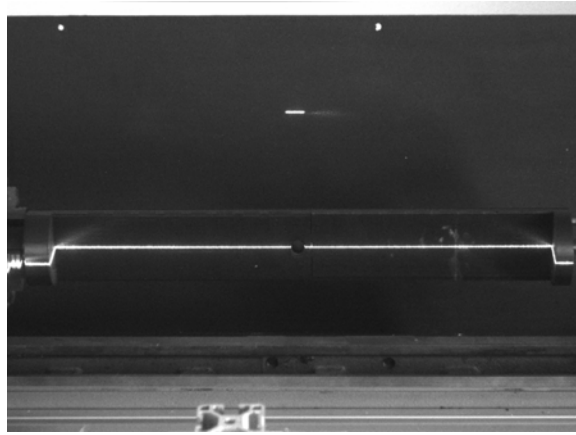


Figura 5.12 Vista de la línea del Láser escogido EL450-100G24LP

- I es la intensidad original
- I_{min} es la intensidad mínima
- I_{max} es la intensidad máxima
- $I_{normalizada}$ tendrá valores entre 0 y 1

Teniendo los valores normalizados, se pueden utilizar dos métricas para poder comparar los resultados:

1. **FWHM (Full Width at Half Maximum)**: o anchura a media altura. Con esta métrica se puede medir el ancho de ambos perfiles de intensidad a la mitad de su valor máximo, es decir, la distancia entre los puntos donde la intensidad alcanza el 50% de su valor pico según la ecuación 5.2

$$FWHM = x_2 - x_1 \quad (5.2)$$

Donde:

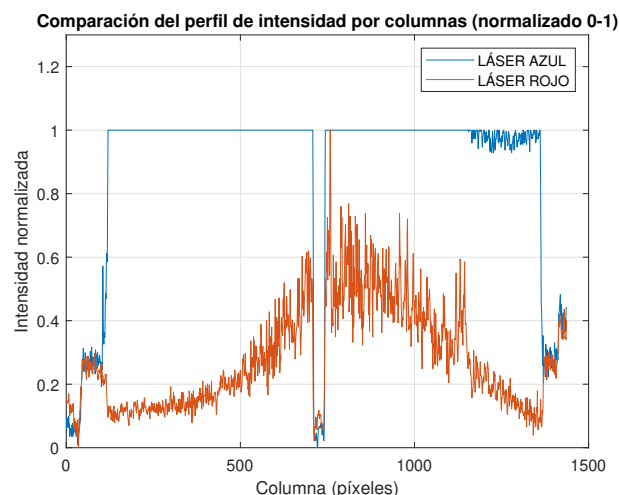


Figura 5.14 Comparación de los perfiles de intensidad de ambos láseres en toda la extensión de sus líneas

La figura 5.16 da una idea bastante clara del perfil de intensidad de ambos láseres. Si se observa el láser azul, prácticamente mantiene la misma intensidad en toda la extensión de su línea, a excepción del punto central donde cae bruscamente, como cabría esperar, y al final antes de volver a caer, donde se produce cierto ruido por un posible efecto de alineamiento de la pieza que desemboca en una pequeña diferencia entre valores de intensidad altos y bajos cercanos al 1 (o 255). Este efecto no deseado de falta de alineamiento se toma como despreciable para el caso de esta prueba dada su pequeña magnitud, pero fue necesario corregirlo para la reconstrucción tridimensional. Finalmente, en los extremos se da una situación particularmente interesante, ya que ambos láseres parecen comportarse de manera bastante similar. Este patrón similar parece indicar que los extremos no reflejan las características de ambos láseres, sino que se trata más bien de un efecto causado por agentes externos como la propia captura o la geometría de la pieza que produce esos saltos. Se entiende que la propia reflexión de la luz en los bordes de la pieza, la superficie donde se proyecta el láser o efectos propios de la perspectiva, sumado a que se trata de secciones cortas, da lugar a no arrojar un dato que refleje la realidad del análisis que se trata de ofrecer. Se considera por tanto que la distribución de intensidad de ambos láseres puede tomarse como verdadera en aquellas columnas que discriminen los extremos.

Por otro lado, en el caso del láser rojo, resulta llamativo la forma de su perfil de intensidad, ya que parece describir una distribución de tipo Gaussiana como la de la figura 4.11. La caída de intensidad cerca del mayor pico de la campana también revela que la fila escogida coincide, o al menos está bastante cerca, del centro de la figura y que además el láser está correctamente alineado.

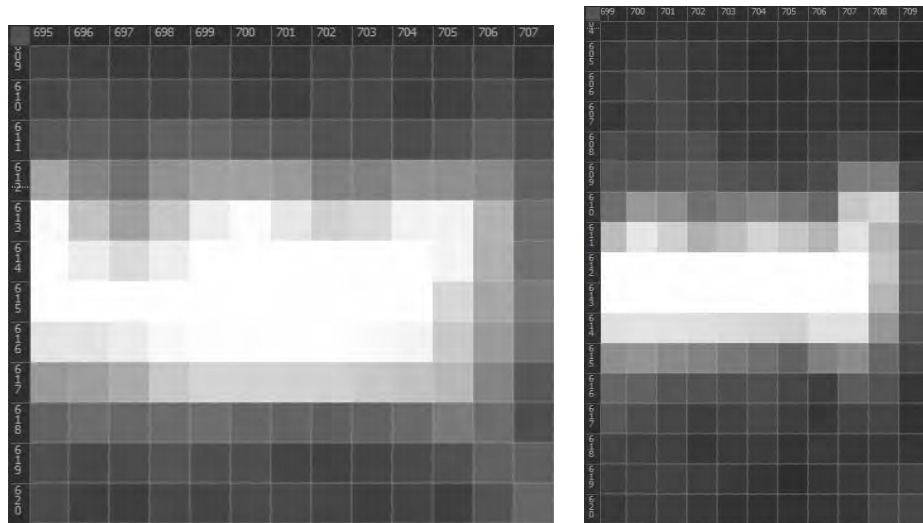
Si utilizamos las métricas de las ecuaciones 5.2 y 5.3, se obtienen los siguientes resultados:

- Ancho FWHM láser azul: 1258 píxeles

- Ancho FWHM láser rojo: 518 píxeles
- Área láser azul normalizada: 1258.04
- Área láser rojo: 399.71

Estos datos confirman lo analizado de manera cualitativa: con un total de 1437 píxeles (columnas), el láser azul es capaz de mantener la intensidad de su línea por encima del 50 % de su máximo a lo largo de 1258 píxeles, mientras que el rojo lo consigue con 518 píxeles. Observando los valores de las áreas, existe concordancia con los valores *FWHM*. Con un valor de 1258.04 unidades, el láser azul es capaz de distribuir su energía de manera más eficiente al contrario que el láser rojo. Esta concordancia entre ambas métricas es un claro resultado del perfil rectangular del láser azul, el cual coincide con lo especificado con el fabricante en la hoja de características E.3

Una situación parecida pero no igual se da en el caso de realizar el mismo análisis de intensidad pero esta vez por filas, es decir, de manera transversal. Para esta ocasión, se escoge una columna y se realiza el análisis de manera local ² entre una fila de inicio y de fin cercana a la línea láser como se puede ver en la figura 5.15.



(a) Vista de detalle del perfil de intensidad del láser de 650nm cerca de su centro
 (b) Vista de detalle del perfil de intensidad del láser de 450nm cerca de su centro

Figura 5.15

El resultado se observa en la figura 5.16

Como era de esperar, la distribución de intensidad de manera transversal sigue un perfil más Gaussiano para ambos láseres. En este caso, ante tal efecto esperado, el cual se explicó en el apartado 4.1.3, sólo queda tratar de minimizar el ancho de la campana,

²Con el fin de ver únicamente el comportamiento de ambos láseres y evitar el resto de valores de intensidad de la imagen

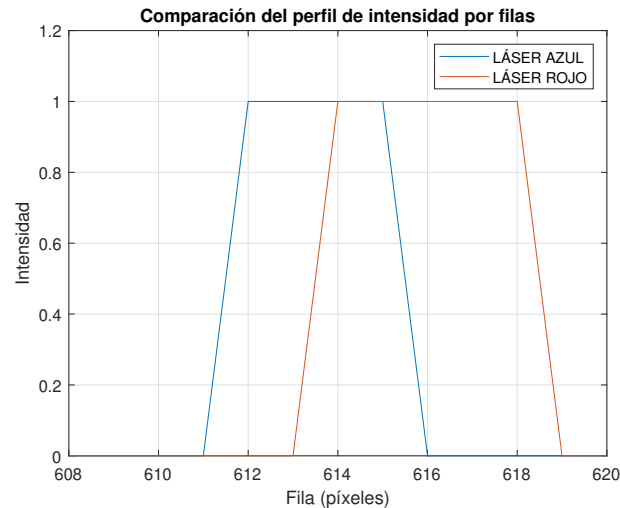


Figura 5.16 Comparación de los perfiles de intensidad de manera transversal

de tal forma que el efecto *Speckle* se reduzca a su mínimo posible. Si se observan las figuras 5.15(a) y 5.15(b), se puede comprobar a simple vista que el láser rojo tiene un peor comportamiento en este sentido, hecho que se refleja además en la figura 5.16 ya que se aprecia cómo la campana del láser rojo es más ancha que la del láser azul. En términos cuantitativos se obtienen los siguientes resultados:

- Ancho FWHM láser azul: 3 píxeles
- Ancho FWHM láser rojo: 4 píxeles
- Área láser azul normalizada: 4.00
- Área láser rojo: 5.00

La diferencia del valor *FWHM*, aunque pequeña en términos absolutos, realmente es significativa ya que representa un 25 % más de dispersión en el láser rojo. Esto ayuda a entender que el láser azul tiene una mejor calidad de fabricación debido a una mejor colimación. Por otro lado, si se observa el valor de las áreas, se vuelve a encontrar una concordancia con el valor *FWHM*, con una diferencia también de un 25 %. Esto confirma que el láser rojo distribuye su energía en la dirección vertical de manera más amplia.

Un punto importante que merece ser detallado es cómo afecta cada uno de los láseres a la precisión y, más en concreto, a la precisión subpixel. Aunque pueda llegar a parecer contraintuitivo, un láser cuya distribución de intensidad transversal tienda a ser más abrupta, puede llegar a tener resultados negativos en términos de precisión. Esto se debe a que las transiciones abruptas ofrecen una menor cantidad de información para que los algoritmos subpixel encuentren el pico exacto de intensidad. Por el contrario, un láser con una distribución Gaussiana tendrá transiciones más suaves que facilitarán la interpolación. Sin embargo, como se ha podido observar, el láser rojo de la prueba no es un tipo de láser

aconsejable para aplicaciones de visión por su alta dispersión ($FWHM$ de 4 píxeles vs 3 del azul). Tanta dispersión en una región tan amplia se traducirá probablemente en ruido en cada cálculo de los algoritmos subpixel. Por otro lado, no todo se debe dejar a voluntad del equipo empleado, sino que también es buen criterio saber qué tipo de algoritmo subpixel utilizar. Si se conoce que el láser empleado tiende a una distribución de intensidad como la estudiada en este TFM , existen algoritmos como el *escalón puro* que se adaptan mejor a estas situaciones.

Finalmente, analizado los resultados obtenidos en la prueba y las diferentes conclusiones, se puede determinar que el láser azul otorgará, en líneas generales, un mejor rendimiento y un importante apoyo a la hora de programar el sistema de visión, ahorrando tiempo y ayudando en gran medida a obtener unos resultados más precisos siempre que el sistema esté correctamente alineado y se utilicen adecuadamente los algoritmos subpixel una vez se conoce su perfil de intensidad.

Como punto en contra, este láser no es un láser estándar que pueda encontrarse en cualquier parte. Es un láser hecho a medida por un proveedor de fuera de la unión europea, por lo que fue necesario especificar los requisitos exactos que debía tener e importarlo con el coste de tiempo y presupuesto que esto conlleva, coste reflejado en D.

5.1.3. Microcontralor, motor y su driver

El motor es un componente fundamental que juega un papel clave en la resolución del sistema de visión. En muchas aplicaciones se suele utilizar motores con encoders acoplados a un motor, pero para esta ocasión se decidió que era suficiente con el uso de un pequeño motor paso a paso, de tal forma que a cada paso del motor le correspondiese una captura de la pieza. Bajo esta premisa, es lógico pensar que cuanto menor sea el paso del motor, más pasos dará y más capturas se tomarán en una misma vuelta. Dicho de otro modo, un paso pequeño conlleva poder capturar mayor nivel de detalle. Así por ejemplo, para motores con un grado por paso, se tomarían 360 fotos en una vuelta. Entonces, si el motor es capaz de dar 0.9° por paso, se tendrían 400 fotos y así sucesivamente. Con esto en mente, el motor escogido es el de la figura 5.17, cuya hoja de características se encuentra en el Apéndice E.

Se trata de un motor bipolar que cuenta con una precisión de $\pm 5\%$ entre paso y paso, un buen par de retención (1.2Nm) para asegurar la posición de la pieza, la posibilidad de aplicar microstepping y buena robusted térmica y eléctrica. Como puntos en contra, el valor de la inercia $300gcm^2$ limita la dinámica del sistema y, al igual que sucedió con el láser, el hecho de que no fue fácil de encontrar, ya que este motor en concreto fue necesario importarlo desde fuera de la unión europea. En este caso, aunque el conjunto motor y controladora no supuso un coste elevado en el presupuesto como en el caso del láser, sí tuvo un impacto en el tiempo pues fueron varias semanas las que tardó en llegar.



Figura 5.17 Motor Nema23 modelo 23hm22-2804s. Fuente: www.omc-stepperonline.com

Para la controladora, el propio fabricante del motor ofrecía la posibilidad de utilizar el driver de la figura 5.18



Figura 5.18 Driver para el motor Nema23. Fuente: www.omc-stepperonline.com

Este driver ofrece varias posibilidades de configuración, como la alimentación a 5 o 24V, limitación de corriente, control del sentido de giro y, el más interesante para la reconstrucción tridimensional, la oportunidad de realizar microstepping. Esto permite un movimiento más fluido del sistema, reduciendo vibraciones y contrarrestando la inercia del motor. Además, permite realizar pasos más cortos, lo cual es característica interesante porque permite poder capturar un mayor nivel de detalle en cada vuelta.

En el caso del microcontrolador, se optó por utilizar la placa **NodeMCU8266-12E**. Esta placa es compatible con el IDE de *Arduino*® y con micropython, con la diferencia que tiene un coste muy reducido en comparación con otras placas como *Raspberry Pi*® y la gama de placas del propio *Arduino*®. Como características a destacar; cuenta con 11 pines de entrada salida (4 para PWM) y puerto de entrada analógica, frecuencia reloj de 80Mhz con posibilidad de overclocking a 160Mhz, alimentación por USB-C e integra Wi-Fi para uso en todo tipo de aplicaciones.

Los 80Mhz de frecuencia base del NodeMCU proporcionan un margen de seguridad suficiente para asegurar pulsos a 200KHz del driver aún con 25000 pulsos por revolución.



Figura 5.19 Microcontrolador NodeMCU8266-12E

5.2. Primer prototipo del sistema de visión para la reconstrucción de objetos de revolución

Se puede dividir el desarrollo de este *TFM* en dos etapas claramente diferenciadas; la primera, donde se diseñó y construyó un primer prototipo y un elemento de calibración para la realización de pruebas iniciales, y la segunda, donde se tomó un camino diferente que condujo a afrontar otro tipo de reto a través de la restauración íntegra de un torno antiguo, así como el diseño de diferentes elementos de calibración que pudiesen asegurar una reconstrucción tridimensional precisa.

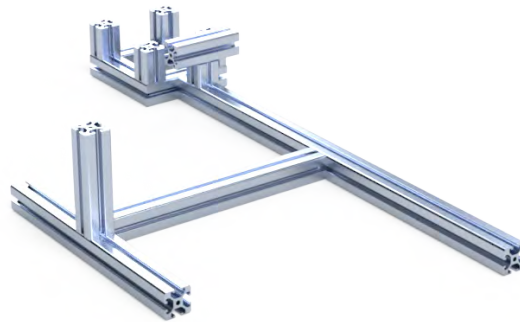
La idea desde un principio estaba clara: diseñar un sistema de visión capaz de reconstruir objetos de revolución. Era necesario entonces fabricar una estructura que permitiese fijar todos los elementos y comenzar a realizar las primeras pruebas.

El chasis de la estructura se diseñó para fabricarse con perfiles de aluminio de 30x30mm fijados con escuadras entre sí (figura 5.20(a)). Para sujetar la cámara, se diseñaron dos piezas que permitiesen regular su ángulo entre 15 y 45 grados (figuras 5.20(b) y 5.20(c)). Este ángulo, conocido generalmente como ángulo de triangulación, no es arbitrario. Al contrario, es necesario por la propia condición de geometría proyectiva del sistema. Un ángulo de triangulación menor a 15° tiene un impacto directo en la precisión del sistema ya que las líneas serían prácticamente paralelas, lo que incumpliría precisamente lo explicado en el apartado 4.3.1. En el caso de ser mayor de 45°, aunque matemáticamente puede ofrecer una mayor precisión teórica, puede implicar problemas de implementaciones prácticas. Por ejemplo, a nivel mecánico sería necesario elevar mucho la cámara para conseguir la misma vista con menor ángulo. Respecto a la imagen, cabe la posibilidad de que aparezcan oclusiones indeseadas. La idea de contar una pieza que permitiese regular de manera sencilla el ángulo de la cámara, dio pie a poder realizar las pruebas necesarias hasta determinar que el ángulo óptimo final para esta aplicación de visión era de 25°.

Respecto al soporte del láser, únicamente tenía que ser capaz de sujetarse al perfil de aluminio y contar con perforados para poder roscar tornillos, asegurando de esta manera que no se pudiese mover (figura 5.20(d))

Para unir el motor con la pieza, se imprimió en 3D una mordaza como las que se utilizan en los tornos convencionales que conectase el eje del motor con el eje de giro de

la pieza (figura 5.20(e))



(a) Chasis del primer prototipo



(b) Pieza 1 del soporte de la cámara



(c) Pieza 2 del soporte de la cámara



(d) Soporte del láser



(e) Mordaza

Figura 5.20 Componentes del primer prototipo del sistema de visión

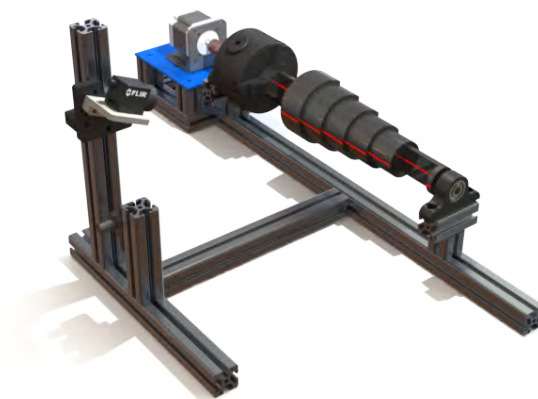
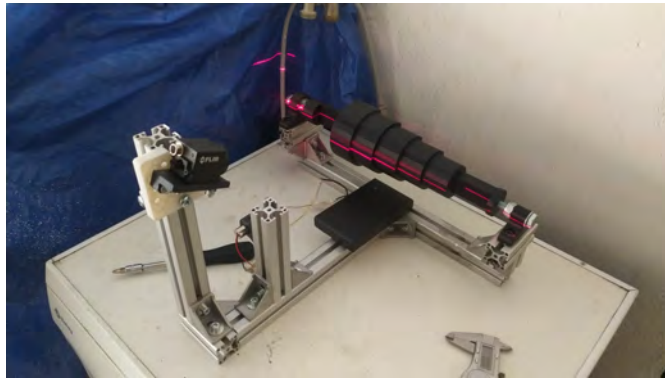
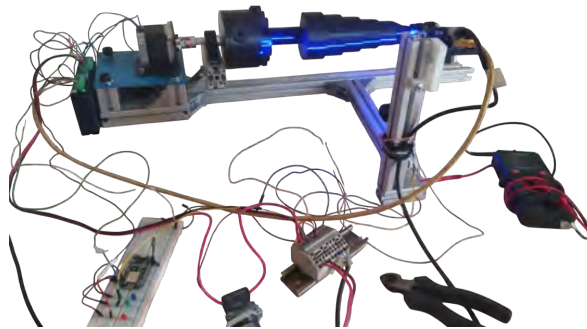


Figura 5.21 Diseño 3D final del primer prototipo

Los resultados tras su fabricación pueden verse en las figuras 5.22(a) y 5.22(b)



(a) Fabricación del primer prototipo



(b) Implementación final del primer prototipo

Figura 5.22 Fabricación e implementación final del primer prototipo del sistema de visión

5.2.1. Óptica escogida para el sistema del primer prototipo

En el apartado anterior donde se eligieron los componentes se detallaron los motivos por los que se escogió la cámara, el láser, el microcontrolador con el motor y su driver, pero notará entonces el lector que falta un componente fundamental: la óptica. Sería poco justo decir que realmente se escogió siguiendo un proceso basado en un aspecto técnico similar al del resto de componentes, pero la realidad es que para este caso se contó con la ayuda del *Centro de Automática y Robótica (CAR)* de la *UPM* que facilitó distintos tipos de ópticas con las que poder realizar las pruebas en este primer prototipo. Habitualmente el proceso sería al revés: dado unos requisitos de un sistema de visión, se podría elegir la lente más adecuada para la cámara escogida.

Para comprobar más allá de la teoría si podrían servir, se realizaron pruebas con cada una de ellas usando el mismo tiempo de exposición³ y, aunque las ópticas prestadas no contaban con mayor información que la grabada en su propia carcasa, los resultados fueron los siguientes

1. Óptica de focal corta *CCTV lens* con 4mm y $f/2.5$

³La diferencia de iluminación se debe a que las pruebas fueron realizadas en diferentes momentos del día



Figura 5.23 Captura con focal 4mm

2. Óptica varifocal $f=3.5-8\text{mm}$ $f/1.4$ y $1/3''$ montaje CS



Figura 5.24 Captura con varifocal

Las imágenes de las dos ópticas con focales más grandes no acompañan a un resultado ideal para esta distancia focal debido a la larga distancia de trabajo necesaria para poder tomar la captura, lo que obligó sujetar manualmente la cámara al no poderse integrar en el diseño del bastidor

3. Óptica con $f = 16\text{mm}$ y diafragma regulable entre $f/1.4$ y $f/16$.
4. Óptica con $f = 25\text{mm}$ $f/1.4$ hasta $f/16$.

Estas imágenes confirman lo explicado en el apartado 4.2.2: las ópticas con distancias focales cortas introducen principalmente una gran distorsión radial. Por otro lado, la óptica varifocal aunque parezca interesante poder regular el valor de su distancia focal, este tipo de lentes tienen la desventaja de que introducen una mayor distorsión que sus

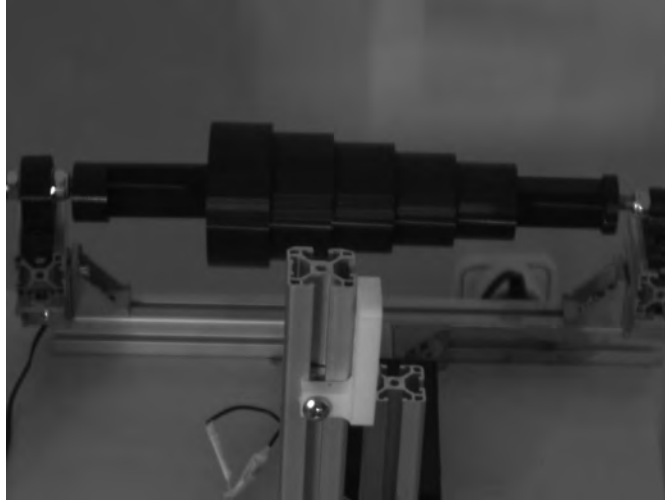


Figura 5.25 Captura con focal 16mm



Figura 5.26 Captura con focal 25mm

rivales con focales fijas. Son bastante útiles cuando se requiere una mayor flexibilidad sacrificando precisión al ser más complicada la calibración de sus parámetros intrínsecos. Las ópticas con distancias focales mayores suelen ofrecer mejor resultado, pero se descartó su uso en ese momento debido a factores que complicaban su implementación en el diseño del primer prototipo.

Se tomó la decisión entonces de utilizar la óptica de 4mm que introducía una distorsión significativa; sin embargo, este efecto pudo compensarse mediante una calibración minuciosa de los parámetros intrínsecos obtenido la imagen corregida de la figura 5.27(b), aunque reduciendo la resolución de 1440x1080px a 708x643.

5.2.2. Primer elemento de calibración

La pieza que se ve en 5.27(b) correspondía al primer elemento para la calibración de los parámetros extrínsecos del sistema siguiendo lo explicado en 4.3.3. Se buscaba tener



(a) Imagen de la cámara con lente 4mm con distorsión



(b) Imagen de la cámara con lente de 4mm y la distorsión corregida

Figura 5.27 Comparación de imágenes del primer prototipo con y sin distorsión

el mayor número de puntos posibles y así establecer una mejor relación entre el plano láser y el plano imagen. Estos puntos debían ser los del inicio y final de cada escalón de la pieza. La figura 5.28 muestra una imagen típica que capturaría la cámara para calibrar el primer prototipo o tratar de reconstruir en 3D, pero con los posibles puntos de calibración acentuados en rojo.

La parte más a la izquierda, donde hay una mayor diferencia de altura entre peldaños, corresponde a una cara plana que pasa justo por el eje de la pieza. Este corte era especialmente útil porque, si el sistema estaba correctamente alineado, daba una referencia directa del eje de giro el cual corresponde al origen de la profundidad. Es decir, estableciendo el origen de coordenadas en un punto visible del eje de giro, se obtenían dos

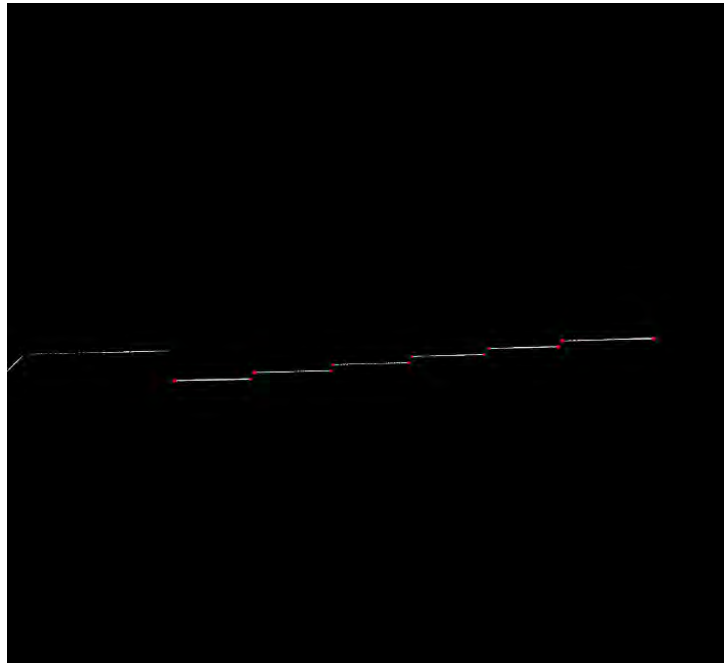


Figura 5.28 Vista de los puntos del primer prototipo

ventajas fundamentales:

1. Se establecía un fuerte anclaje geométrico para la calibración, pues en la propia imagen se vería directamente el eje de giro de la pieza y así no sería necesario establecer el origen de coordenadas en otro punto. En la reconstrucción tridimensional, si todo está correcto, el punto $(0,0,0)$ debería pasar exactamente por el eje de giro.
2. Con esta restricción, es sencillo poder comprobar la precisión del sistema. Por ejemplo, si se tiene una reconstrucción completa de una pieza con varios radios conocidos como la de este elemento de calibración, la medición se puede realizar desde el origen (eje de giro) hasta el punto más alejado del extremo y comparar la medida real con la obtenida buscando simplemente el máximo valor de los vectores X, Y, Z en MatLab®.

5.2.3. Algoritmos subpixel: verificación y robustez ante la influencia del ruido

Una duda interesante que se planteó en el momento que se tuvo este primer prototipo es cómo afectaría el ruido a los algoritmos de precisión subpixel explicados en 4.3.5. En 4.1 se explicó que una imagen puede contener inherentemente varios tipos de ruido que no forman parte de la información útil. Con esta prueba se pretendía averiguar el funcionamiento y la robustez de los algoritmos escogidos ante la presencia de ruido para determinar con mayor precisión las coordenadas del pico de intensidad de la línea láser. Para ello, se capturan 10 imágenes consecutivas como la de la figura 5.27(b) en intervalos

de un segundo entre imagen e imagen. Tomando puntos del elemento de calibración, se obtienen las coordenadas de la tabla 5.1

Tabla 5.1 Coordenadas en píxeles de la imagen 5.27(b)

Punto	Píxel X	Píxel Y
1	137	384
2	234	428
3	311	425
4	311	419
5	387	417
6	388	411
7	459	408
8	461	402
9	531	394
10	597	391

Para cada imagen, definiendo un tamaño de ventana de 3x3, se obtiene la tabla 5.2

Tabla 5.2 Coordenadas originales y resultados de algoritmos subpíxel de la imagen

$X_{original}$	$Y_{original}$	Y_{CDG}	$X_{bordesuavizado}$	$X_{escalonpuro}$
138	385	385.4708	0	NaN
235	429	429.1306	236.1250	238.4795
312	426	427.3456	311.2206	311.8361
312	420	420.7307	311.1818	313.0968
388	418	418.2371	0	388
389	412	412.3161	0	392.1818
460	409	409.3016	0	458.6143
462	403	403.4377	0	464.7143
532	395	395.5274	0	532.4545
598	392	393	595.6641	597.6145

La razón de por qué se le suma un píxel a cada coordenada es por que en la imagen el origen comienza en (0,0) y en MatLab® en (1,1).

De la tabla 5.2 se puede ver que algunos valores dan cero en caso del algoritmo de borde suavizado o valores exactos en caso del borde escalón, lo que indica que el algoritmo en ese punto no es capaz de entregar un resultado.

Para verificar el buen funcionamiento de los algoritmos, se realizó un programa que extrajese los valores de intensidad para cada punto de entrada dadas un tamaño de ventana preestablecida. Por ejemplo, el punto (138,385) corresponde a la imagen 5.29. Este caso es el más extremo ya que a simple vista se puede verificar que en esas coordenadas los algoritmos no pueden funcionar correctamente. Como se explicó en 4.3.5, estos algoritmos buscan o bien una transición suave en el eje X, o por el contrario un salto abrupto. El valor *NaN* indica que en algún punto el algoritmo divide por cero. Esto sólo puede ocurrir

si determina que la intensidad actual es igual que la anterior según la ecuación 4.41. El programa que devuelve los valores de intensidad arroja la tabla 5.3, lo que confirma que no es posible que los algoritmos en el eje X encuentren un resultado viable porque no existe ni transición ni salto. El punto central de la tabla corresponde al pixel con las coordenadas de entrada. Este punto en concreto es la proyección del láser sobre una de las esquinas de la cara plana del eje de giro, así que es esperable que el haz de luz se disperse de esta manera.

Tabla 5.3 Valores de intensidad para el punto (138,385)

242	255	255
255	255	255
255	255	255

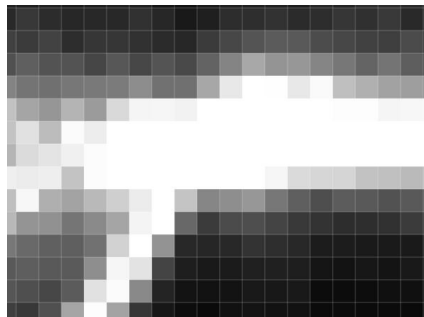


Figura 5.29 Vista de detalle del punto (138,385)

Quitando este punto, que puede considerarse un caso particular, el resto tienen un comportamiento irregular por diferentes motivos. Por ejemplo, el punto (387,427) tiene los valores de intensidad de la tabla 5.4. En este caso, la transición entre los valores es demasiado abrupta como para que el borde suavizado funcione adecuadamente. Esto puede no resultar sorprendente pues es el resultado esperado, pero lo interesante de este punto es el valor entero del escalón puro. En 5.1.2 se mencionó que los algoritmos subpixel necesitan información alrededor del pixel central para poder interpolar adecuadamente. La mejor forma de entenderlo es fijándose en la ecuación 4.41 y en la tabla de intensidades para este punto en concreto. De izquierda a derecha, en la fila central, los valores son (146,30,19), con 30 como valor central. Si I_n (el valor actual): 30, I_{n+1} (el valor siguiente): 19 y I_{n-1} (el valor anterior): 146 y se sustituyen estos valores en la ecuación original se obtiene el resultado de la ecuación 5.4:

$$x_s = 388 + \frac{I_{n+1} - I_n}{I_{n+1} - I_{n-1}} = 388 + \frac{19 - 30}{19 - 146} = 388 + \frac{-11}{-127} = 388 - \frac{11}{127} \approx 388 \quad (5.4)$$

Es decir, el resultado que devuelve el algoritmo del borde escalón es correcto porque justamente la transición es demasiado abrupta. Esto afecta a la interpolación de forma

que el valor resultante se aproxima al valor inicial.

Tabla 5.4 Valores de intensidad para el punto (417,387)

253	38	19
146	30	19
56	24	17

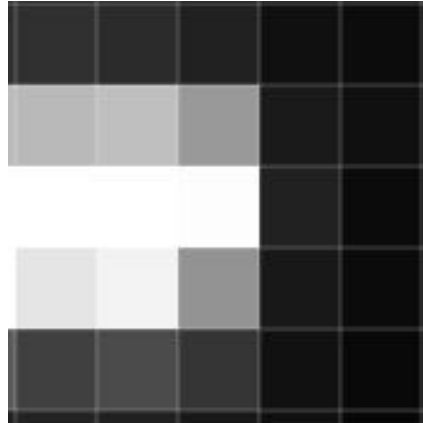


Figura 5.30 Vista de detalle del punto (387,417)

Un punto que podría considerar dentro de un comportamiento esperado sería el punto (312,420). Según la tabla 5.5, su distribución de intensidad alrededor del punto central sigue un patrón más gradual lo que facilita que el borde suavizado y el escalón puro trabajen mejor, aunque con diferencias entre ellos. El borde suavizado mantiene la diferencia con el valor original por debajo de un píxel, mientras que el escalón puro supera este valor. Esto confirma que ambos algoritmos están trabajando adecuadamente ya que además de la tabla de intensidades, a nivel visual en la figura 5.31, se puede ver valores de gris antes de llegar al comienzo de la línea láser. Es interesante también fijarse cómo para este punto el algoritmo del centro de gravedad tiene la mayor diferencia con el valor original debido a que los mayores valores de intensidad se encuentran en las posiciones superiores. Sería como decir que estos valores están *tirando* para que la posición del pico de intensidad se determine más hacia arriba. Y esto es lógico porque, al contrario que la figura 5.30, el ancho de la línea láser aquí ocupa dos píxeles en lugar de uno debido quizás a algún brillo indeseado en ese punto.

Tabla 5.5 Valores de intensidad para el punto (312, 420)

131	255	255
172	255	255
110	165	137

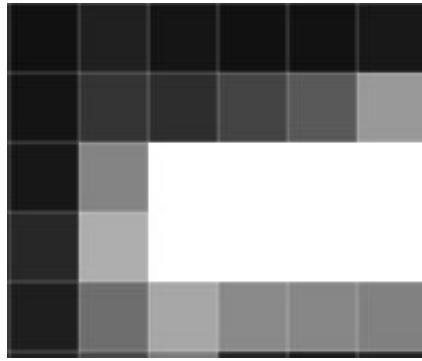


Figura 5.31 Vista de detalle del punto (312,4.20)

Análisis de la influencia del ruido

La tabla 5.1 muestra el resultado de calcular las coordenadas subpixel de todos los puntos de la primera imagen capturada de un total de diez. Por razones prácticas, la tabla 5.6 muestra únicamente los valores resultantes de cada uno de los algoritmos únicamente para el punto (312, 420) en las diez imágenes.

Tabla 5.6 Variación de las mediciones subpíxel para cada una de las diez imágenes del punto (312, 420)

Imagen	Y_CDG	X_suavizado	X_escalon
Imagen 1	420.7307	311.1818	313.0968
Imagen 2	420.7189	311.2034	313.1471
Imagen 3	420.7401	311.2155	313.1250
Imagen 4	420.7270	311.2188	310.3805
Imagen 5	420.7189	311.1917	313.0000
Imagen 6	420.7336	311.2000	309.9444
Imagen 7	420.7327	311.1694	313.0263
Imagen 8	420.7276	311.2500	315.5000
Imagen 9	420.7420	311.2177	313.0000

Esta tabla muestra resultados interesantes:

1. En primer lugar, el algoritmo del centro de gravedad es el que parece más estable frente al ruido, con variaciones menores a 0.02 píxeles. Esto confirma que es bastante robusto por ser un algoritmo ponderado, es decir, le da más peso a los valores de intensidad más altos y por considerar múltiples magnitudes que cancelan los efectos aleatorios del ruido.
2. En segundo lugar, el algoritmo del borde suavizado es particularmente útil cuando existe una transición gradual de la intensidad, demostrando ser bastante robusto ante el ruido con variaciones similares al centro de gravedad. Esta robustez se sustenta principalmente porque trata de ajustar una curva suave a la transición de intensidades observada, lo que es en sí un filtro natural contra el ruido. Es decir, en

lugar de usar todos los valores directamente, busca la curva que mejor se ajusta a todos ellos.

3. Por último, el escalón puro es un algoritmo que por su propia naturaleza tiende a que le afecte más el ruido con variaciones de hasta cinco píxeles en algunos casos. Si se piensa en el funcionamiento del borde suavizado que tiene en cuenta el conjunto de valores, el escalón puro basa su cálculo en la diferencia entre valores individuales como se vio en la ecuación 5.4. Es decir, mientras que el centro de gravedad y el borde suavizado cuentan con mecanismos frente al ruido, el escalón puro trabaja directamente con los valores de cada píxel.

5.2.4. Conclusiones del primer prototipo

Este primer prototipo ayudó a sentar las bases del sistema de visión mediante la posibilidad de realizar distintos tipos de pruebas que permitieron elegir los componentes más adecuados para esta aplicación, así como adquirir y desarrollar conocimientos importantes para poder continuar avanzando hasta la reconstrucción tridimensional. Sin embargo, el conjunto presentaba algunos problemas graves:

1. El primero de ellos es que el elemento de calibración escogido no podía ser funcional. En la calibración de los parámetros extrínsecos es fundamental que los puntos de la imagen correspondan con los puntos de la vida real o las mediciones posteriores serán irremediablemente erróneas. Si resulta que los puntos tomados están mal distribuidos, el condicionamiento del sistema empeorará enormemente. Aunque ya de por sí el condicionamiento de la ecuación 4.31 es pobre [2] por elevar al cuadrado los valores singulares de la matriz A , elegir mal los puntos de calibración aumentará el número de condición de dicha matriz y en consecuencia de todo el sistema, degenerando finalmente en una mala homografía. Este elemento de calibración contaba con puntos casi colineales, factor que por naturaleza empeora el condicionamiento del sistema en geometría proyectiva. Además, la toma de puntos no era realista por las oclusiones que se generaban entre escalones, asique se podía medir los puntos en el 3D pero no se podía asegurar que fuesen los mismos en la imagen.

A pesar de lo anterior, este primer elemento de calibración ayudó en gran medida a entender aspectos fundamentales como el condicionamiento del sistema que posteriormente serviría para diseñar mejores elementos de calibración, y también aportó buenas ideas como establecer una cara plana para anclar el eje de giro como referencia geométrica.

2. La óptica reducía considerablemente la resolución del sistema por tener que realizar una corrección extrema de la distorsión de barril. Parece lógico pensar que si se tiene una cámara con una buena resolución, se trate de aprovechar el máximo posible de

esa resolución para no perder detalles. Como se comentó anteriormente, le elección de esta óptica estuvo sujeta a cuestiones de implementación práctica, pero también resultó útil para entender el funcionamiento de la distorsión en una imagen y cómo puede afectar a la precisión del sistema. Esa reducción drástica de la resolución por la calibración intrínseca provocaba errores en la toma de los puntos de calibración en la imagen, lo que al final se traduce en una mala reconstrucción.

3. El sistema era mecánicamente inestable para estar en condiciones de asegurar una reconstrucción precisa. Al final, se trata de un balance entre la parte *hardware* y la parte *software*. Un equilibrio entre asegurar que todos los elementos estén en su posición y una buena estrategia de visión que vaya de la mano con la programación del sistema. Si la parte mecánica del conjunto es muy difícil de ajustar, no asegura la concentricidad entre el motor y la pieza o hay holguras, será prácticamente imposible que el proyecto sea viable. Cuando se reconstruyen objetos de revolución, se puede asumir que la pieza gira perfectamente concéntrica con el eje de giro del motor en toda su longitud. Quizás para piezas pequeñas puede llegar a ser así, pero para el caso de este *TFM* se planteaba realizar reconstrucciones con objetos que superasen los 30 centímetros. Si se cumple esta condición, entonces, en la matriz de parámetros extrínsecos, el vector de traslación es directamente cero y sólo hay componente rotacional. Si no existe la forma de asegurar la concentricidad y se asume cero el vector de traslación, se introducirán errores en la reconstrucción. El diseño mecánico del primer prototipo mediante únicamente perfiles de aluminio sujetos entre sí con escuadras ajustables, provocaba demasiadas holguras y no garantizaba la condición de concentricidad.

5.3. Diseño final del sistema de visión para la reconstrucción de objetos de revolución

Habiendo avanzado en la comprensión de aspectos fundamentales para el diseño del sistema de visión y detectadas las ventajas y desventajas del prototipo anterior, la primera parte a solventar era la parte mecánica.

5.3.1. Restauración de un torno antiguo

La concentricidad de la pieza era el primer problema a resolver para asegurar que únicamente haya componente rotacional en la matriz de extrínsecos. Con esto en mente, las máquinas pensadas específicamente para girar concéntricamente con una pieza son los tornos. De hecho, el primer prototipo se basaba en este tipo de máquinas, sólo que de manera muy básica para poder realizar las pruebas.

Buscando durante un tiempo, se presentó la oportunidad: había un torno de los años ochenta que estaba en la basura de un taller. Se trataba de un viejo torno CNC que en su origen se utilizaba para joyería. Este torno tenía el tamaño ideal porque sus medidas eran bastante parecidas a las del primer prototipo. En la figura 5.32 se puede ver que el problema era su estado. Estaba bastante oxidado y necesitaba de tiempo y cariño para que se pareciese a cómo salió de fábrica.



Figura 5.32 Torno antiguo en su estado inicial

Lo primero fue desmontarlo todo y aceitar las piezas mecánicas que con el óxido estaban agarrotadas, especialmente la mordaza. Para quitar el óxido, se puede hacer de varias maneras. Por ejemplo, mediante abrasión con chorro de arena, pero esta opción se descartó en primer lugar por la dificultad para acceder a este tipo de equipos, y en segundo lugar porque no era deseable que quedasen restos en piezas como la mordaza, y más después de conseguir que los mecanismos volviesen a funcionar. Otra forma más accesible y menos invasiva si se tiene paciencia es utilizar electrólisis. Este proceso consiste en transferir el óxido de un metal a otro utilizando una diferencia de potencial y un electrolito, en este caso, carbonato de sodio (Na_2CO_3) diluido en agua. Se trata de un proceso relativamente lento, de alrededor de al menos un día para conseguir eliminar la mayoría del óxido, aunque depende de la propia pieza, de la cantidad de óxido que tenga, y de la corriente aplicada. Más corriente es menos tiempo, pero se genera mucho más calor a cambio.

Este tratamiento se realizó en todos los componentes cuyas dimensiones lo permitían. La figura 5.34 muestra cómo fue el proceso de restauración de la mordaza utilizando

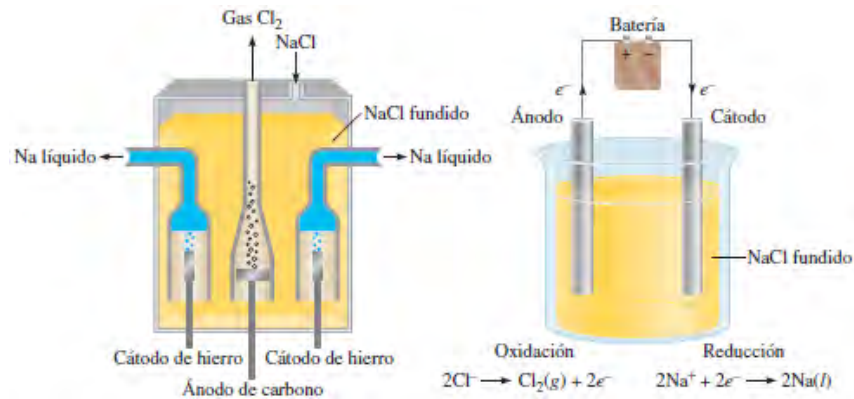
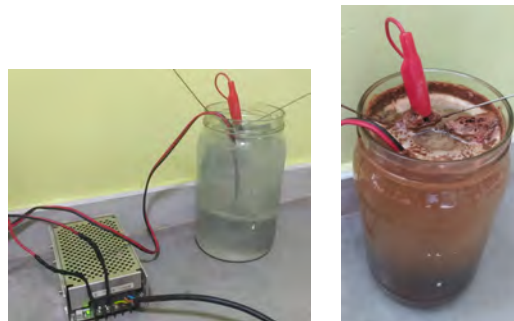


Figura 5.33 Proceso de electrólisis. Fuente: www.wikipedia.com

electrólisis y la figura 5.35 muestra el resultado final una vez la pieza queda lavada.



(a) Comienzo del proceso de electrólisis en la mordaza
 (b) Estado de la electrólisis de la mordaza tras un día



(c) Resultado tras finalizar la electrólisis en la mordaza

Figura 5.34 Proceso de restauración de la mordaza del mediante la aplicación de un proceso de electrólisis

Para restaurar el chasis, se lijaron todas las partes para dar imprimación y pintar

Para la pintura se decidió que todo fuese negro mate. El negro mate es un color que absorbe bien la luz y no produce brillos indeseados. Para el resto de componentes como las poleas hubo que quitarle el óxido a una de ellas, las otras dos únicamente hubo que limpiarlas ya que una es de un tipo de plástico duro y la otra de aluminio en buen estado. Originalmente tenía una rueda perforada que servía para dar pulsos al encoder y



(a) Resultado de la restauración de la mordaza: vista frontal



(b) Resultado de la restauración de la mordaza: vista lateral



(c) Resultado de la restauración de la mordaza: vista posterior

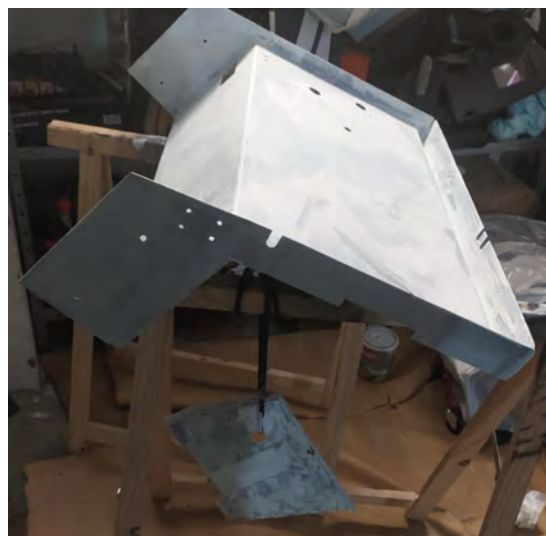
Figura 5.35 Resultado final de la restauración de la mordaza



(a) Restauración del chasis: lijado



(b) Restauración del chasis: resultado del lijado



(c) Restauración del chasis: imprimación

Figura 5.36 Restauración del chasis del torno

que se ha mantenido por tratar de preservar la originalidad del torno, aunque para este proyecto no era necesario por tener un motor paso a paso. El soporte del contrapunto

estaba en mejor estado y sólo había que limpiarlo, aunque el contrapunto original estaba perdido. Tomando medidas pude comprobar que se trataba de un cono morse estándar de tipo MT1, así que sabiendo que era estándar no fue complicado encontrar la solución comercial. Esta solución al final iba a ser mejor que cualquier pieza que pudiese diseñar por ahorrar en costes de presupuesto y de tiempo. El resultado final de la restauración se muestra en las figuras 5.37, 5.39 y 5.39.



Figura 5.37 Resultado final de la restauración: vista isométrica



Figura 5.38 Resultado final de la restauración: vista de planta

Aunque, como se ha mencionado, la idea era tratar de preservar lo máximo posible su originalidad, para este proyecto fue necesario descartar el motor principal y el carro del eje Y que originalmente traen los tornos para situar la herramienta y poder mecanizar. Este lugar lo ocupa un perfil de aluminio que permite fijar la estructura de la cámara y el láser a la estructura principal.



Figura 5.39 Resultado final de la restauración: vista de alzado

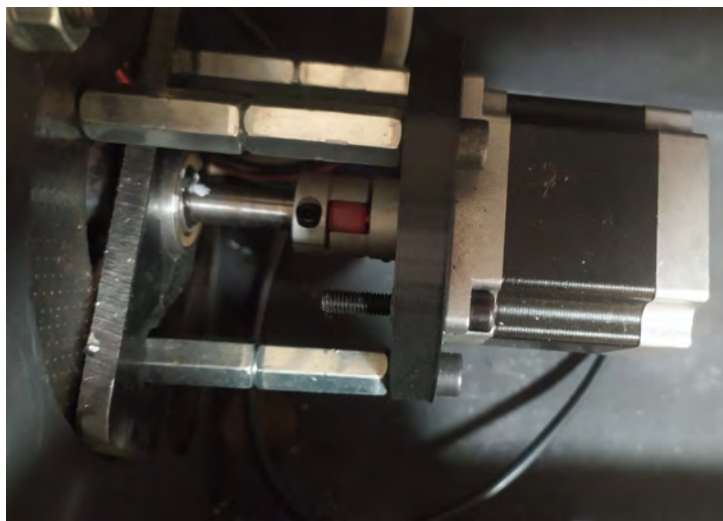


Figura 5.40 Resultado final de la restauración: vista de detalle del acoplamiento del motor a las poleas

Como nota final y en cumplimiento del objetivo de sostenibilidad del proyecto, los residuos generados por este proceso fueron depositados en el punto limpio local.

5.3.2. Comprobación de la concetricidad entre la pieza y el eje de giro

La pregunta ahora entonces es: ¿este nuevo prototipo o torno final es capaz de garantizar la concetricidad? Si se observa la figura 5.41, a simple vista podría parecer que el contrapunto es concéntrico con el eje de giro.



Figura 5.41 Concetricidad entre punto y contrapunto

Pero para comprobar que se cumple esta condición, se realizó la siguiente prueba: utilizando un nivel, se colocó una pieza que abarcara la totalidad de la longitud del torno a 0 grados, ± 45 grados y ± 90 grados. Esta pieza tiene unos puntos característicos que pueden ser medidos en el plano imagen. Así, para cada inclinación, se toma una captura y se corrige la distorsión. Acto seguido, se buscan las coordenadas de dichos puntos en cada imagen. Las capturas de cada inclinación de la pieza corresponden a la figura 5.42



(a) Comprobación del eje de giro: 0 grados de inclinación



(b) Comprobación del eje de giro: 45 grados de inclinación



(c) Comprobación del eje de giro: -45 grados de inclinación



(d) Comprobación del eje de giro: 90 grados de inclinación



(e) Comprobación del eje de giro: -90 grados de inclinación

Figura 5.42 Imágenes para la comprobación del eje de giro

Si en cada imagen el valor de los puntos resulta ser el mismo o muy cercano, significa que independientemente del giro de la pieza, el eje de giro es concéntrico con ella. La mejor forma de entender este principio es imaginar qué ocurriría en caso contrario, es decir, girase excéntrico. En este caso, la pieza iría *moviéndose* hacia delante y hacia atrás, cambiando entonces la posición de los puntos. Este efecto sería especialmente notable lejos de la mordaza, es decir, en el contrapunto. Un ejemplo de los puntos medidos se muestra en la tabla 5.7

Tabla 5.7 Coordenadas de los puntos en 0 grados

X_f	Y_f
554	293
222	345
293	330
386	319
454	329
526	340

Para saber cuánto de buena es la concentricidad, se utilizan medidas estadísticas clásicas resultando en la tabla 5.8

Tabla 5.8 Análisis estadístico de las coordenadas para diferentes ángulos

Punto	Media (X,Y)	Desv. Est. X	Desv. Est. Y	Máx. Dif. X	Máx. Dif. Y
1	(554.8, 293.0)	0.44721	0.00000	1.0	0.0
2	(222.0, 344.4)	0.00000	0.54772	0.0	1.0
3	(292.8, 330.8)	0.44721	0.44721	1.0	1.0
4	(386.0, 318.8)	0.00000	0.44721	0.0	1.0
5	(454.4, 329.0)	0.54772	0.00000	1.0	0.0
6	(526.2, 340.0)	0.44721	0.00000	1.0	0.0
Media	global	0.31489	0.24036	0.66667	0.50000

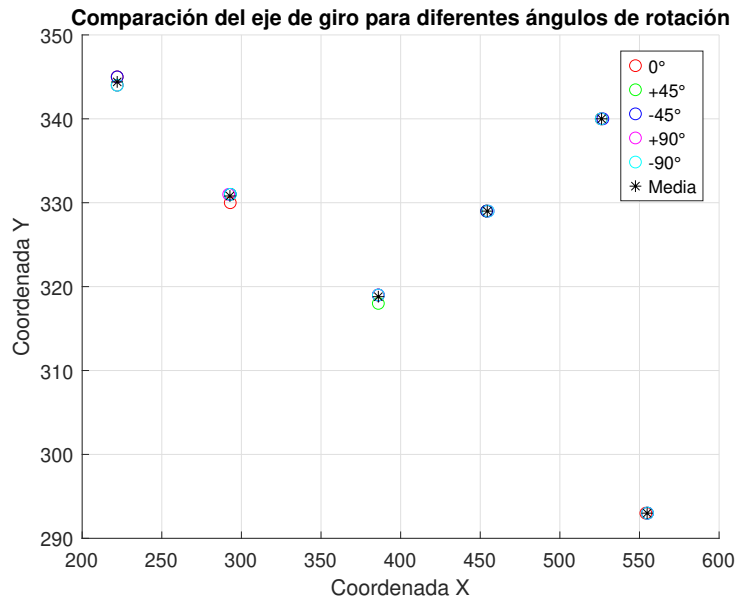


Figura 5.43 Valores de los diferentes puntos para la comprobación del eje de giro

Considerando que estos valores trabajan con coordenadas pixel, los resultados obtenidos implican variaciones pequeñas entre las imágenes, siendo lo más destacable las coordenadas que muestran una desviación estándar de cero. Esto significa que esas coordenadas permanecieron completamente constantes en todas las imágenes. Los valores globales indican consistencia en las mediciones, pudiendo comprobarse cómo el sistema es algo más estable en el eje Y que en el eje X con una variación pequeña.

Teniendo en cuenta estos resultados, es posible afirmar que este nuevo sistema permite asegurar la concentricidad aunque, en la práctica, la realidad es que no se trató de un proceso inmediato. Al quitar todos los componentes y volver a montarlos, el torno al inicio no quedó como en origen. El eje Y original del torno generaba un fuerte anclaje al chasis de la estructura que aseguraba que todo estuviese en su sitio. Al quitarlo, fue necesario un proceso de ajuste mecánico hasta conseguir ajustar la concentricidad. El resultado de esta prueba fue la comprobación de que todo quedó como debía para poder continuar con la reconstrucción.

5.3.3. Sincronismo entre la captura y el movimiento de rotación de la pieza

Para asegurar una reconstrucción 3D de alta precisión, la cámara debe capturar al mismo ritmo que el movimiento del pieza. En el primer prototipo, la sincronización se realizó mediante *trigger* por software. El orden de ejecución era el siguiente:

1. El ordenador mandaba primero tomar una captura a la cámara para tener la primera imagen antes del movimiento.

2. Acto seguido, el NodeMCU esperaba recibir la señal de comienzo de ciclo mediante el puerto serie.
3. Una vez recibida, movía la pieza x grados en función del número de pulsos configurado.
4. El ordenador volvía a mandar disparar y así hasta completar una vuelta.

El uso del trigger por software y la comunicación por el puerto serie, aún a la mayor tasa de Baudios y la mayor velocidad posible de transferencia de datos la cámara, hacía el sistema bastante lento por tratarse de la comunicación entre tres dispositivos. Aunque en las primeras pruebas rondaba los ocho minutos, se consiguió bajar hasta los dos minutos y cuarenta segundos. Aún así, seguía siendo un tiempo considerable que desaprovechaba las bondades del NodeMCU, del driver del motor y de la cámara.

Con el torno, en este sentido el objetivo consistía en reducir al máximo posible este tiempo para tener un sistema óptimo. En primer lugar, se necesitaba calcular la relación de las poleas. En el primer prototipo, la pieza estaba directamente conectada al motor, por lo que los grados de giro coincidían con los grados de giro de la pieza.



Figura 5.44 Vista de detalle de las poleas del torno

Al ser un torno antiguo, su paso a CAD3D se hizo midiendo a mano. Aunque por lo general esto no era crítico, sí lo era medir bien los diámetros de las poleas para obtener su relación.

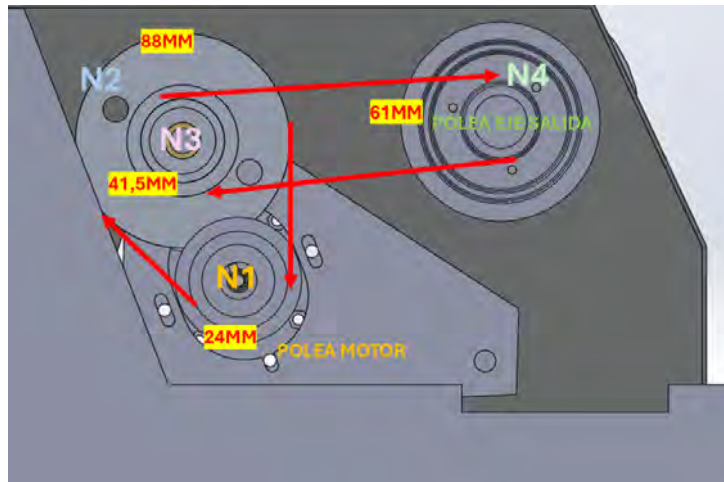


Figura 5.45 Movimiento y diámetros de las poleas

Atendiendo a la figura 5.45, se pueden extraer las siguientes ecuaciones:

$$i_{\text{torno}} = \frac{N_2}{N_1} \times \frac{N_4}{N_3} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_2}{N_1} &= \frac{88}{24} = 3,66 \\ \frac{N_4}{N_3} &= \frac{61}{41,5} = 1,5954 \end{aligned} \quad (5.6)$$

La relación entre N_2 y N_3 no se tiene en cuenta por estar sobre el mismo eje.

Por tanto, por cada giro del eje de salida de las poleas, se producen 5.8313 giros del motor según la ecuación 5.7

$$i_{\text{torno}} = 3,66 * 1,5954 = 5,8313 \quad (5.7)$$

Fue necesario algunas comprobaciones hasta verificar que los radios eran correctos en función de la posición final de la mordaza y el eje del motor tras una vuelta.

Teniendo la relación de poleas, lo siguiente era determinar los pulsos necesarios que debía dar el driver para que el motor diese un paso según el ángulo de giro especificado. Como se mencionó anteriormente, este driver permite hacer *microstepping* con hasta 25.000 pulsos por vuelta para suavizar el movimiento del motor y dar pasos más cortos. Pensando en el menor ángulo de giro posible, se decidió que en cada paso la pieza girase 0.1 grados. Por tanto, en una vuelta completa, se podrían adquirir 3600 imágenes. Este objetivo era algo ambicioso, pero permitiría aprovechar al máximo la resolución de la cámara y capturar el mayor número de detalles posibles al generar una nube de puntos final muy densa. Además, como ya se explicó, el NodeMCU puede dar holgadamente la frecuencia que necesita el driver para hacer girar la pieza en un período corto de tiempo.

Con lo anterior en mente, el número de pulsos totales por paso se puede calcular según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Pulsos por vuelta} = 25,000 * 2 = 50,000 \quad (5.8)$$

Se multiplica por dos porque se establece un *duty cycle* del 50 %. El número de pulsos se verá incrementado en el eje de salida de las poleas ya que el motor debe dar más de un giro para completar una vuelta completa de la pieza.

$$\begin{aligned} \text{Pulsos totales} &= \text{Pulsos por vuelta} * \text{Relación de poleas} \\ \text{Pulsos totales} &= 50000 * 5,38 = 269000 \end{aligned} \quad (5.9)$$

En caso de que el valor de los pulsos totales no resultase en un valor entero, en arduino, al declarar un valor como *int*, su resultado se redondearía hacia abajo. De esta forma en cada vuelta se acumulará un error de x pulsos, siendo x el valor flotante. Una manera de corregirlo es saber cuántas vueltas ha dado el motor y qué valor de corresponde después de n vueltas. Otra forma quizás más práctica es programar una rutina de *home* con un final de carrera que mande el torno a una posición de reposo. Esto aplicaría en el caso de que cada reconstrucción diese únicamente una vuelta.

Finalmente, el número de pasos puede calcularse relacionando el número de fotos con el número de pulsos según la ecuación 5.10

$$\begin{aligned} \text{Pulsos por paso} &= \frac{\text{Pulsos totales}}{\text{Número de fotos}} \\ \text{Pulsos por paso} &= \frac{269000}{3600} = 74,722222 \end{aligned} \quad (5.10)$$

La ecuación 5.10 permite relacionar cualquier grado de giro de la pieza con el número de pulsos necesarios ya que el número de fotos coincide con el número de pasos totales en una vuelta. Por otro lado, en este caso su valor resulta flotante, y al tratarse de un error acumulativo en cada paso, es necesario tenerlo en cuenta según la ecuación 5.11

$$\begin{aligned} A_i &= A_{i-1} + \frac{P_t}{N} \\ P_i &= \lfloor A_i \rfloor \\ A_i &= A_i - P_i \end{aligned} \quad (5.11)$$

Donde:

- A_i representa el número de pulsos acumulados en la iteración actual
- A_{i-1} representa el residuo del paso anterior
- P_t representa el número de pulsos totales. 269000 en este caso
- N representa el número total de pasos (3600)
- P_i representa el número de pulsos necesarios en la iteración actual

Esta ecuación irá alternando entre 74 y 75 pulsos según si el residuo acumulado es mayor o menor que uno. La idea es dar los 269000 pasos totales, pero distribuidos de la mejor forma posible. Ahora la siguiente pregunta era cómo afectaba este error a la precisión. Es decir, sabiendo que no siempre se dan los mismos pulsos por paso, ¿qué diferencia en grados supondría? En la ecuación 5.13 se calcula el error cometido según si se dan 74 o 75 pulsos.

$$\begin{aligned} \text{Paso}_{74} &= 74 \times \frac{360}{269000} = 0,09904\text{grados} \\ \text{Paso}_{75} &= 75 \times \frac{360}{269000} = 0,10040\text{grados} \end{aligned} \tag{5.12}$$

$$\begin{aligned} \text{Error}_{74} &= |0,1 - 0,09904\dots| = 0,00096\text{grados} \\ \text{Error}_{75} &= |0,1 - 0,10040\dots| = 0,00040\text{grados} \end{aligned} \tag{5.13}$$

Este error, del orden de milésimas de grado, puede considerarse despreciable.

Respecto a la cámara, la tasa máxima de *FPS* es de 74. Este máximo estará principalmente influenciado por parámetros propios como el tiempo de adquisición, el formato del pixel, el uso o no de ROI, etc. La velocidad de giro del motor será importante, pero no relevante ya que el sistema se pensó para que fuese la cámara la responsable de establecer si era posible avanzar en el siguiente paso o no. Aprovechando que cuenta con varias entradas y salidas, se prescindió del trigger software y se estableció que fueran la cámara y el NodeMCU quienes se comunicasen entre ellos según la siguiente secuencia:

1. La cámara toma la primera foto mientras el NodeMCU espera el fin de exposición de la cámara.
2. Una vez hecha la captura, la cámara manda una señal al NodeMCU para que avance un paso.
3. Acto seguido, el NodeMCU mueve la pieza y manda una señal de vuelta para que la cámara capture la siguiente imagen.
4. El ciclo se repite hasta completar las 3600 imágenes.

La combinación del cálculo preciso del número de pulsos por paso, sumado a que ahora eran únicamente dos dispositivos encargados de *hablar* entre ellos, desembocó en un control total de la captura que aseguraba la precisión del sistema, aumentaba drásticamente el tamaño de la nube de puntos final y disminuía significativamente el tiempo de ciclo del turno. Este tiempo por ejemplo, para un mismo tiempo de exposición, varía entre 1.09 minutos si el formato del pixel es Mono12, o 47 segundos si es Mono8.

Como reflexión a este apartado, se puede pensar que para esta aplicación quizás el tiempo no era tan relevante, pero este resultado final planteaba un interesante debate

entre tener una imagen con mayor gama de grises que podían aumentar la precisión, frente a una imagen más pobre en ese sentido pero que tardaba menos en capturarse.

5.3.4. Geometría del sistema de visión

Para determinar la posición óptima de la cámara y el láser, se tuvieron en cuenta aquellas características que influían en su cálculo:

- Ángulo del láser = 75°
- Distancia focal de la óptica escogida = 16mm
- Resolución del sensor = 1440x1080 pixeles
- Tamaño del pixel = $3.45 \mu\text{m}$

En primer lugar, se calcula la posición mínima a la que se debe colocar el láser para cubrir todo el área de interés según la figura 5.46

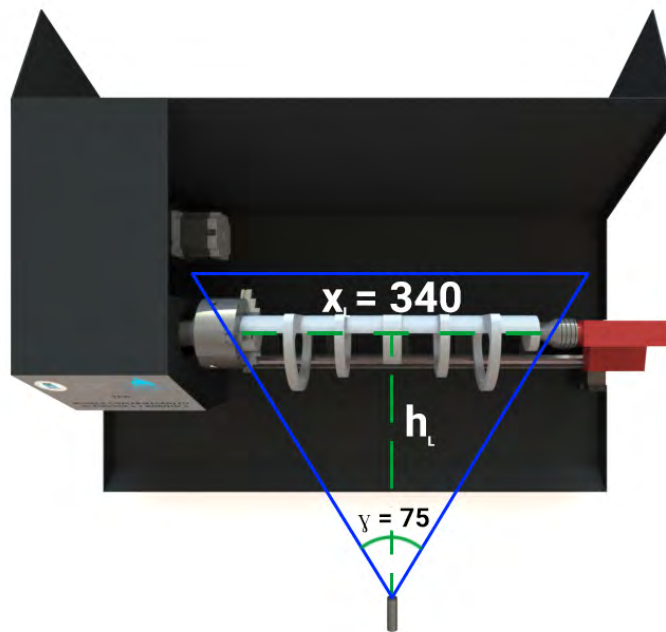


Figura 5.46 Cálculo para la posición del láser

Aunque el objeto mida 330 mm como máximo, se deja un margen de 5 mm a cada lado para asegurar que se cubre todo el área. De la figura 5.46, por trigonometría básica, se puede calcular el valor de h

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{x_L}{2}}{h_L} \quad (5.14)$$

$$h_L = \frac{170}{\tan 37,5} = 221,5483(mm) \quad (5.15)$$

Aunque en documentos como [16] se parametriza la distancia focal según unas distancias de trabajo, en este caso, al haberse realizado pruebas a las ópticas disponibles, se conoce de antemano que la óptica tiene una distancia focal de 16 mm. Conocido este valor, se calcula el ángulo de visión de la cámara según la ecuación 4.4. En el caso del ángulo horizontal:

$$\gamma = 2 \cdot \arctan \frac{\frac{1440 \cdot 3,45 \times 10^{-3}}{2}}{16} = 17,6494 \quad (5.16)$$

Y en el caso del ángulo vertical:

$$\gamma = 2 \cdot \arctan \frac{\frac{1080 \cdot 3,45 \times 10^{-3}}{2}}{16} = 13,2829 \quad (5.17)$$

Una vez conocidos los ángulos de visión de la cámara, atendiendo a la figura 5.47 se calcula la distancia de trabajo diagonal mínima de la cámara en la ecuación 5.18

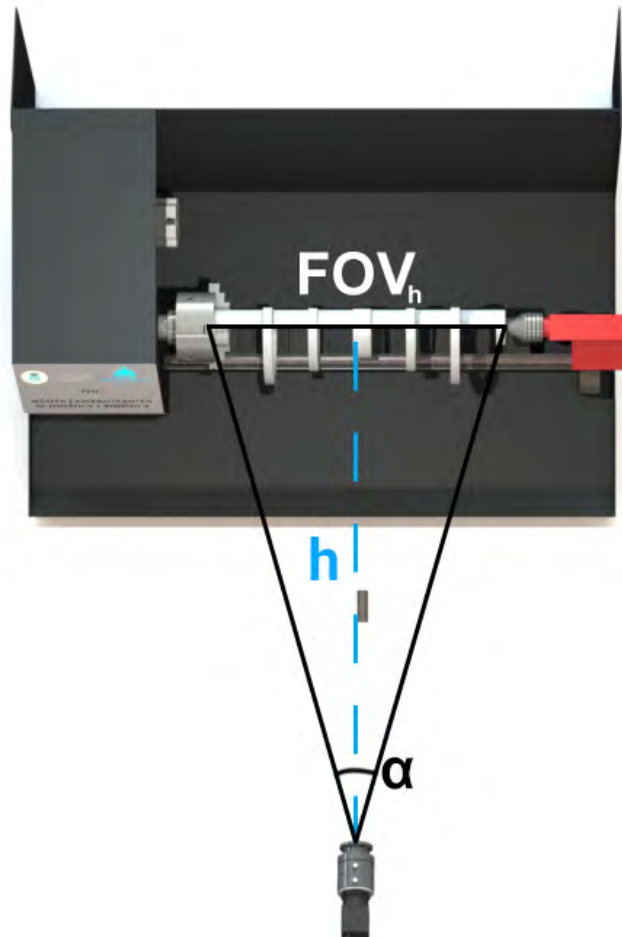


Figura 5.47 Cálculo para la posición diagonal de la cámara

$$h = \frac{\frac{FOV_h}{2}}{\tan \gamma/2} = 1095mm \quad (5.18)$$

Esta es la distancia entre el extremo de la óptica y el centro de la pieza. Con la figura 5.48 se calcula la posición horizontal de la cámara según la ecuación 5.19

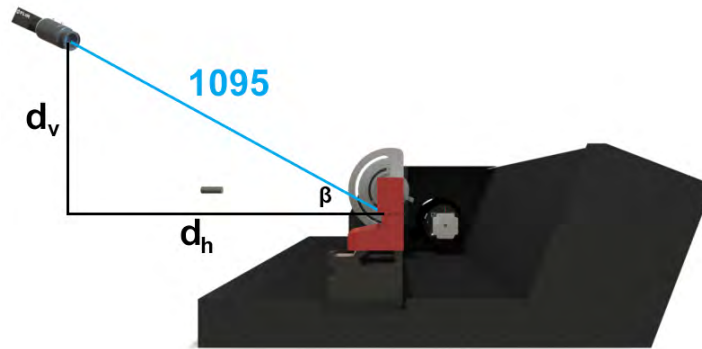


Figura 5.48 Cálculo para la posición horizontal de la cámara

$$d_l = 1095 * \cos(\beta) = 1095 * \cos(25) = 992,4143mm \quad (5.19)$$

Siendo β el ángulo de triangulación. Análogamente, se puede calcular su posición vertical

$$d_l = 1095 * \sin(\beta) = 1095 * \sin(25) = 462,7704 \quad (5.20)$$

Con estas distancias de trabajo es posible calcular la resolución espacial del sistema

$$R_d = \frac{1095 \cdot 3,45 \times 10^{-3}}{16} = 0,2362 \text{ mm/píxel} \quad (5.21)$$

5.3.5. Extracción de la línea láser

La extracción de la línea láser es un tema fundamental para la reconstrucción tri-dimensional. La estrategia escogida influirá directamente en la precisión del sistema. Se trata de un tema ampliamente estudiado con multitud de soluciones adaptadas a cada situación. Variables como el perfil del láser, tipo de imagen o las condiciones ambientales, son aspectos a considerar de cara a escoger el camino correcto. En [16] por ejemplo, el autor propone un método en el que considera independientes las columnas de la imagen dada la complejidad de implementación de su sistema; pero también menciona que en la mayoría de los casos, donde se tiene un ambiente controlado, técnicas como la aproximación Gaussiana, detector de Blais y Roux, el estimador parabólico o la aproximación lineal, son métodos suficientes para detectar el centro de la línea láser.

Para entender la decisión de qué tipo de algoritmo escoger, primero se debe conocer cómo será el tipo de imagen y las condiciones de trabajo. Entonces, para cada imagen utilizada en la reconstrucción, se toma una captura como la de la figura 5.49

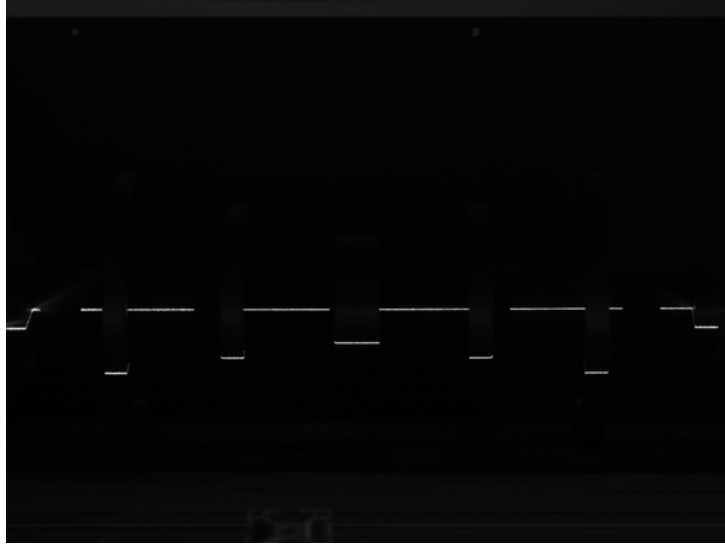


Figura 5.49 Imagen de ejemplo típica utilizada para la reconstrucción

La imagen de la figura 5.49 tiene esa forma debido al ajuste de los parámetros de la cámara. Para conseguirlo; se baja la ganancia y el tiempo de exposición al mínimo posible, se corrige el valor de *gamma* y se ajusta el parámetro *black level*, de tal forma que se oscurece la imagen, se reduce el ruido al mínimo y se consigue que la cámara *vea* únicamente la línea láser. Quizás aquí es donde radica la importancia de un láser con distribución uniforme y buena potencia. Además de permitir un mejor procesamiento, da la posibilidad de *oscurecer* la imagen sin perder información. Aunque es cierto que una vez quitada la distorsión se pierde resolución, simplemente se debe de tener en cuenta para ajustar bien los parámetros y conseguir una imagen oscura donde se aprecie bien el láser. Por otro lado, aunque este trabajo se sustenta bajo la motivación de una posible aplicación industrial, no era posible replicar las condiciones ambientales de este tipo de entorno y, al realizarse en un ambiente controlado, fue suficiente implementar un algoritmo de umbral adaptativo para extraer las coordenadas de la línea láser. Este algoritmo se puede expresar de la siguiente manera:

Sea $I(x, y)$ la imagen de entrada, donde:

- $x \in [1, W]$ representa la coordenada horizontal (ancho de la imagen)
- $y \in [1, H]$ representa la coordenada vertical (altura de la imagen)

Para cada columna x , se define:

El valor máximo de intensidad:

$$I_{max}(x) = \max_{y \in [1, H]} I(x, y) \quad (5.22)$$

El umbral adaptativo:

$$U(x) = \begin{cases} 0,7 \cdot I_{max}(x) & \text{si } I_{max}(x) > U_{min} \\ \text{no procesar} & \text{si } I_{max}(x) \leq U_{min} \end{cases} \quad (5.23)$$

El conjunto de puntos que superan el umbral en cada columna:

$$P(x) = \{y \in [1, H] : I(x, y) > U(x)\} \quad (5.24)$$

La posición inicial del centro de la línea:

$$C_{inicial}(x) = \begin{cases} \frac{1}{|P(x)|} \sum_{y \in P(x)} y & \text{si } P(x) \neq \emptyset \\ \text{no definido} & \text{si } P(x) = \emptyset \end{cases} \quad (5.25)$$

Es decir, este algoritmo se adapta dinámicamente al valor máximo de cada columna de la imagen, bajo un límite fijo preestablecido, para tratar de compensar las variaciones de la línea láser por brillos, cambios en la superficie del objeto, etc.

El umbral adaptativo devolverá las coordenadas en pixel, pero es posible implementar el algoritmo del centro de gravedad (*CDG*) explicado en 4.3.5 para obtener las coordenadas subpixel. De esta forma, el algoritmo de umbral adaptativo sirve como primer filtro para identificar de manera muy breve las coordenadas de la línea láser y el *CDG* las devuelve con precisión subpixel. La razón es un tema práctico. El centro de gravedad trabaja con una ventana pequeña alrededor del pixel central y no necesita buscar las coordenadas del láser en toda la imagen. En caso contrario, el algoritmo se vería muy influenciado por el ruido y el tiempo de procesamiento sería prácticamente inviable. El paso de la coordenada X puede ser con valor pixel ya que únicamente se necesita saber el valor de la columna dónde buscar el pico de intensidad.

La figura 5.50 muestra un ejemplo de extracción de la línea láser del cilindro de calibración de la figura 5.56



Figura 5.50 Imagen de ejemplo de la extracción de la línea láser con precisión subpixel

5.3.6. Calibración de los parámetros intrínsecos

En el apartado 5.2 se mencionó cómo la óptica de 4mm introducía mucha distorsión y era necesario corregirla mediante la calibración de los parámetros intrínsecos sin hacer mucho hincapié en este asunto. En esta ocasión, se explica más en detalle en qué consiste este proceso pero con la óptica definitiva de focal 16mm.

Como se explicó en 4.14, los parámetros intrínsecos son aquellos relacionados con el conjunto cámara y óptica. Son fundamentales para asegurar que los puntos en coordenadas del plano imagen corresponden con los puntos del plano láser ya que la función principal de estos parámetros es modelar este conjunto para corregir la distorsión. Existen diferentes métodos de calibración como el método de Tsai, de calibración por círculos o incluso algoritmos de autocalibración. En este *TFM*, la calibración de los parámetros intrínsecos se realizó utilizando la librería *OpenCV* con Python®. Esta librería tiene una extensa bibliografía y está muy optimizada para su uso en sistemas de visión por computador. En este caso, esta librería implementa el método de Zhang, que es uno de los métodos más utilizados actualmente por su sencillez, facilidad de implementación y buenos resultados con un número reducido de imágenes de un patrón plano. Este patrón generalmente suele ser un tablero de ajedrez de dimensiones conocidas. Páginas como [13] facilitan la tarea de encontrar el tablero de ajedrez que mejor se adapte a los requisitos de cada sistema de visión. Procurando mantener la escala 1:1 del tablero y asegurando que queda totalmente plano, el método de Zhang requiere la toma de al menos entre 10 y 15 imágenes para una buena calibración. En este caso, se tomaron 14 imágenes procurando que hubiese la mayor variedad posible entre ellas. Por razones prácticas, la figura 5.51 sólo muestra algunas.

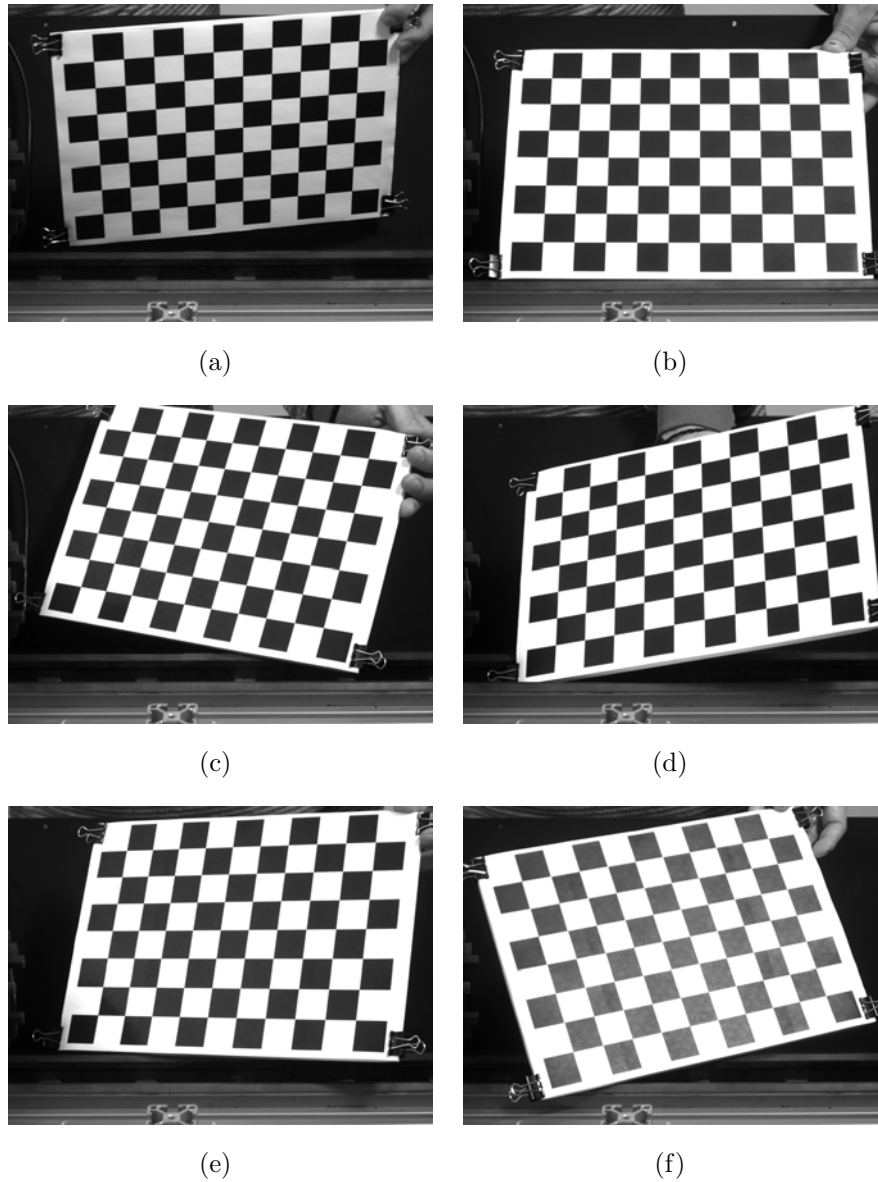


Figura 5.51 Imágenes para la calibración de los parámetros intrínsecos

La matriz de calibración de los parámetros intrínsecos y el vector de distorsión resultantes se muestran en 5.26 y 5.27.

$$K = \begin{bmatrix} 4703,33 & 0 & 642,72 \\ 0 & 4717,35 & 520,45 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$\vec{d} = [k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3] = [-0,11703 \ 0,00749 \ 0,00092 \ -0,00229 \ 0] \quad (5.27)$$

Para entender si estos valores tienen o no sentido, es un buen ejercicio pararse a entender qué representan:

1. En primer lugar, en la **matriz de calibración**, los valores 4703.33 y 4717.35 corresponden a f_x y f_y respectivamente, y representan el valor de la distancia focal en píxeles. Para comprobar si son acordes con la óptica de 16mm, se puede realizar la conversión de estos valores píxel a valores en mm conociendo las características de la cámara según la ecuación 5.28, resultando en 5.29

$$f_{mm} = f_{pixels} \times \text{tamaño del píxel} \quad (5.28)$$

$$\begin{aligned} f_x &= 4703,33 \times 0,00345 = 16,23 \text{ mm} \\ f_y &= 4717,35 \times 0,00345 = 16,27 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.29)$$

Estos valores, aunque no son exactamente 16mm, son coherentes pues se debe considerar una tolerancia típica de $\pm 5\%$ por posibles errores en el proceso de calibración, así que entrarían dentro del margen aceptable. La similitud de ambos valores, que idealmente deberían ser el mismo, indica una calibración precisa y un buen alineamiento del conjunto.

Por otro lado, los valores 642.72 y 520.45 corresponden a C_x y C_y e indican el centro óptico de la imagen. En el sensor de la cámara, con 1440x1080 píxeles de resolución, el centro óptico ideal debería estar en 720, 540. Sin embargo, habitualmente estos valores he podido comprobar que se alejan del centro óptico real y es poco frecuente que de los valores ideales. Esto puede deberse, por ejemplo, a imperfecciones en el montaje de la lente, tolerancias de fabricación, inclinación del sensor respecto al eje óptico, etc. Para corroborar si estos valores pueden o no ser aceptables en este sistema de visión, es posible calcular qué supone este desplazamiento siguiendo un razonamiento similar al de la ecuación 5.28, resultando en 5.30

$$\begin{aligned} \text{Desplazamiento}(x) &= 77,25 \times 0,00345 = 0,267 \text{ mm} \\ \text{Desplazamiento}(y) &= 19,25 \times 0,00345 = 0,067 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.30)$$

Estos valores pueden considerarse aceptables debido a que esta desviación esta bien caracterizada por la calibración y porque además los errores de reproyección de la tabla 5.9 son inferiores a 0.05 píxeles.

2. En el **vector de distorsión**, el parámetro que quizás pueda resaltar sobre el resto es k_3 , con un valor de cero. En la ecuación 4.10, el coeficiente k_3 es el encargado de modelar las distorsiones más extremas en los bordes de la imagen. Modelar este coeficiente es particularmente útil en ópticas donde la distorsión radial es significativa, como en el caso de la óptica de 4mm utilizada en el primer prototipo. Si se conoce que una óptica no introduce una distorsión radial tan grande, como la óptica

de 16mm, en *OpenCV* es posible establecer que este valor directamente sea cero para simplificar el modelo de calibración y, de esta forma, hacerlo más robusto. Por otro lado, k_1 y k_2 son los coeficientes encargados de modelar las distorsiones que afectan a zonas más cercanas al centro de la imagen. El valor negativo de k_1 es el más significativo e indica una distorsión de tipo barril. Por poner en contexto, este valor en la óptica de 4mm, que introducía mucha más distorsión, era de -0.4. Por norma general, valores de $k_1 = \pm 0.5$ se consideran aceptables. En este caso, -0.1173 implica una distorsión radial moderada.

k_2 es positivo y pequeño, lo que indica que compensa ligeramente la distorsión de barril más cerca de los bordes que del centro como lo hace k_1 . Una buena manera de saber si la corrección radial es consistente es fijándose en la relación entre k_1 y k_2 . Dado que k_2 multiplica a una potencia mayor que k_1 , si k_2 es mayor que k_1 , físicamente significaría que ese término crecerá mucho más rápido que el término de k_1 , dominando por completo la corrección de la distorsión y resultando en una corrección excesiva en los bordes de la imagen. La mejor forma de entenderlo es suponer una distancia $\rho = 2$ medida desde el centro de la imagen. Si $k_1 = 0.1$ y $k_2 = 0.01$, se obtendría el resultado de la ecuación 5.31. En este caso, el efecto de la corrección de la distorsión está dominado por k_1 . Pero si $k_1 = 0.1$ y $k_2 = 0.2$, se obtendría el resultado de la ecuación 5.32, donde se puede observar que es k_2 quien domina la corrección.

$$\begin{aligned} k_1\rho^2 &= 0,1 \times 4 = 0,4 \\ k_2\rho^4 &= 0,01 \times 16 = 0,16 \end{aligned} \tag{5.31}$$

$$\begin{aligned} k_1\rho^2 &= 0,1 \times 4 = 0,4 \\ k_2\rho^4 &= 0,2 \times 16 = 3,2 \end{aligned} \tag{5.32}$$

Por norma general, $|k_2| < |k_1|$. Es por esto que cuando se obtiene el vector de distorsión, es buena práctica fijarse en estos dos valores para verificar si se obtuvo una buena calibración.

Finalmente, p_1 y p_2 son los encargados de corregir la distorsión tangencial. p_1 modela la distorsión en el eje X mientras que p_2 lo hace en el eje Y. Los valores tan cercanos a cero indican que la lente y el sensor están bien alineados. Valores por debajo de 0.01 se consideran aceptables.

Cálculo del error de reproyección

El error de reproyección es la métrica más utilizada para corroborar la bondad de la calibración de los parámetros intrínsecos. Para calcularlo, se utiliza la ecuación 5.33 que

emplea la norma $L2$.

$$e = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n [(x_j - \hat{x}_j)^2 + (y_j - \hat{y}_j)^2]}}{n} \quad (5.33)$$

Donde:

- e representa el error de reproyección promedio
- n es el número total de puntos
- (x_j, y_j) son las coordenadas del punto j detectado en la imagen
- (\hat{x}_j, \hat{y}_j) son las coordenadas del punto j proyectado

La tabla 5.9 muestra los errores de reproyección en cada una de las catorce imágenes empleadas para la calibración

Tabla 5.9 Errores de reproyección en la calibración de los parámetros intrínsecos

Imagen	Error de reproyección (píxeles)
1	0.034249
2	0.045660
3	0.039229
4	0.032562
5	0.028738
6	0.037904
7	0.033919
8	0.040426
9	0.032357
10	0.043040
11	0.045014
12	0.046779
13	0.037775
14	0.042150

Otra forma de ver el error es reproyectando los mismos puntos en las imágenes de la figura 5.51, resultando en la figura 5.52

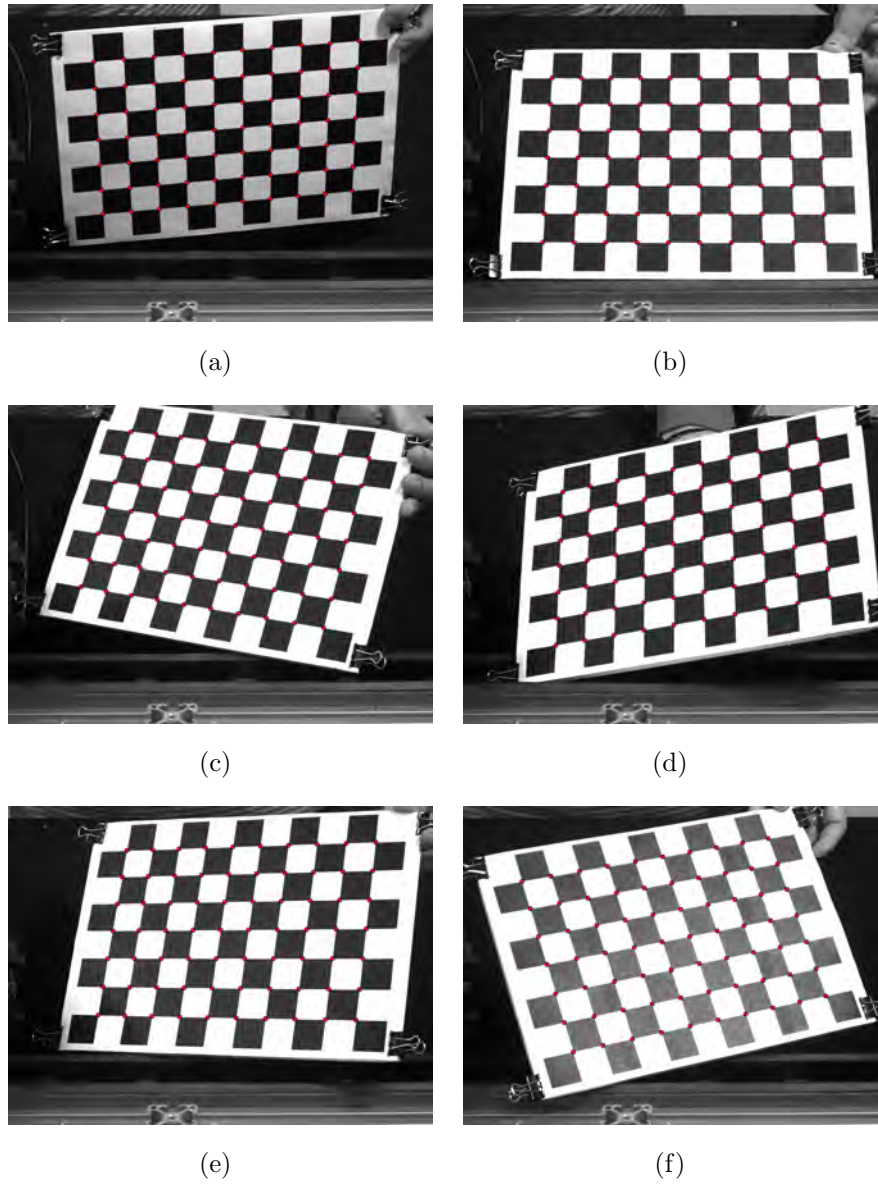


Figura 5.52 Resultado de la reproyección de los puntos en las imágenes de calibración

5.3.7. Calibración de los parámetros extrínsecos

En el apartado 4.3.4, se explicó la relación entre la matriz de homografía y la solución del problema de mínimos cuadrados que establece la relación entre el plano imagen y el plano láser. Esta relación es la base fundamental para obtener una reconstrucción 3D precisa. Para cumplir con la condición de que el sistema sea sobredeterminado, se requiere de un objeto de calibración que al menos tenga cuatro puntos de calibración para cumplir con las ocho ecuaciones de la matriz de homografía.

Rediseño del cilindro de calibración

Cada aplicación de visión conlleva una estrategia particular y distinta. En tesis como por ejemplo [16], la calibración de los parámetros extrínsecos se realiza utilizando un patrón plano de rejilla con el propósito de calcular el centroide de cada uno de esos puntos. En el caso de la tesis [2], para la estimación del plano láser se utiliza una estrategia diferente. En lugar de una rejilla plana, el elemento de calibración es un paralelepípedo escalonado. En la tesis [18] se da un caso similar, pues utiliza esta idea del paralelepípedo pero formando un patrón de escalera mecanizado en aluminio cuyas alturas son conocidas. De esta manera, consigue aumentar el número de puntos que pertenecen al plano láser. Además, en esta tesis también se menciona la posibilidad de realizar el desacople entre los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara utilizando invariantes proyectivos y un elemento de calibración cilíndrico al que la línea láser lo atraviesa de manera transversal. Aunque para el caso de este *TFM* no se realiza este desacople de parámetros, pues los puntos en el plano imagen dependen de la calibración de la cámara, este tipo de objeto de calibración escalonado, combinado con la posibilidad de utilizar un cilindro, sentó las bases para el diseño del primer prototipo de la figura 5.27. La idea era tomar el patrón escalonado de la tesis [18] y hacer analogía para poder reconstruir objetos de revolución. A pesar de esto, surgieron los problemas explicados en 5.2.4. Teniendo en mente que se necesitaba separación entre los peldaños para evitar oclusiones, y que la teoría dicta que un mayor número de puntos induce a un menor error como demuestra [2], el nuevo cilindro de calibración debía seguir estas dos principales pautas.

Este proceso de diseño no fue algo inmediato, sino más bien iterativo. Tratando siempre de mantener la cara plana en el eje del primer elemento de calibración, junto con las dos pautas mencionadas, además de un diseño sencillo que permitiese una mejor impresión, en la figura 5.53 se muestran algunas de estas iteraciones.

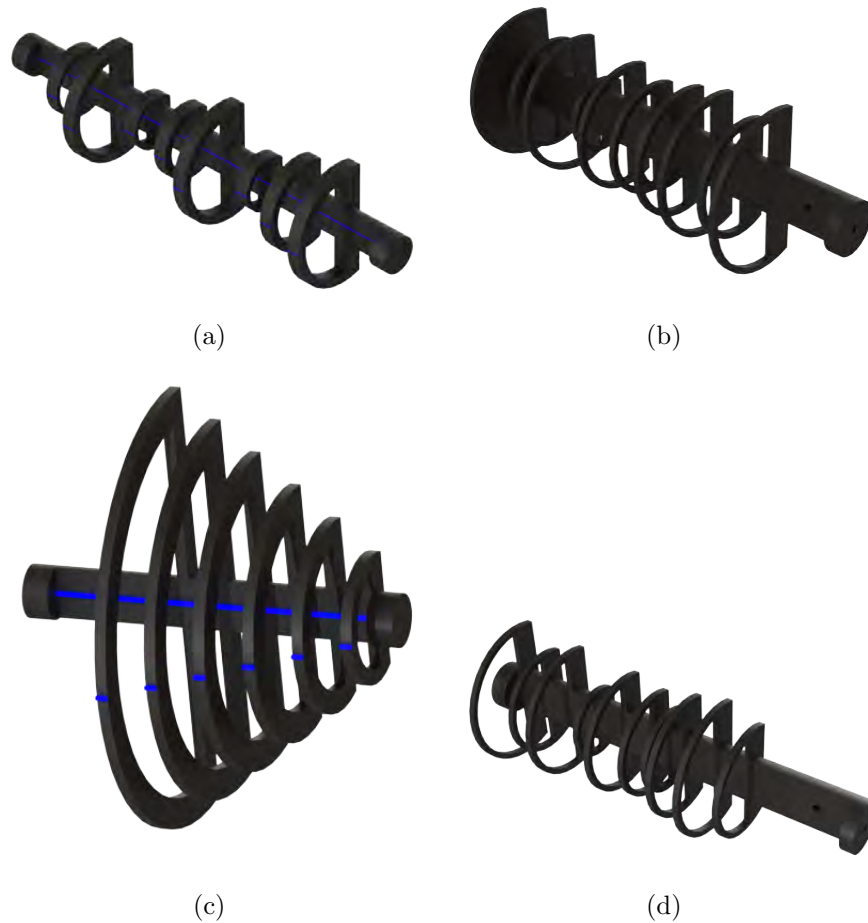


Figura 5.53 Diferentes cilindros de calibración

Los motivos para descartar estos elementos de calibración fueron varios y diversos, como por ejemplo que no se conseguía solventar bien el problema de las oclusiones o que los puntos metían ruido en la homografía por una mala distribución. Lo cierto es que se trataba de un proceso tedioso, ya que eran objetos de 330mm de longitud pensados para ser impresos en 3D en una impresora cuyo máximo en X,Y,Z era 300mm. Esto dificultaba la tarea del diseño, obligando a partir las piezas en algún punto para luego después unir las. Aunque pueda parecer un detalle nimio, si el elemento de calibración no está bien construido o está mal alineado, se generará sin duda una mala calibración. Por eso el patrón escalonado de [18] se fabricaba con una máquina CNC de alta precisión. Además, como se fabricaba utilizando impresión 3D, se debía pensar también en el mejor equilibrio entre diseño e impresión. Si la pieza se imprime tumbada, en la parte del peldaño donde impacta el haz del láser se generará una parte plana en lugar de un círculo perfecto. Si se imprime verticalmente, se conseguirán círculos perfectos pero se necesitará mucho soporte, aumentado así el tiempo de impresión, además de que el postprocesado será más tedioso. Con los mismos parámetros de impresión, en el caso de la figura 5.54(a), el tiempo de impresión fueron 8 horas. En el caso de la figura 5.54(b), 12 horas.

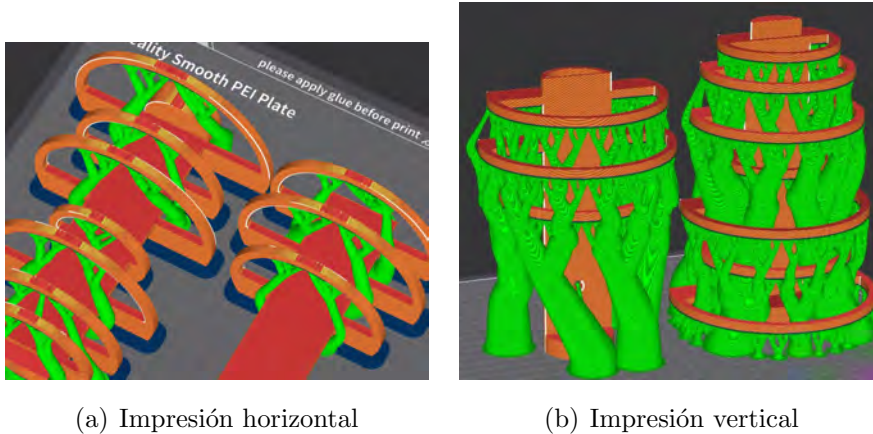


Figura 5.54 Formas de imprimir los elementos de calibración

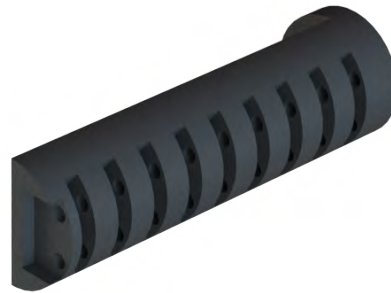
El trabajo de diseño, impresión y comprobación de resultados resultaba en una tarea poco óptima para obtener resultados fiables en un período razonable de tiempo. La solución consistía en separar los peldaños de la base para evitar tanto soporte, asegurar la alineación de la pieza y tener peldaños con radios variables con el fin de poder realizar pruebas sin necesidad de volver a imprimir un cilindro completo. El cilindro de calibración modular se muestra en la figura 5.55. Contaba con las siguientes características:

- Para asegurar un buen alineamiento, se realizaron dos perforados que lo atravesaban en toda su longitud para poder insertar dos varillas roscadas metálicas. Esto también le aportaba rigidez al conjunto. Además, en el corte se añadió una forma rectangular que servía como centrador.
- En el extremo de contrapunto se añadió un perforado ciego justo en el eje de la pieza para no tener que buscar manualmente el centro.
- A lo largo del cilindro se pusieron perforados equidistanciados para poder insertar y retirar los peldaños con facilidad. Únicamente era necesario retirar las varillas y colocar otro peldaño diferente para realizar otra prueba.
- Para asegurar que los peldaños quedaban en su posición exacta, aparte de las dos varillas, se le añadió una forma que impedía el balanceo (figura 5.55(a))
- Se mantuvo la cara plana posterior de los anteriores cilindros de prueba para reducir el tiempo de impresión y facilitar su ajuste en la calibración.

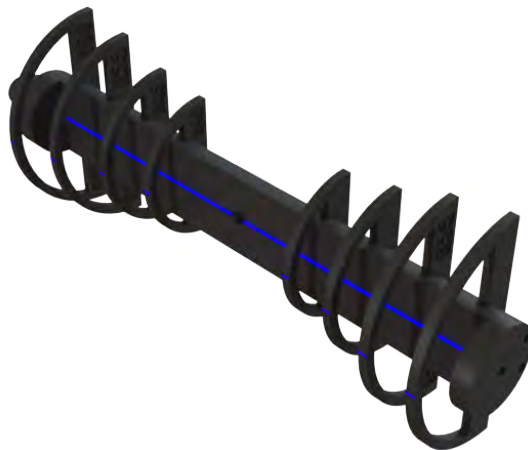


(a) Vista de detalle de un peldaño

(b) Pieza 1 de la base



(c) Pieza 2 de la base



(d) Cilindro modular: vista isométrica

Figura 5.55 Cilindro de calibración modular

Tras algunas pruebas realizadas con este cilindro modular, el cilindro final se muestra en la figura 5.56, que es el mismo que el empleado para comprobar el eje de giro en la figura 5.42. Inicialmente se utilizó otra pieza para esta verificación, pero lamentablemente no se ha podido encontrar ni la pieza ni las imágenes originales, por lo que para la redacción de esta memoria fue necesario repetir la prueba con el cilindro final.

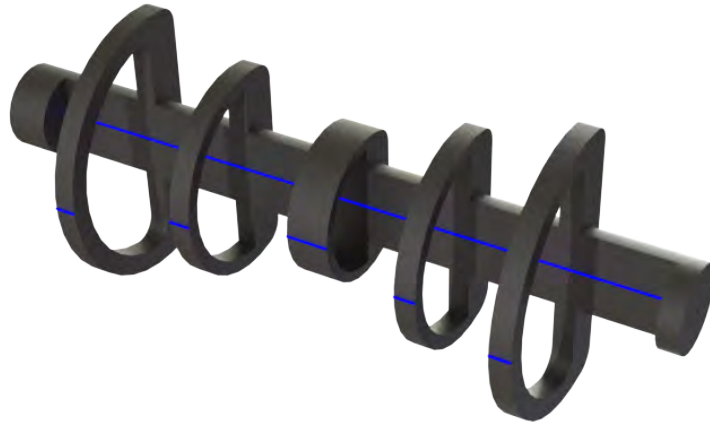


Figura 5.56 Cilindro final para la calibración de los parámetros extrínsecos

La pregunta es, ¿por qué funciona esta forma del cilindro? Lo cierto es que la teoría dicta que un mayor número de puntos es mejor, pero no se especifica cómo se deben distribuir estos puntos. En el patrón de rejilla, en el caso de [16], toma varias capturas separando el patrón horizontalmente una distancia d/n , donde d es la distancia entre los puntos de la propia rejilla y n el número de imágenes de calibración. Lo que consigue de esta forma es un mayor número de puntos, pero abarcando todo el ancho de la imagen. En la tesis de [18], el patrón escalonado también cubre el ancho del sensor, pero además tiene una característica principal: la simetría. Esta simetría con respecto al centro otorga estabilidad a la calibración y además ayuda a verificar visualmente si va a funcionar o no. Es decir, si el cilindro no está mecánicamente bien ajustado, visualmente se podrá verificar antes incluso de tomar los puntos. Si está bien ajustado pero el resultado de la calibración de los parámetros intrínsecos es pobre, también se podrá comprobar antes de tomar los puntos. La mejor forma de entenderlo es fijarse en la figura 5.57

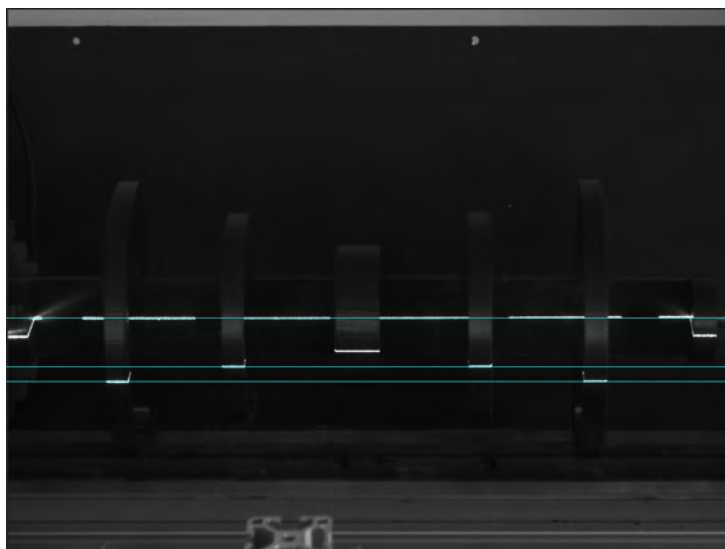


Figura 5.57 Imagen de comprobación para la calibración de los parámetros extrínsecos

Utilizando un software que permite medir en coordenadas pixel, se proyectan líneas rectas de referencia sobre los peldaños izquierdos de la pieza. Aprovechando la simetría, si todo está correcto, las rectas deben quedar a la misma altura que sus simétricos.

La simetría de puntos no es un tema que se trate como tal en la literatura, pero lo cierto es que si se piensa en el patrón de rejilla de [16], en realidad, la separación a una distancia fija entre imagen e imagen no es más que una simetría en el plano $d/2n$. Ahora bien, es lógico preguntarse por qué únicamente seis escalones en lugar de tratar de aprovechar al máximo posible el espacio disponible y así obtener más puntos de calibración. Tras numerosas pruebas, la conclusión a la que pude llegar es relativamente sencilla: a veces menos es más (calidad frente a cantidad). Es decir, no se trata únicamente de tener un gran número de puntos con la esperanza de que así se consiga una buena calibración, sino de que la calibración capture correctamente la transformación proyectiva entre el plano láser y el plano imagen. Para conseguirlo, la mejor manera es que los puntos se encuentren correctamente equidistanciados, colocando la mayor diferencia de altura posible entre ellos y asegurando que cubran todo el área de la imagen.

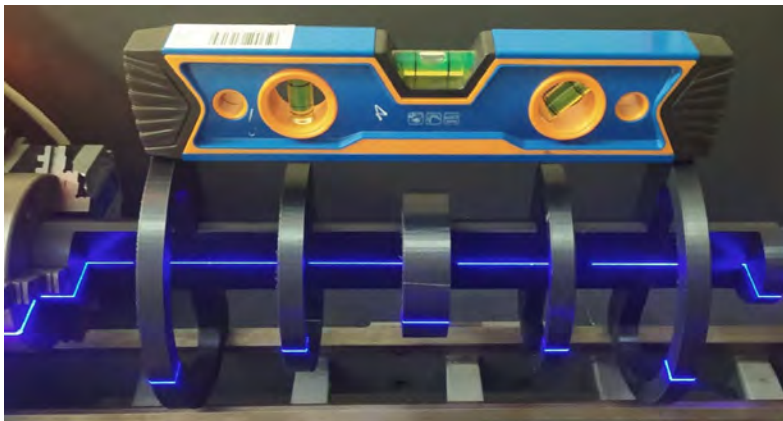
Conclusiones:

1. Aumentar el número de puntos puede implicar introducir más ruido si el sistema no está perfectamente ajustado o la cámara bien calibrada. Esto se consideraría ruido estructural por tratarse de imperfecciones en el sistema y el propio proceso de adquisición de los puntos.
2. Más puntos concentrados en una única región como en la figura 5.53(c) provocará que la calibración funcione bien en esa zona, pero peor en el resto. Es decir, se estaría generando un sesgo. Haciendo analogía con los algoritmos de Inteligencia Artificial, sería como caer en el *overfitting*.
3. Si se tiene en cuenta la simetría, se dispone de una herramienta visual muy útil que *avisa* de cómo será la calibración incluso antes de comenzar.

Aunque si bien es cierto que existen algoritmos más robustos como *RANSAC* que son menos sensibles al ruido, como se podrá ver más adelante el uso del número exacto de puntos fue suficiente para obtener una reconstrucción tridimensional con precisión subpixel.

Cálculo de la matriz de homografía

Para el cálculo de la homografía, es necesario contar con una imagen de calibración fiable que asegure la correspondencia entre el plano láser y el plano imagen. Con el torno ajustado mecánicamente para asegurar la concetricidad como se explicó en 5.3.2, es necesario que el eje de la pieza coincida con el plano láser. Para ello, antes de capturar, se realiza un proceso de nivelación como el de la figura 5.58



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.58 Nivelado de la pieza de calibración

Con todo ajustado correctamente, se toman los siete puntos de la figura 5.59. Esta toma de puntos es manual, por lo que para este *TFM* no se han implementado algoritmos de autocalibración.

El punto verde de la figura 5.59 indica el origen que se define según la figura 5.60, con el eje *Y* como eje de giro, *X* como el eje de la profundidad y *Z* positivo apuntando hacia abajo. Este sistema de coordenadas no es arbitrario, sino que su orientación impone la condición de que el plano láser se sitúa sobre el plano $Z_w = 0$, que es necesaria para simplificar la formulación.

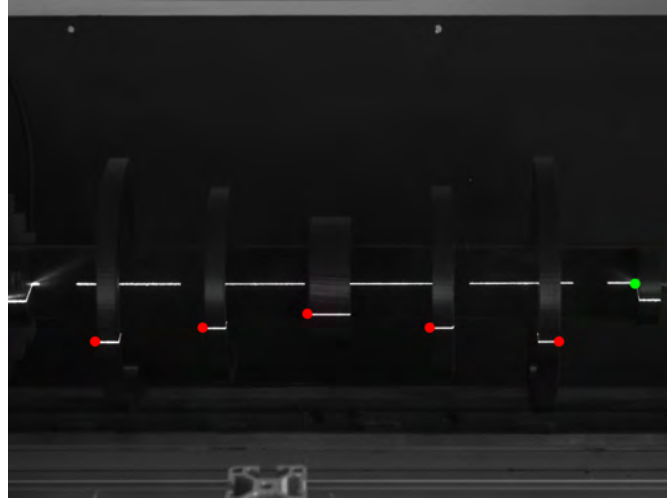


Figura 5.59 Puntos de calibración para el cálculo de la homografía

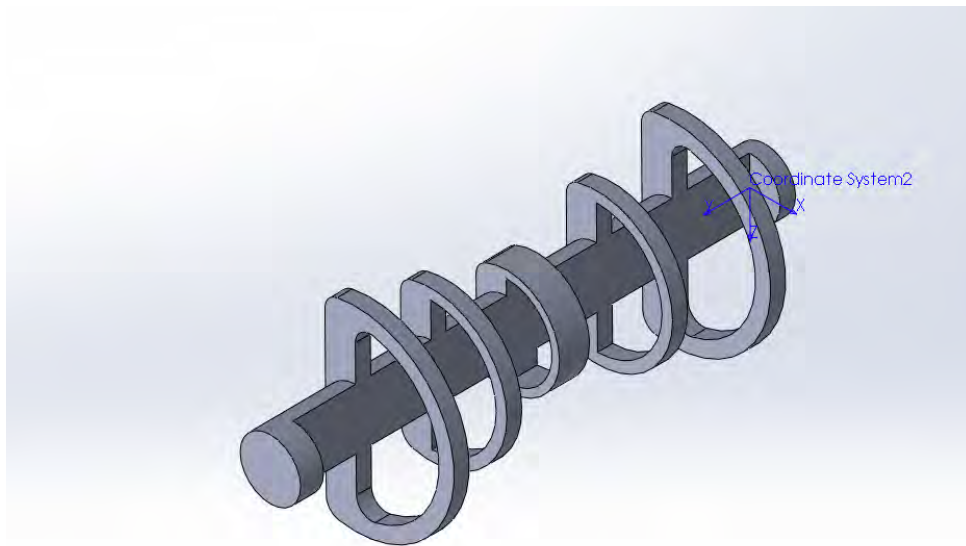


Figura 5.60 Sistema de coordenadas

Este origen de coordenadas está situado justamente en el eje de la pieza y en un punto visible de la cámara para poder realizar directamente mediciones desde ese punto y simplificar el modelo. Se barajó en su momento la posibilidad de que el origen se situase en un punto no visible de la imagen, pero se descartó entre otros motivos porque se debería calcular la posición de este origen no visible respecto a los puntos de calibración. Claro está que si se asumía que era perfectamente concéntrico no sería de mucha importancia, pero tener el origen en un punto visible en este caso sentaba un anclaje fuerte para la reconstrucción.

Para verificar la bondad de la homografía, se utilizó validación cruzada. Para cada punto de calibración, se calcula su homografía y su error de reproyección en los dos ejes, resultando en la tabla 5.11

Tabla 5.10 Correspondencia entre puntos de la imagen y puntos del mundo

Punto	X (Imagen)	Y (Imagen)	X (Mundo)	Y (Mundo)
0	1356	609	0	0
1	195	737	65	262.7
2	425	707	50	212.45
3	739	678	35	142.5
4	916	707	50	101.95
5	1190	736	65	41.7

Tabla 5.11 Puntos y sus reproyecciones: cálculo con coordenadas píxel

Nombre del punto	Original (X)	Reproyección (X)	Original (Y)	Reproyección (Y)	DifX	DifY
1	195	194.48	737	738.18	0.51509	-1.1786
2	425	425.28	707	707.23	-0.28486	-0.23355
3	739	738.39	678	676.98	0.6138	1.0226
4	916	917.22	707	706.28	-1.2198	0.7153
5	1190	1185.9	736	737.4	4.1468	-1.4005
0	1356	1359.4	609	611.66	-3.3801	-2.6586

Con los valores de reproyección de la tabla 5.11, se obtiene que la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) = 2.6728 píxeles. Estos valores se han mostrado para poder obtener una comparativa en cómo los algoritmos subpíxel mejoran la precisión del sistema. Tomando de nuevo las coordenadas de la tabla 5.10 y aplicando algoritmos de precisión subpíxel, se obtiene la tabla 5.12. Para este caso, $RMSE$ = 2.184 píxeles

Tabla 5.12 Puntos y sus reproyecciones: cálculo con coordenadas subpíxel

Nombre del punto	Original (X)	Reproyección (X)	Original (Y)	Reproyección (Y)	DifX	DifY
1	195.52	196.2	737.91	738.92	-0.67764	-1.0057
2	426.3	426.08	707.75	708.17	0.22271	-0.42079
3	739.61	739.57	678.94	677.77	0.038612	1.1675
4	916.36	915.8	707.84	706.85	0.55799	0.99233
5	1192.5	1194.6	736.9	739.22	-2.0856	-2.3245
0	1356.5	1354.7	609.84	613.21	1.7765	-3.3691

Los algoritmos subpíxel muestran una diferencia en la precisión, y aunque pueda parecer una diferencia pequeña, en sistemas donde la precisión es importante, cualquier disminución de este error supone un importante avance. Para entender qué supone este error de proyección en términos físicos reales, se puede hacer una conversión similar a la empleada en la ecuación 5.29, resultando en 5.34

$$\text{Error reproyección } (RMSE) = 2,184 * 0,00345 = 0,0075348 \text{ (mm)} \quad (5.34)$$

Finalmente, la matriz de homografía resultante se muestra en 5.35

$$M = \begin{pmatrix} 41,961 & -435,37 & 0,0566 \\ 182,29 & 1,8219 & 0,50714 \\ -0,098137 & 0,0096788 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.35)$$

5.3.8. Resultados de la reconstrucción

Como se ha mencionado varias veces en este *TFM*, la matriz de homografía permite relacionar los puntos del plano imagen con el plano láser según la ecuación 5.35. Dado que se impuso la condición $Z_w = 0$, para poder obtener la reconstrucción tridimensional es necesario tener en cuenta el ángulo de rotación de 0.1° para obtener sus coordenadas en el sistema de coordenadas del mundo. Así, a cada par de puntos se le aplica la matriz de rotación alrededor del eje Y.

El primer objeto para reconstruir fue el propio cilindro de calibración. Sus medidas se muestran en la figura B.1

Para evaluar la bondad de la reconstrucción, se realizaron varias tomas del mismo objeto replicando las mismas condiciones con el fin de observar la diferencia entre cada una de ellas. Además, para asegurar la fiabilidad y consistencia de las mediciones, se realizó el siguiente programa que busca el valor máximo en los X,Z dado un margen de búsqueda en el eje Y, ya que la elección del sistema de coordenadas justo en el eje de la pieza permite buscar el máximo valor del radio en el eje X y el eje Z medidos desde el origen.

```
% Búsqueda de radios en el cilindro de calibración.
indices_primer_escalon = (Y>=41 & Y<=51);
X_max_primer_escalon = max(X(indices_primer_escalon));
Z_max_primer_escalon = max(Z(indices_primer_escalon));

indices_segundo_escalon = (Y>=91 & Y<=101);
X_max_segundo_escalon = max(X(indices_segundo_escalon));
Z_max_segundo_escalon = max(Z(indices_segundo_escalon));

indices_tercer_escalon = (Y>=142 & Y<=162);
X_max_tercer_escalon = max(X(indices_tercer_escalon));
Z_max_tercer_escalon = max(Z(indices_tercer_escalon));
```

Las figuras B.2, B.3 y B.4 muestran el resultado de tres reconstrucciones distintas con precisión subpixel.

En el caso de la longitud (eje Y), es un dato más complicado de medir ya que la imagen abarca también la mordaza que sostiene la pieza. Para obtener una medida fiable, se toma

la cota 304.4 mm entre caras interiores de la figura B.1 y se mide buscando manualmente puntos correspondientes. La ventaja de establecer el origen de coordenadas en una de las caras interiores supone que el valor en la cara contraria es directamente el valor buscado. Las figuras B.5, B.6 y B.7 muestran el resultado de la medición en este eje.

Finalmente, las figuras B.8 y B.9 muestran el resultado de la superposición de las nubes de puntos de las tres reconstrucciones, además de una vista en detalle del plano XZ. En este plano, se puede observar con más detalle el correcto posicionamiento de la pieza, garantizando la concentricidad con el eje de giro.

De las tres reconstrucciones, la tabla 5.13 muestra el resultado de las tres figuras y la tabla 5.14 las diferencias con las medidas originales.

Tabla 5.13 Comparación de X,Z por escalón en las tres reconstrucciones

Escalón	Dim.	Valor Original	Valor Reconstruido (mm)			Media (mm)	Error (%)
			R1	R2	R3		
Primero	X	65.00	65.83	65.83	65.82	65.83	1.28
	Z		66.30	66.31	66.31	66.31	2.02
Segundo	X	50.00	50.85	50.85	50.85	50.85	1.70
	Z		51.71	51.73	51.68	51.71	3.42
Tercero	X	35.00	35.91	35.90	35.90	35.90	2.57
	Z		36.93	36.93	36.93	36.93	5.51

Tabla 5.14 Comparación del valor de Y en las tres reconstrucciones

Valor Original (Y)	Valor Reconstruido (mm)			Media (mm)	Error (%)	Desviación (mm)
	R1	R2	R3			
304.40	305.44	305.58	305.49	305.50	0.36	0.07

Analizando los resultados, el mayor error se encuentra sobre el eje Z, que es el eje vertical. Este error puede deberse a la resolución vertical de la cámara o a la precisión del centro de la línea, que viene dada por los algoritmos de umbral adaptativo y *CDG*. Siguiendo con el eje X, eje que mide la profundidad, tiene un error por debajo de un milímetro, pero un error absoluto mayor. Es decir, considerando que la medida original son 65mm, 0.8mm suponen mayor porcentaje que en el caso del eje Y (Ídem para el resto de escalones). A pesar de esto, se trata de un buen resulta influenciado por factores como un correcto ángulo de triangulación o la propia la forma cilíndrica de la pieza sin grandes saltos abruptos. Finalmente, el menor error se sitúa sobre el eje Y. Al medir entre caras, se puede obtener un error absoluto del 0.39%. A diferencia de los otros dos ejes que dependen de la triangulación y la propia imagen, el resultado en Y confirma la precisión alcanzada

Tabla 5.15 Diferencias absolutas de X,Y,Z en las tres reconstrucciones

Escalón	Dim.	Diferencia (mm)		
		R1	R2	R3
Primero	X	0.83	0.83	0.82
	Z	1.30	1.31	1.31
Segundo	X	0.85	0.85	0.85
	Z	1.71	1.73	1.68
Tercero	X	0.91	0.90	0.90
	Z	1.93	1.93	1.93
Total	Y	1.04	1.18	1.09

con el movimiento el motor y la captura sincronizada de las imágenes explicada en 5.3.3, confirmando un giro controlado y consistente de 0.1° por paso (en un corto período de tiempo).

Como dato final, este objeto tiene en torno a más de 4.100.000 puntos por reconstrucción y un peso de unos 100MB por cada *figure*.

Es posible pensar que al haber calibrado el sistema con el cilindro anterior, la precisión pueda llegar a deberse a que la reconstrucción está hecha para ese objeto. Para no caer en ese error, se reconstruyeron varios objetos más, siendo el siguiente objeto cilindro de ajuste para regular la altura del plano láser de la figura 5.7. Sus medidas se muestran en la figura B.10

Siguiendo el mismo principio del objeto anterior aunque algo distinto, esta vez se toman medidas desde un punto cercano al origen y se mide el valor máximo en X,Z. El valor de Y debe medirse manualmente al incluirse la mordaza en la imagen y no poderse obtener con la precisión requerida de manera automática. Las figuras B.11 y B.12

Los valores en Y se muestran en las figuras B.13 y B.14

Las tablas 5.16 y 5.17 muestran los resultados de las reconstrucciones del cilindro de ajuste.

Tabla 5.16 Comparación de medidas del cilindro de ajuste del láser

Dim.	Valor Original	R1	R2	Error (%)	
				R1	R2
X	20.00	20.0217	20.0020	0.11	0.01
Y	315.00	316.0767	315.0163	0.34	0.01
Z	20.00	20.0276	20.0276	0.14	0.14

Estos resultados son aún mejores que los del cilindro de calibración. Es posible que sea por tratarse de un cilindro casi perfecto, aunque se le añadió la cara plana y los perforados

Tabla 5.17 Diferencias absolutas en las medidas del cilindro de ajuste del láser

Dim.	Diferencia (mm)	
	R1	R2
X	0.0217	0.0020
Y	1.0767	0.0163
Z	0.0276	0.0276

traseros, entre otros motivos, para poder evaluar cómo afectaría este tipo de características a la reconstrucción. Con la continuidad inherente a su forma, no se producen oclusiones ni bordes abruptos que puedan dar lugar a una medida menos precisa. De esta forma se puede obtener casi la medida exacta, con la diferencia de valores en el eje Y. Esta medida, que destaca con una diferencia de hasta 1 mm, seguramente es debida a la toma manual de los datos.

Estas reconstrucciones cuentan con nubes de más de 4.800.000 puntos y un peso de unos 132MB por cada *figure*.

Para el siguiente objeto se escogió entonces un destornillador típico para reconstruir su mango, cuyo radio mayor son 32 mm y su longitud 100 mm. Los resultados se muestran en las figuras B.16, B.17 y en las tablas 5.18 y 5.19

Tabla 5.18 Comparación de medidas del destornillador

Dim.	Valor Original	R1	R2	Error (%)	
				R1	R2
X	16.80	16.74859	16.64487	0.31	0.92
Y	100.00	99.0299	99.0299	0.97	0.97
Z	16.80	16.57526	16.53413	1.34	1.58

Tabla 5.19 Diferencias absolutas en las medidas del destornillador

Dim.	Diferencia (mm)	
	R1	R2
X	0.05141	0.15513
Y	0.9701	0.9701
Z	0.22474	0.26587

En esta ocasión, al tratarse de un objeto más pequeño, son nubes de poco más de 1.5000.000 puntos.

Finalmente, era necesario intentar reconstruir un objeto que pusiese a prueba el sistema. Para ello, se reconstruyó un objeto metálico ya que hasta ahora todos los objetos

tenían un buen comportamiento ante la luz incidente. Las medidas son 8.2mm de diámetro mayor y 42 mm de longitud. Los resultados se muestran en las figuras B.19, B.20 y en las tablas 5.20 y 5.21

Tabla 5.20 Comparación de medidas del centrador

Dim.	Valor Original	R1	R2	Error (%)	
				R1	R2
X	4.10	4.8822	5.2019	19.08	26.87
Y	42.00	41.3811	42.0023	1.47	0.01
Z	4.10	4.3356	4.7530	5.75	15.93

Tabla 5.21 Diferencias absolutas en las medidas del centrador

Dim.	Diferencia (mm)	
	R1	R2
X	3.3178	2.9981
Y	0.6189	0.0023
Z	3.8644	3.4470

Estos resultados revelan algunas conclusiones importantes.

1. En primer lugar, en esta ocasión hay mucho más error en los ejes X,Z que en el resto de objetos. Estos valores se producen principalmente porque el código para calcular el radio busca el valor más alto en cada eje dado un rango en Y predeterminado, pero estos valores atípicamente altos revelan que se están produciendo reflejos por culpa del material. Estos reflejos provocan brillos que en el sensor de la cámara se traducen en el mayor pico de intensidad para esa columna, degenerando en que la extracción de la línea láser dé una coordenada errónea con la correspondiente disminución de la precisión. Una forma de entenderlo visualmente es fijándose en la figura 5.61. Al contrario que el resto de objetos que generaban una forma suave y bien definida, alrededor del cuerpo principal del centrador metálico hay una nube de puntos que sobresale por encima en toda su longitud. Esta nube se debe precisamente a la reflectividad del material que provoca esos brillos.

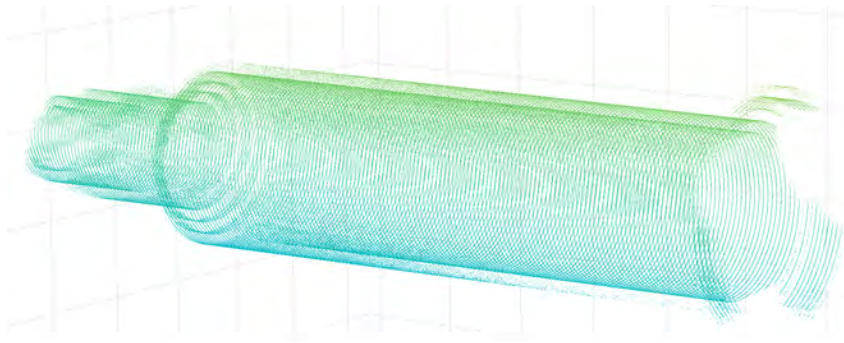


Figura 5.61 Problema de brillos en objeto metálico

2. Los errores en el eje Y no son casualidad. A pesar de que las mediciones son manuales, la diferencia entre ambos se explica porque en la primera reconstrucción no había exactamente 3600 fotos y en la siguiente sí. Esto indica que el sistema no fue capaz de capturar correctamente todos los giros de la pieza, provocando que entre alguno de los pasos y su siguiente no hubiese 0.1° de giro. De esta forma se confirma la importancia del sincronismo entre el giro de la pieza y la captura de la imagen.

Conclusiones y evaluación de impactos

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos, atendiendo a cada uno de los objetivos e hitos marcados con el fin de evaluar el estado final alcanzado.

6.1. Análisis de los resultados

El diseño y fabricación del primer prototipo permitió realizar pruebas fundamentales para comprender algunos aspectos de la visión tridimensional.

1. En primer lugar, fue clave para comprobar qué componentes eran necesarios. Partiendo de un láser de bajo coste, fue posible realizar las pruebas para estar en disposición de adquirir un láser de mayor presupuesto, pero que garantizase la calidad de la línea. Una vez adquirido, se pudo comparar uno frente al otro verificando lo estudiado en teoría y poniéndolo en práctica. También sirvió para probar las diferentes funciones de la cámara y comprobar cual sería el mejor ángulo de triangulación para esta aplicación. La óptica no resultó ser la correcta, pero precisamente parte del proceso era realizar estas comprobaciones.
2. Sentó las bases de la programación de los futuros algoritmos que se acabarían empleando, especialmente en la calibración de los parámetros intrínsecos. Con algunas mejoras, este archivo sirvió en el diseño final para calibrar la cámara. También fue útil para mover el motor, controlar la cámara y sincronizar el disparo.
3. Dejó claro que la parte de la visión era importante, pero igual de importante era el diseño mecánico. Sin una estructura fuerte y robusta que garantizase la posición de cada elemento con cero holguras y vibraciones, no iba a ser posible obtener ningún tipo de resultado coherente. Además, allanó el camino hacia el diseño de un mejor elemento de calibración.

En general, con este primer prototipo no se obtuvieron resultados propiamente dichos de una reconstrucción tridimensional, pero este sistema más sencillo contribuyó enormemente al desarrollo del proyecto llegando a cumplir los cuatro primeros objetivos marcados.

Con los fallos y virtudes del primer prototipo, la decisión de restaurar un torno que estaba para reciclar parecía evidente, aún sabiendo que conllevaría un incremento de tiempo y presupuesto. Aunque sin tener una certeza clara de que sería el camino correcto, se demostró que era exactamente lo que se necesitaba para realizar un sistema de visión tridimensional a pequeña escala. De este sistema final, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Tener un sistema mecánicamente bien ajustado garantiza la **concentricidad**. En la prueba 5.42 se pudo verificar que la pieza giraba junto con el motor sin un error notable, confirmando que la elección del torno solventaba los problemas mecánicos del primer prototipo.
2. Aunque el cálculo exacto de la relación de poleas no fue inmediato debido a que no era posible medir con precisión sus diámetros, los cálculos explicados en 5.3.3 junto con las pruebas realizadas confirmaron un movimiento fino del motor que se compensaba en cada paso. Los resultados obtenidos en 5.3.8 demuestran que no hay forma de obtener una reconstrucción precisa sin una **sincronización** exacta entre el movimiento de la pieza y la captura de dicho movimiento.
3. Los **algoritmos subpixel** mejoran la precisión del sistema por norma general, pero siempre que se escojan de manera acorde a la imagen obtenida.
4. La **calibración** del sistema es la base de una buena reconstrucción. Por norma general, las imágenes siempre van a tener algún tipo de distorsión. Comprender qué significa cada componente de la matriz de calibración y el vector de distorsión será clave para saber si los resultados obtenidos están o no dentro de lo esperado. Por otro lado, el problema de mínimos cuadrados para la reconstrucción tridimensional es un problema mal condicionado por naturaleza. Un elemento de calibración con un mal diseño, añadirá ruido y empeorará el condicionamiento del problema, degenerando en grandes errores en la matriz de homografía. Más puntos induce menor error, siempre que estén correctamente distribuidos.
5. La **extracción de la línea láser** resultó ser mejorable. La precisión alcanzada por el sistema en el eje Z, encargado de la posición vertical de la línea, es aceptable pero no la suficiente para este tipo de sistemas. Aunque depende del tipo de pieza y material a escanear, por norma general, es el eje con mayor error, lo cual indica que las coordenadas obtenidas por los algoritmos de umbral adaptativo combinado

con *CDG* podrían refinarse para ser menos sensibles al ruido. Este error se acentúa tanto en este eje, como también en el eje X, cuando se trata de piezas metálicas que producen mayor grado de reflejo especular.

6. La **velocidad** de escaneado mínima es de 47 segundos. Es un buen dato si se compara con los ocho minutos iniciales cuando el disparo era mediante *software*, aunque es insuficiente si este sistema se quisiera utilizar en una máquina con un tiempo de tiempo ya establecido como se mencionaba al principio del documento. No obstante, las diferentes pruebas han comprobado que en cuanto a la adquisición de imágenes la mayor limitación la establece la tasa de *FPS* de la cámara, por lo que si se estuviese en condiciones de sacrificar parte de su resolución, sería posible aumentar la tasa de FPS hasta los límites necesarios para asegurar que no parase la producción en una situación real. Respecto al procesamiento y sin descartar mejoras en los algoritmos, el propio ordenador con el que fue programado todo el sistema es el cuello de botella. Normalmente, a nivel industrial se utilizan ordenadores mucho más potentes optimizados principalmente a tareas de visión. Aún así, la mayoría del código ha tratado de sacar el máximo partido utilizando por ejemplo bucles paralelos para aprovechar todos los núcleos del procesador, o declarando variables de manera que consuman menos recursos con *uint8_t*.

Comparando los resultados de 5.3.8 con los obtenidos en otros documentos como por ejemplo [16], donde se obtenían precisiones de 0.8 a 1.45mm, o la obtenida en [2] a la décima de milímetro, sumado además a que las tolerancias geométricas de las piezas del capítulo 1 eran de hasta $\pm 3\text{mm}$, es posible estar en condiciones de afirmar que este sistema podría alcanzar la precisión suficiente para el control de calidad, aunque fuera de producción debido a su tiempo de escaneado. Serviría por ejemplo para que el control en maqueta, en lugar de realizarse manualmente, se situase la pieza y, al validar por parte del usuario, devolvería una nube de puntos que un *software* aparte podría evaluar.

6.2. Evaluación de impactos

En esta sección se discuten los distintos tipos de impactos que implica la implementación del torno final como sistema de reconstrucción tridimensional para el control de calidad. Finalmente, se presenta la opinión del autor acerca de la contribución de este proyecto en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

6.2.1. Impacto socio-económico

El precio establecido en el anexo D incluye las horas de trabajo del autor, pero si se compara el coste total del material utilizado frente al coste de los dispositivos comerciales

presentados en 3, es posible observar cómo un proyecto de este tipo supone un ahorro económico importante, abriendo la puerta a que cualquier persona interesada sea capaz de replicar o mejorar este sistema.

6.2.2. Impacto ambiental

Este trabajo siempre tuvo en mente el uso de la mínima cantidad de materiales para su desarrollo. Aún cuando se descartó el primer prototipo, sus partes fueron reaprovechadas en el sistema final. Salvar al torno de un destino en el vertedero es un buen ejemplo de economía circular.

Por otro lado, tener que imprimir varios cilindros de calibración con tanto soporte iba en contra del principio medioambiental de este trabajo. Si bien es cierto que estos soportes se trituran y se funden de nuevo para no desperdiciar material, suponía un consumo de energía innecesario. La solución de presupuesto, tiempo y ambiental vino con el cilindro modular de calibración. No sólo fue útil para comprobar una buena distribución de puntos, sino que su diseño permitía imprimirse directamente sin soportes.

6.2.3. Aspectos legales y éticos. Estándares de aplicación.

Debido a que se utiliza un láser, este sistema requiere cumplir medidas de seguridad específicas que siguen una normativa como el uso de gafas protectoras o incluso señalización y protocolos de seguridad en el área de trabajo. Por otro lado, utilizar software como MatLab® o SolidWorks® requieren de estar en posesión de sus respectivas licencias para poder utilizarlos. Respecto al contenido en sí de este *TFM*, a nivel legal puede incurrirse en derechos sobre el diseño y desarrollo del sistema.

Respecto a los estándares del proyecto, utiliza el estándar GigeVision para la interfaz de la cámara, EMVA1288 para su caracterización, montaje estándar de tipo CS y estándar IEEE 802.3af/at para alimentación *Power over Ethernet*.

6.2.4. Contribución a los ODS de la agenda mundial 2030

Este proyecto da lugar a una contribución significativa a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (*ODS*) establecidos en la agenda 2030. En primer lugar, este *TFM* cumple con el objetivo **ODS4** al proporcionar una metodología detallada que puede utilizarse en ambientes educativos. Seguidamente, cumple con el objetivo **ODS8** puesto que se trata de tecnología que permite mejorar la productividad industrial y generar empleos especializados. También cumple con el objetivo **ODS9** debido a que se trata de un trabajo sobre el desarrollo de tecnología industrial accesible y precisa, fomentando la innovación mediante el uso de equipo antiguos. Finalmente, cumple con el objetivo **ODS12** a través de la reutilización de equipo industrial y la gestión responsable de residuos.

6.3. Trabajos futuros

Se proponen las siguientes mejoras del sistema para futuros proyectos:

1. Diseño de una *PCB* todo en uno con los siguientes requisitos:
 - Rectificador de corriente que transforme la tensión de entrada alterna en continua con fusibles de protección. Debe incluir un conector adecuado para que sea *pug and play*. De esta forma no sería necesario una fuente externa.
 - Circuito de entradas y salidas integrado para el control de la cámara y el motor.
 - Bornas para incluir el NodeMCU o diseño del circuito para directamente integrar los mismos componentes en la placa bajo el esquema de conexiones del mismo NodeMCU.
 - Debe incluir leds de estado para controlar visualmente las señales.
 - Debe incluir fila de bornas que den corriente continua regulable y otra fila que sirva como entrada. Así se podría alimentar el láser y añadir sensores.
2. Programación de una rutina de *home* para que el sistema arranque siempre desde el mismo punto. También sería posible la implementación de una dinámica de control del motor con sensores tipo acelerómetros conectados al NodeMCU que puedan añadirse a la pieza. De esta forma, el comienzo de cada reconstrucción sería a nivel en el eje Y. Si se quisiera conseguir el mismo efecto en el resto de ejes, sería necesario mejorar la parte mecánica y añadir más motores que controlen las inclinaciones en estos ejes.
3. Mejorar la precisión del sistema, con especial atención a los algoritmos de extracción de la línea láser. Sería interesante por ejemplo utilizar técnicas de *machine learning* para el refinamiento de la precisión. Utilizando diferentes imágenes etiquetadas de la línea láser en diferentes condiciones de iluminación, la red neuronal aprendería a diferenciar por ejemplos reflejos o imperfecciones.
4. Desarrollo de un instalable (o portable) con el programa del sistema para poder reconstruir en cualquier dispositivo sin necesidad de software externo. Este programa debe incluir una interfaz de usuario amigable que permita elegir una carpeta de guardado y devuelva la nube de puntos resultante.
5. Mejora en la adquisición de las imágenes para que se recojan por el dispositivo de manera más automatizada.
6. Mejora en la implementación mecánica, sustituyendo los perfiles de aluminio por tubos con posiciones ya definidas para evitar posibles movimientos del sistema.

7. Implementación de algoritmos de autocalibración. De esta forma no es necesario que el usuario final tenga conocimientos técnicos de visión.

6.4. Reflexión

Aunque no es tradicional añadir este apartado, si has llegado hasta aquí y actualmente estás tratando de desarrollar algún tipo de proyecto, bien sea personal o académico, simplemente quería hacer una reflexión sobre ello; no va a salir a la primera, lo más normal es fallar varias veces. La ingeniería es así. Se pueden hacer cálculos y pruebas, y aún así es normal fallar. Eso no significa haber fracasado, simplemente que se necesita volver al papel y pensar de nuevo cómo solucionarlo. Con este *TFM* y todas sus pruebas, en cierta forma, quise hacer ver precisamente que hay que seguir hasta conseguirlo. Los resultados que puse son el fin del camino para cada hito pero, para que se entienda mejor, las figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 muestran algunas de las reconstrucciones antes de los resultados finales.

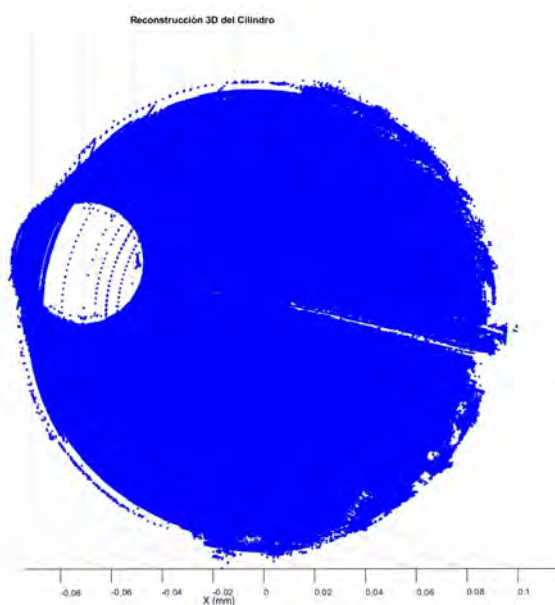


Figura 6.1

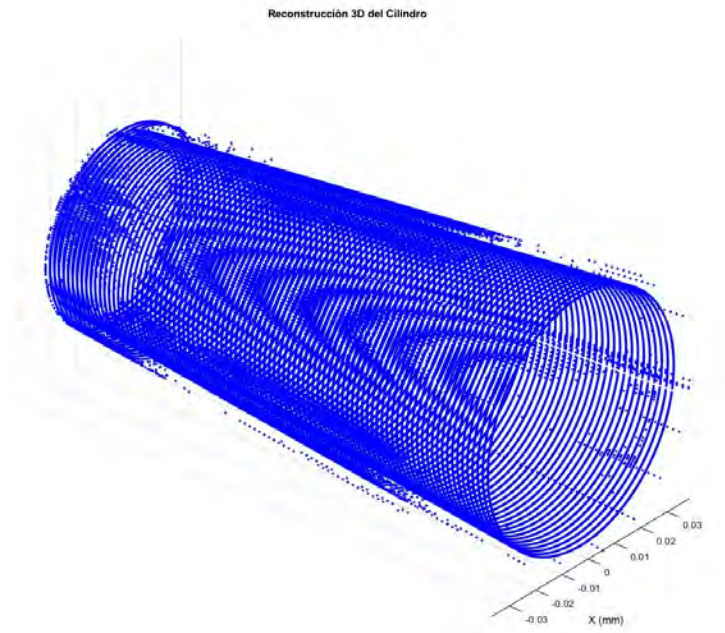


Figura 6.2

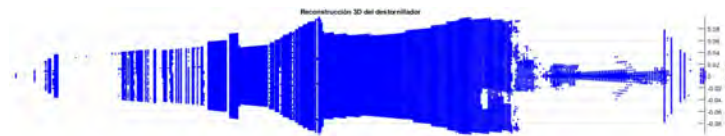


Figura 6.3

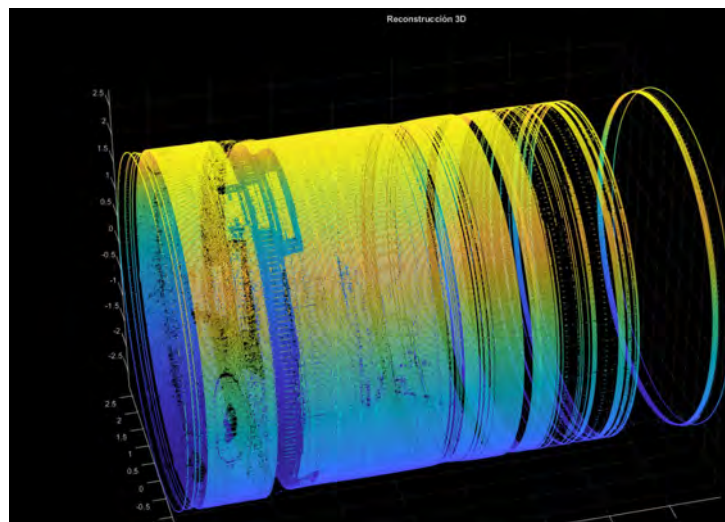


Figura 6.4

Evidentemente, todas estaban lejos de la precisión que necesitaba alcanzar. ¡Ánimo!

Bibliografía

Normativa de aplicación al trabajo: numérica.

- [1] BesTech. *3 Reasons To Use Blue Over Red Lasers in Displacement Measurement*. 2023. URL: <https://www.bestech.com.au/blogs/3-reasons-to-use-blue-over-red-lasers-in-displacement-measurement/>.
- [2] A. G. Blanco. “Adquisición y Modelado Tridimensional en Visión Artificial Mediante Técnicas de Luz Estructurada”. Tesis doct. Universidad Politécnica de Madrid, 1999.
- [3] S. Corporation. *IMX273 1/2.9-type CMOS Image Sensor Datasheet*. Technical Documentation E12905. Tokyo, Japan: Sony Semiconductor Solutions Corporation, 2023.
- [4] E. Cuesta, P. Fernández, C. Rico, B. Álvarez y D. Fernandez. “Aplicaciones Metrologicas y de Ingenieria Inversa de los laseres por triangulacion”. En: 284 (sep. de 2005), págs. 59-73.
- [5] E. Davies. *Computer and Machine Vision. Theory, Algorithms, Practicalities*. Academic Press, 2012.
- [6] S. Domínguez. *Visión por computador*. UPM, 2017.
- [7] S. Foix, G. Alenyà y C. Torras. “Lock-in Time-of-Flight (ToF) cameras: A survey”. En: *Sensors Journal, IEEE* 11 (oct. de 2011), págs. 1917 -1926. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2101060.
- [8] J. Forest, J. Salvi, E. Cabruja y C. Pous. “Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach”. En: *Proceedings - International Conference on Pattern Recognition* 3 (ene. de 2004). DOI: 10.1109/ICPR.2004.528.

- [9] K. Ghany, H. Elgazzar y M. Newishy. “Using a Nd:YAG laser and six axes robot to cut zinc-coated steel”. En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28 (mayo de 2006), págs. 1111-1117. DOI: 10.1007/s00170-004-2468-x.
- [10] P. Gil, T. Kisler, G. García, C. Jara y J. Corrales. “Calibración de cámaras de tiempo de vuelo: Ajuste adaptativo del tiempo de integración y análisis de la frecuencia de modulación”. En: *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 10.4 (oct. de 2013), 453–464. DOI: 10.1016/j.riai.2013.08.002. URL: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9503>.
- [11] T. F. I. I. S. Inc. *EMVA 1288 Imaging Performance: Blackfly S BFS-PGE-16S2*. Technical Documentation. EMVA Standard Compliant. Teledyne FLIR, jun. de 2023.
- [12] N. Instruments. *Calcular la Resolución del Sensor de la Cámara y la Longitud Focal del Lente*. URL: <https://www.ni.com/es/support/documentation/supplemental/18/calculating-camera-sensor-resolution-and-lens-focal-length.html>.
- [13] M. H. Jones. *Tableros de ajedrez para la calibración de parámetros intrínsecos*. URL: <https://markhedleyjones.com/projects/calibration-checkerboard-collection>.
- [14] T. F. LLC. *Blackfly S BFS-PGE-16S2: Small Package, Powerful Results*. VN: 21-0687-OEM-BFS-PGE-16S2-LTR. Ver. Rev. 05/11/21. Teledyne FLIR. Mayo de 2021.
- [15] J. S. y L.M. Jiménez. *Técnicas Avanzadas de Visión por Computador*. UPM, 2024.
- [16] J. M. Meré. “Técnicas de visión por computador para la reconstrucción en tiempo real de la forma 3D de productos laminados”. Tesis doct. Universidad de Oviedo, 2008.
- [17] F. M. S. Moreno. “Reconstrucción Tridimensional de Escenas con Iluminación Láser: Aplicaciones a la Fotogrametría Industrial”. Tesis doct. Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- [18] Óscar Reinoso García. “Análisis y generalización de algoritmos de visión artificial con precisión subpixel”. Tesis doct. Universidad Politécnica de Madrid, 1996.
- [19] J. F. V. Serrano, A. M. Díaz, A. S. Calle y J. E. Sánchez-Marín. *Visión por computador*. DYKINSON, 2003.
- [20] UPV. *Tipos de láser*. URL: https://www.spr1.upv.es/IOP_RF_01\%28a\%29.htm.
- [21] Wikipedia. *Wikipedia*. URL: www.wikipedia.org.

Láminas de resultados

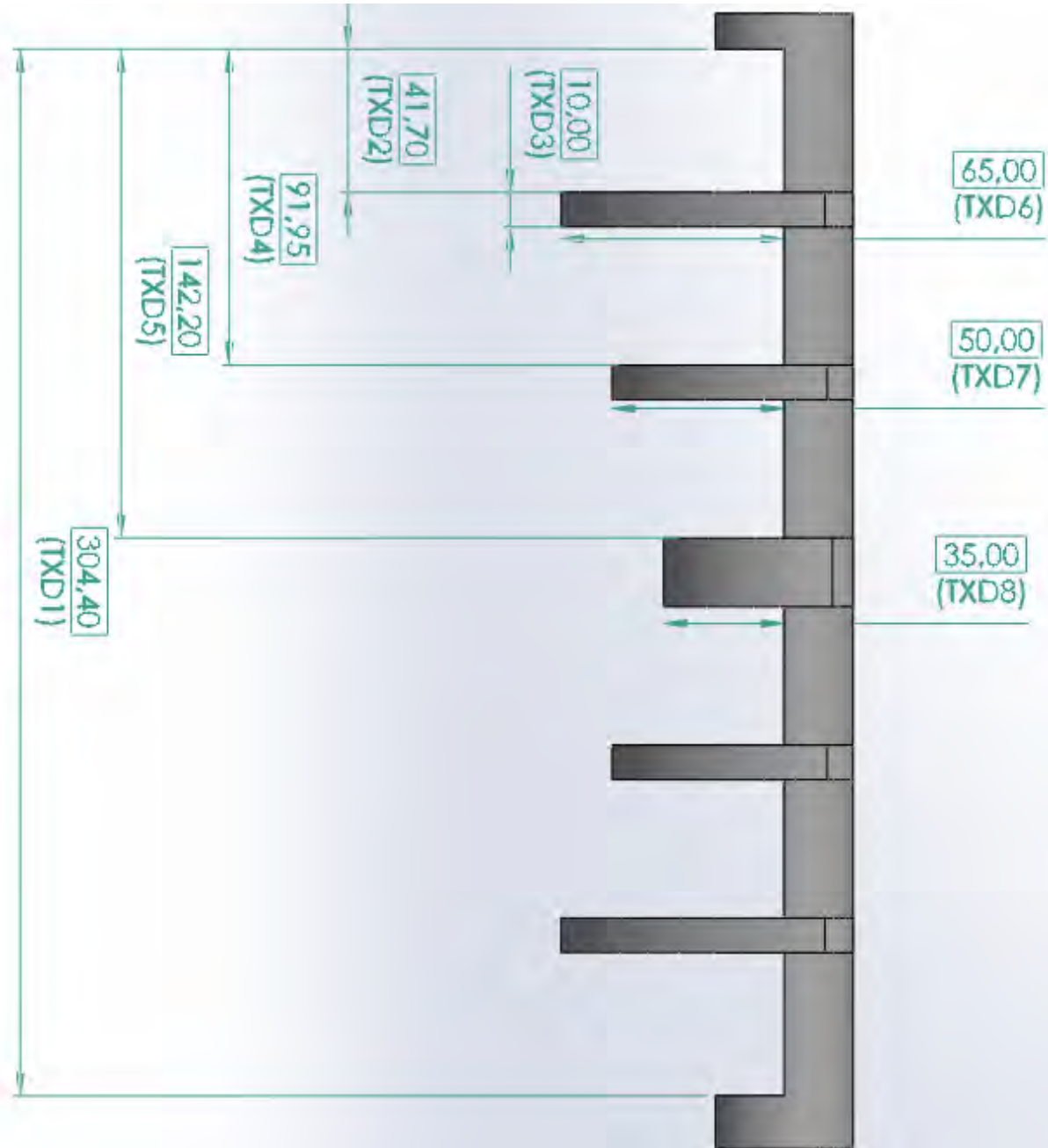


Figura B.1 Medidas del cilindro de calibración final

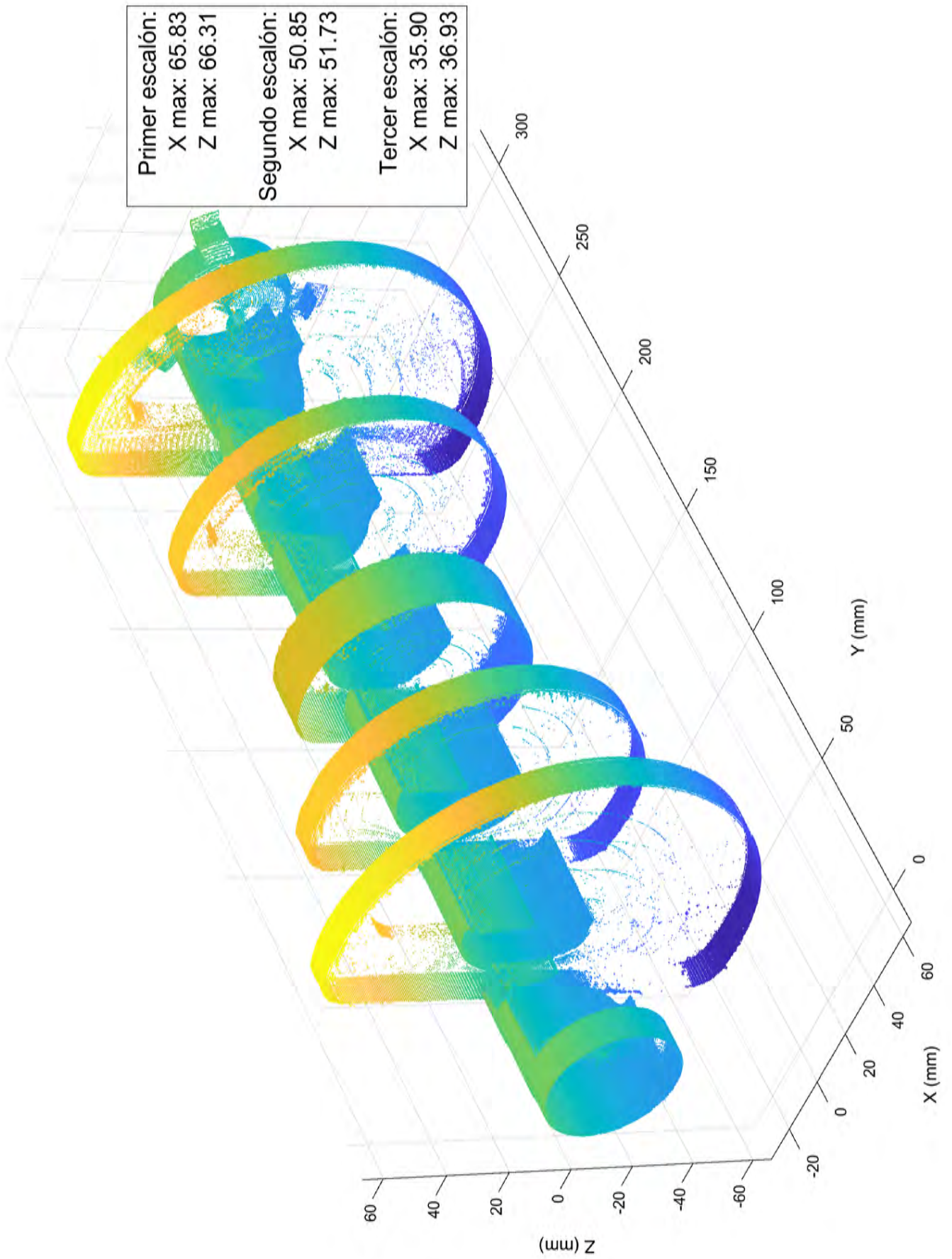


Figura B.2 Primera reconstrucción tridimensional del cilindro de calibración final

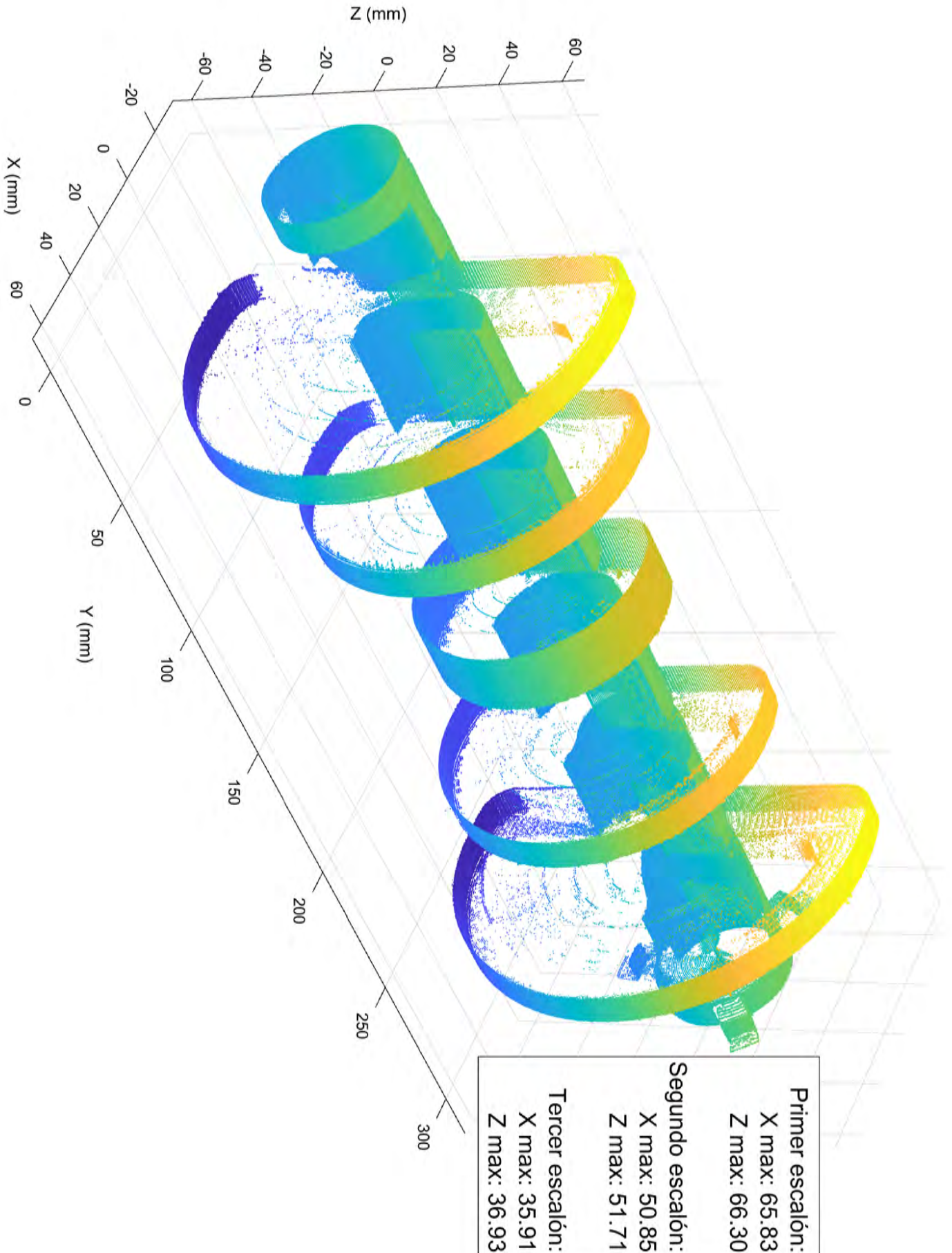


Figura B.3 Segunda reconstrucción tridimensional del cilindro de calibración final

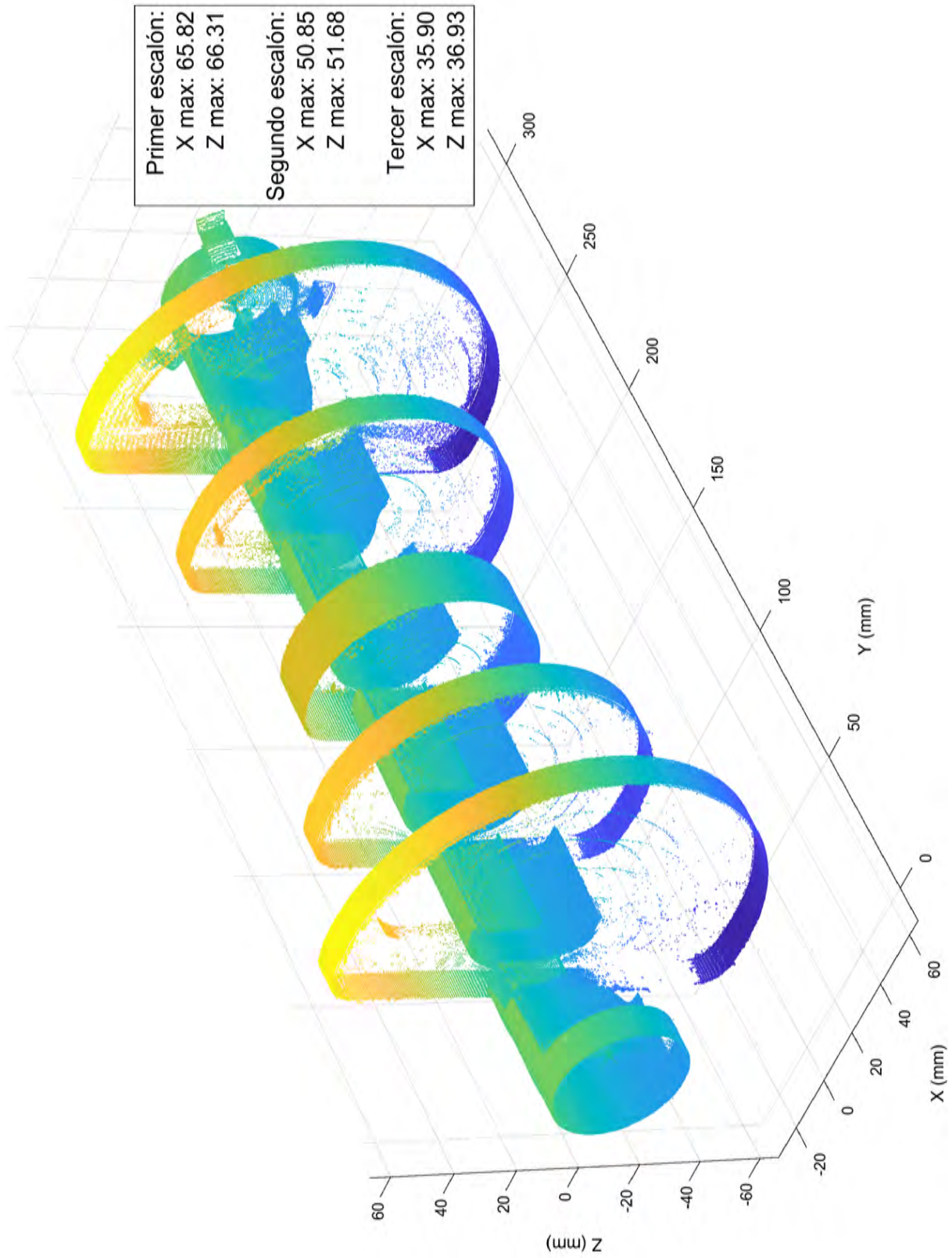


Figura B.4 Tercera reconstrucción tridimensional del cilindro de calibración final

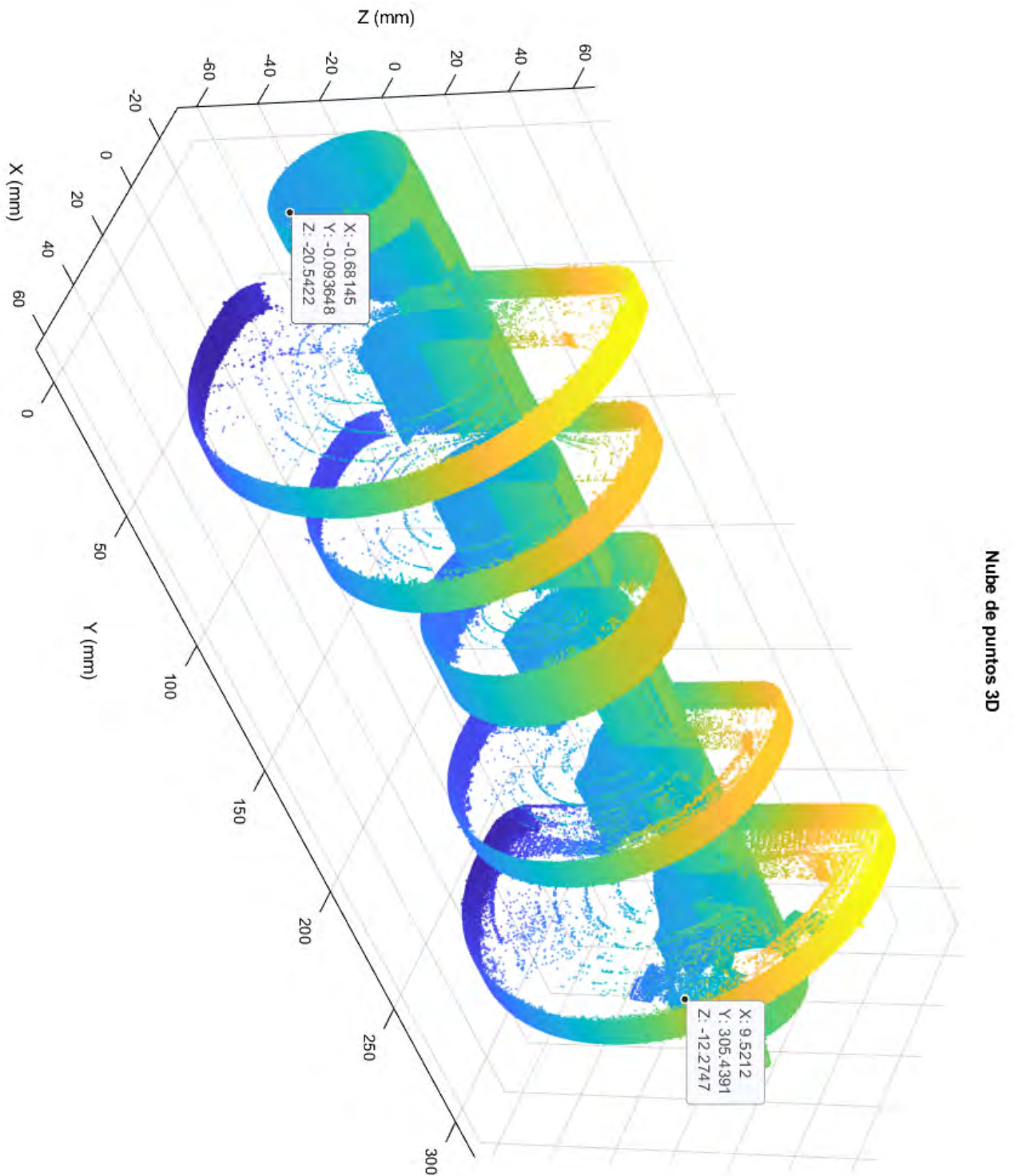


Figura B.5 Medida en el eje Y de la primera reconstrucción del cilindro de calibración

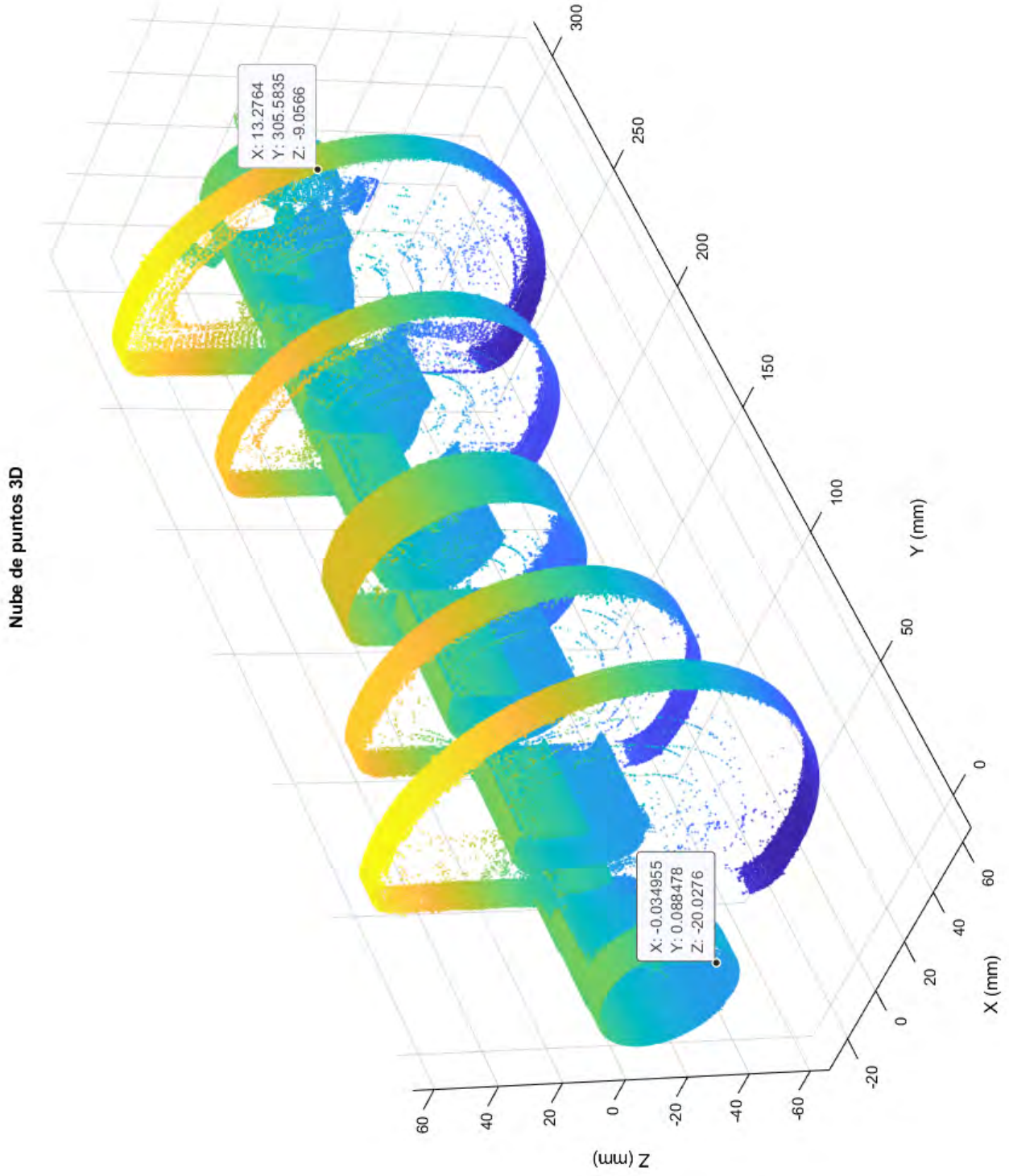


Figura B.6 Medida en el eje Y de la segunda reconstrucción del cilindro de calibración

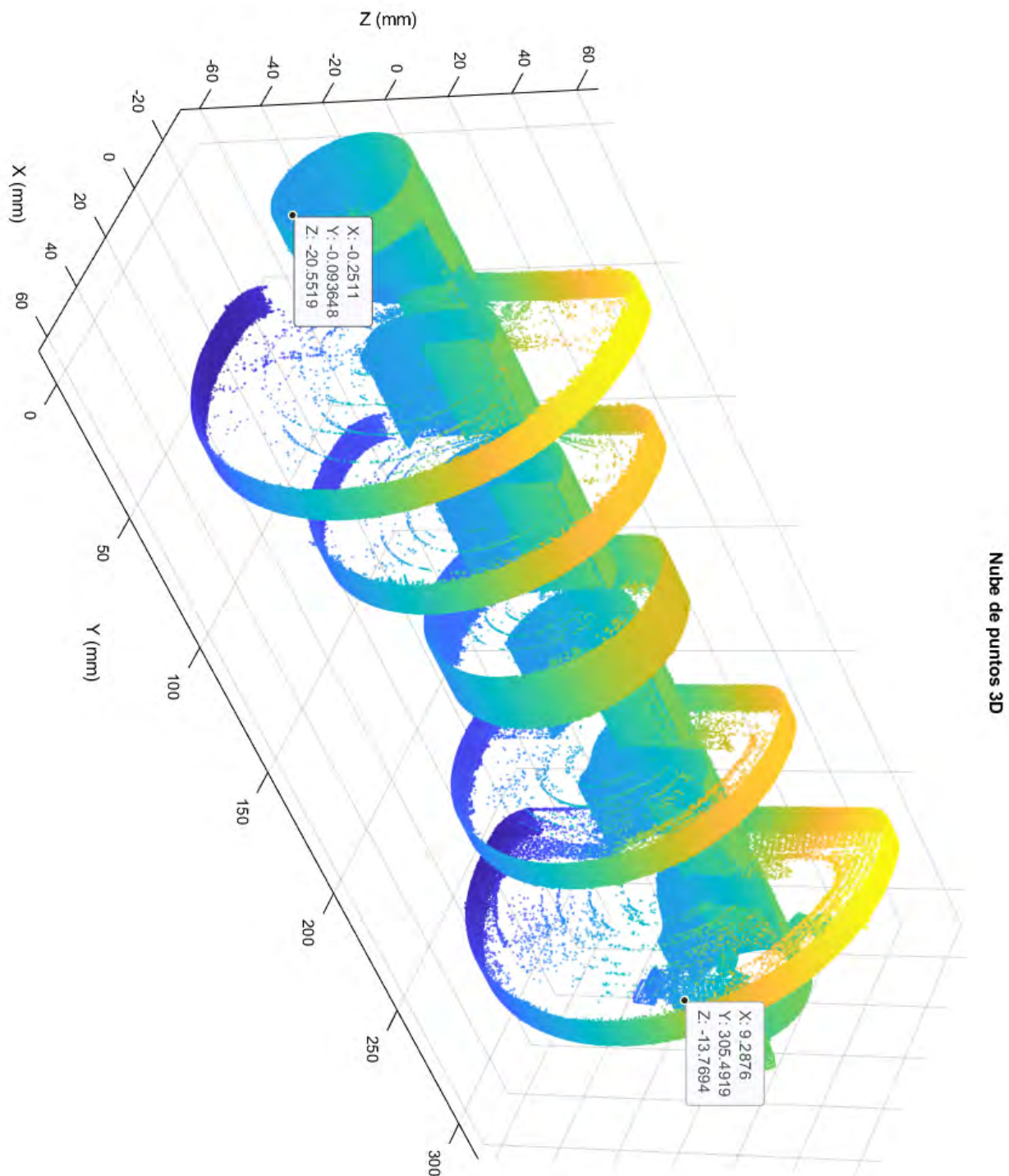


Figura B.7 Medida en el eje Y de la tercera reconstrucción del cilindro de calibración

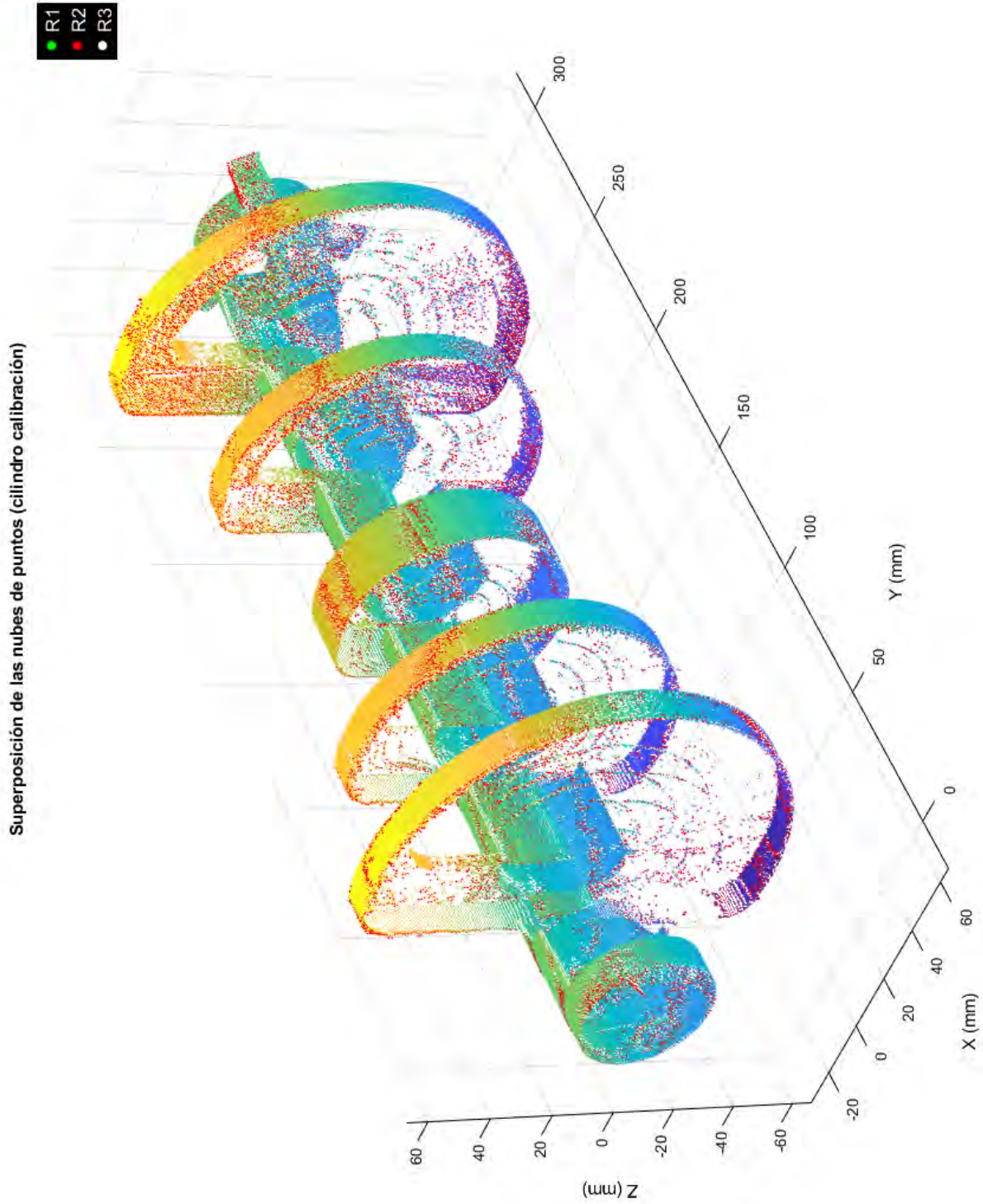


Figura B.8 Superposición de puntos del cilindro de calibración

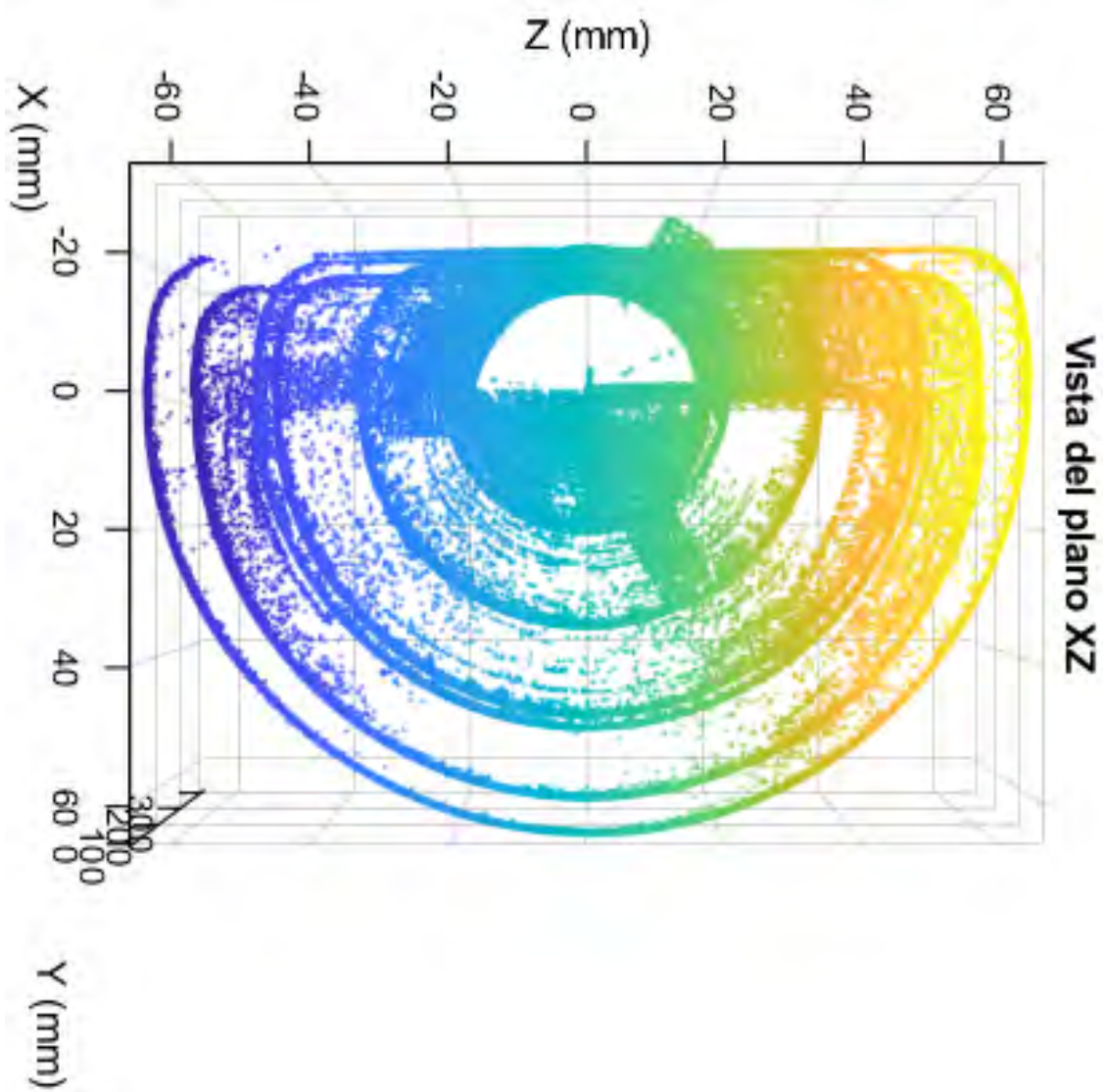


Figura B.9 Vista del plano XZ del cilindro de calibración

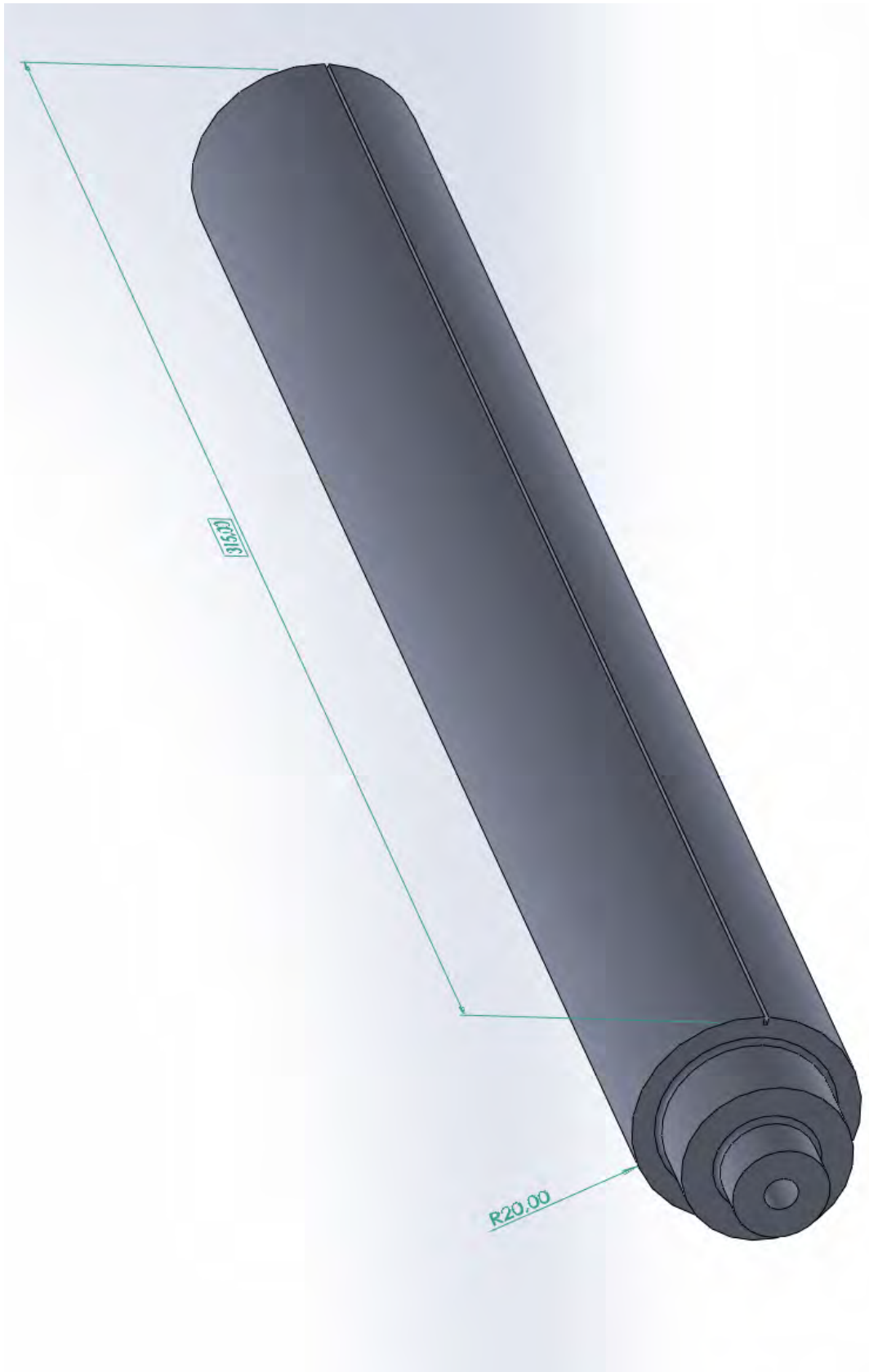


Figura B.10 Dimensiones del cilindro de ajuste para regular la altura del plano láser

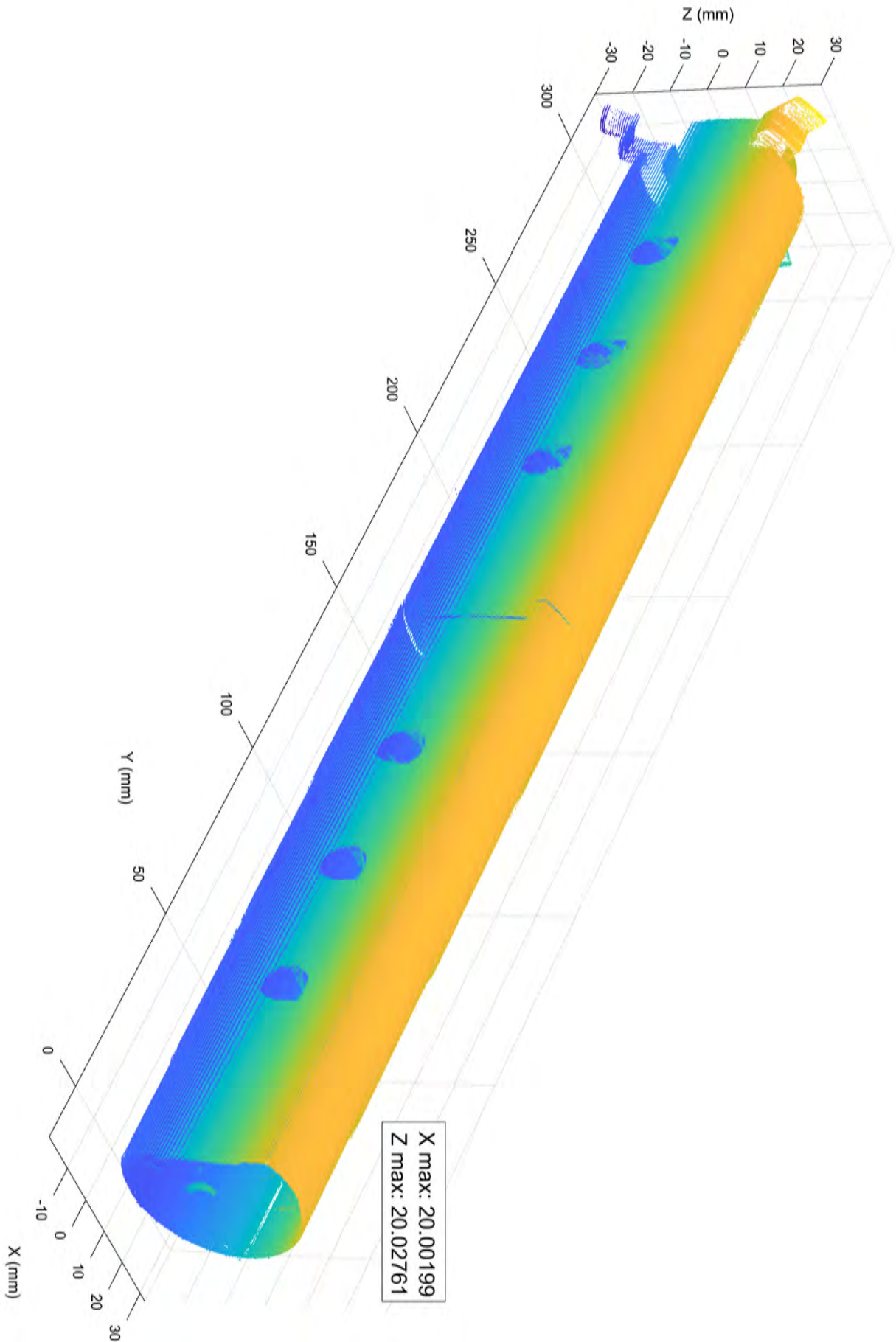


Figura B.11 Primera reconstrucción tridimensional del cilindro de ajuste del plano láser

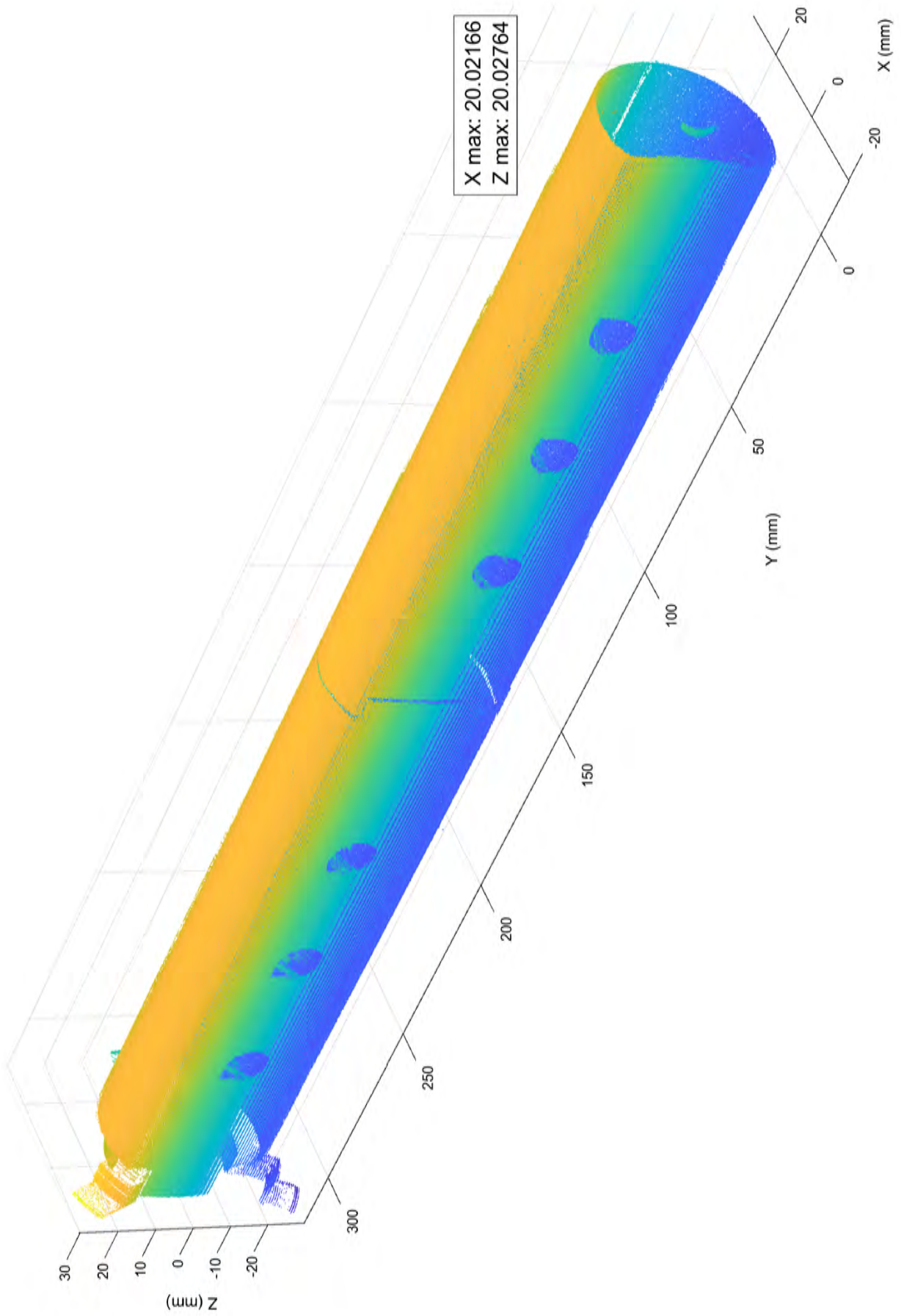


Figura B.12 Segunda reconstrucción tridimensional del cilindro de ajuste del plano láser

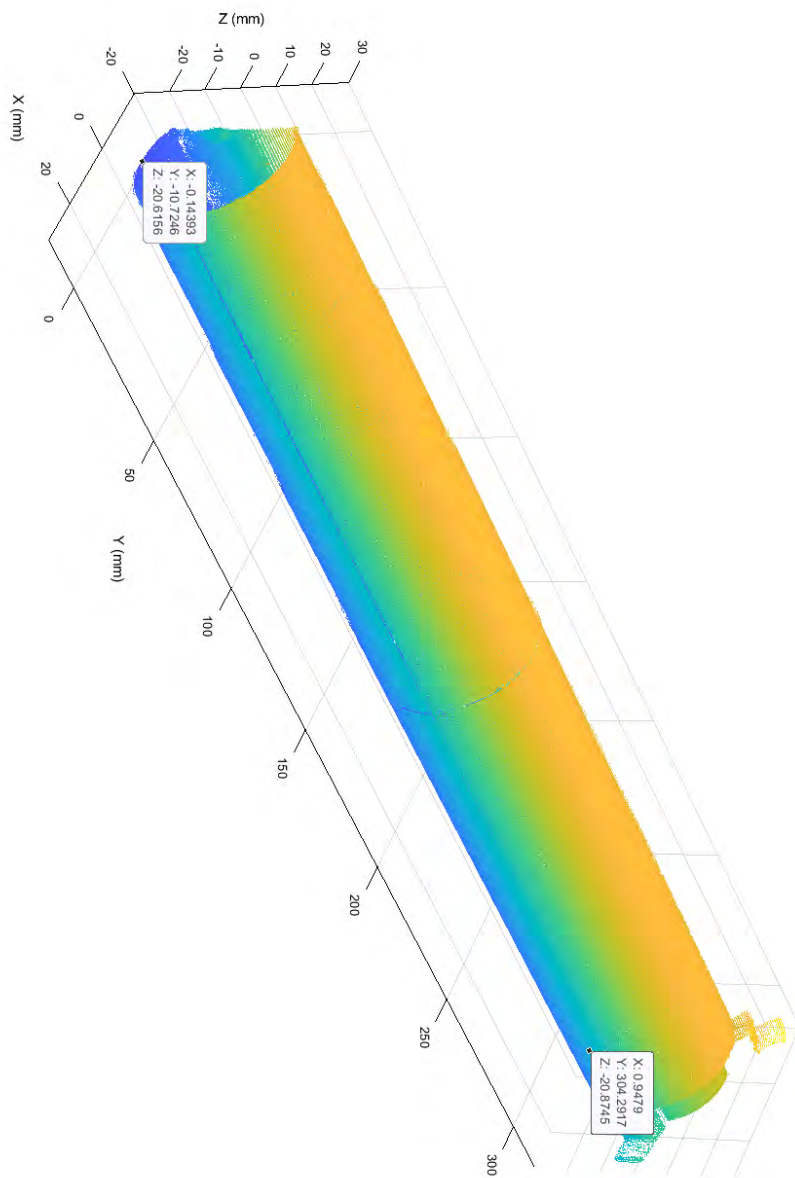


Figura B.13 Medida en el eje Y de la primera reconstrucción del cilindro de ajuste del plano láser

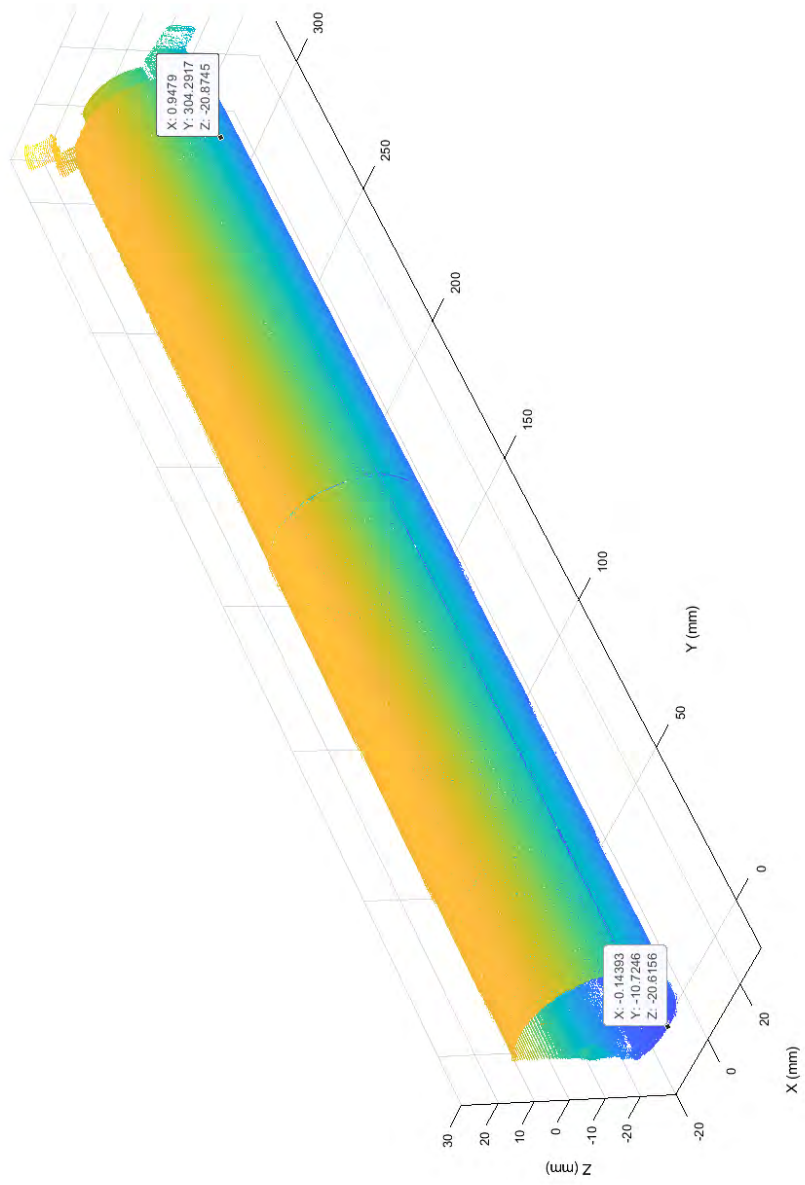


Figura B.14 Medida en el eje Y de la segunda reconstrucción del cilindro de ajuste del plano láser

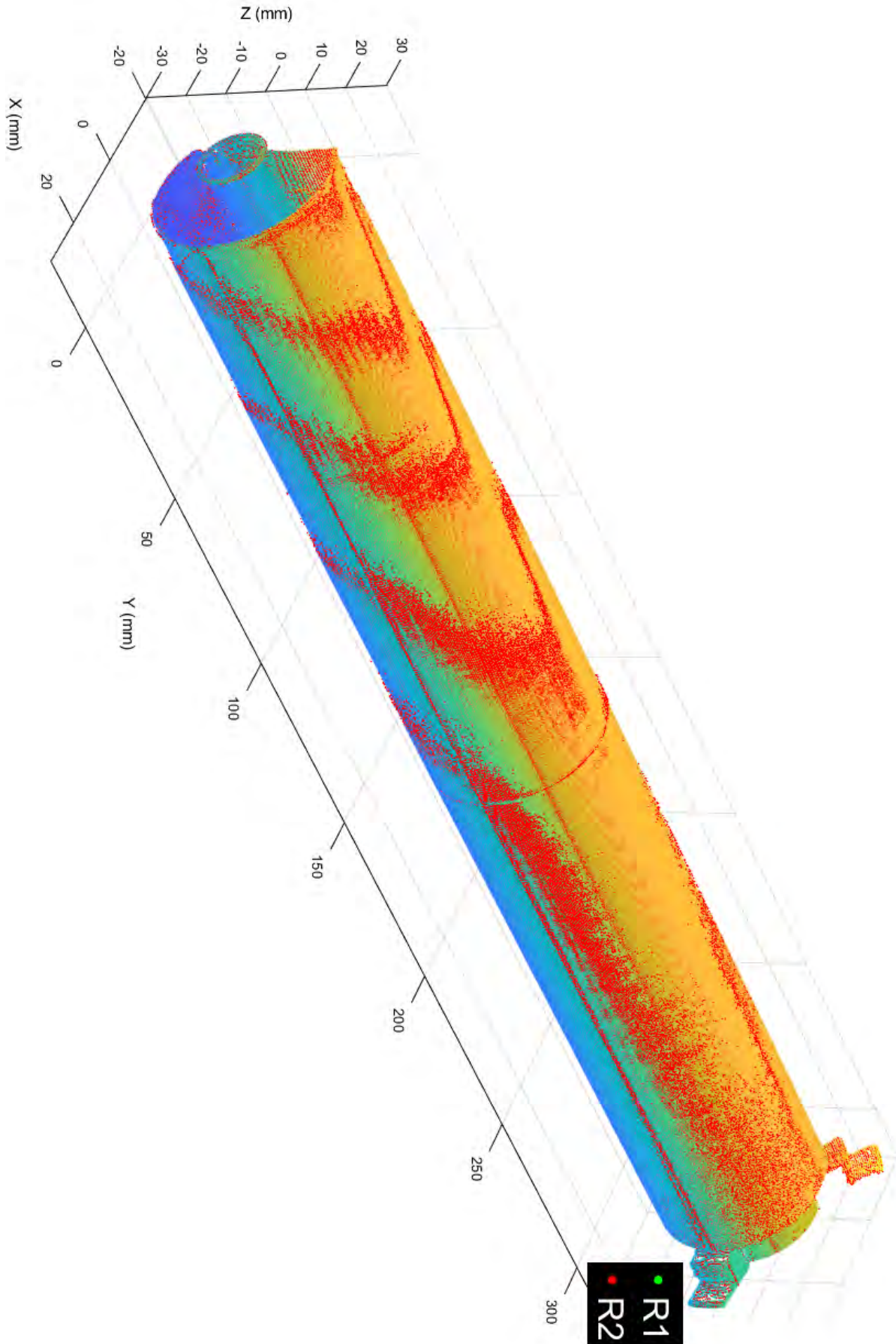


Figura B.15 Superposición de puntos del cilindro de calibración

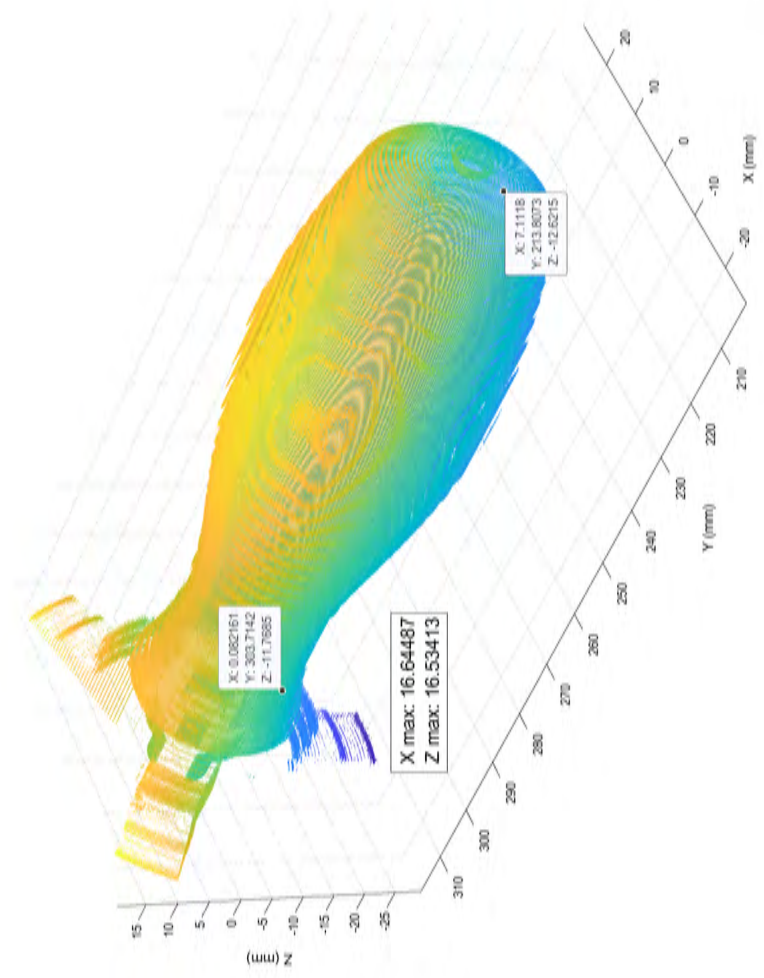


Figura B.16 Primera reconstrucción del mango del destornillador

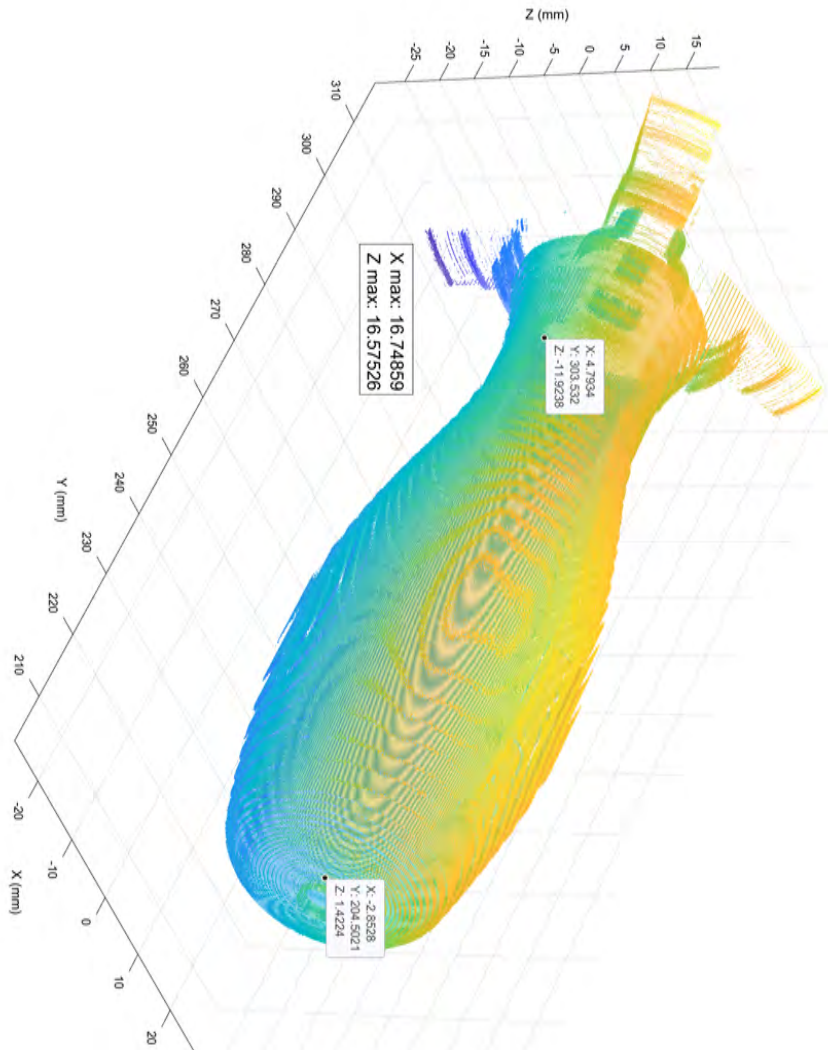


Figura B.17 Segunda reconstrucción del mango del destornillador

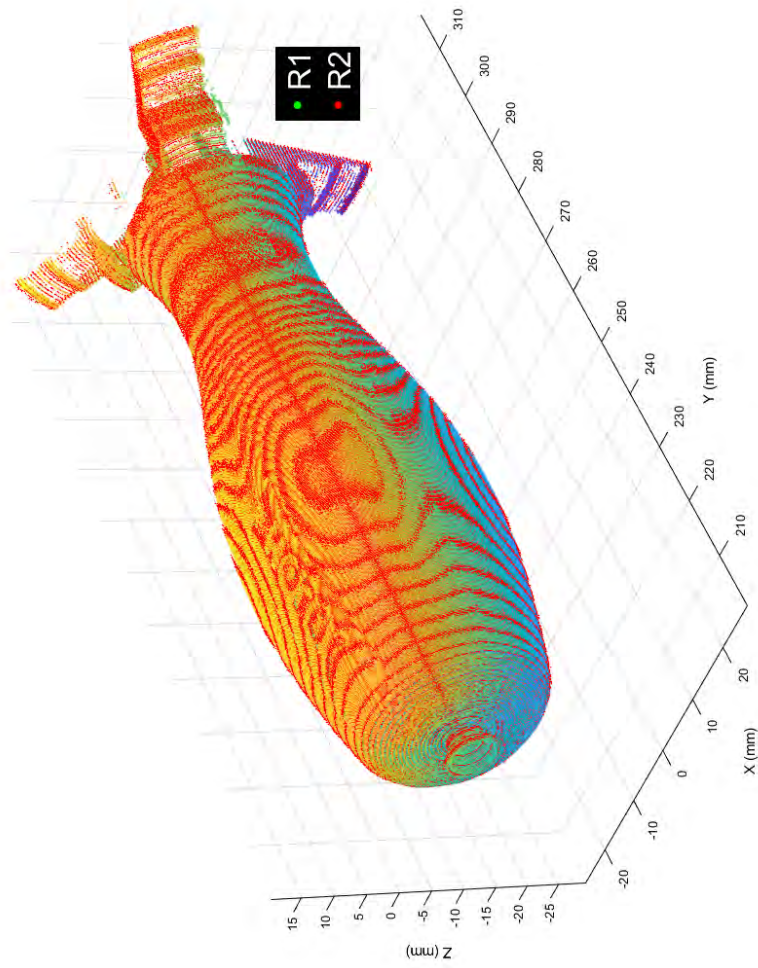


Figura B.18 Superposición de puntos del mango del destornillador

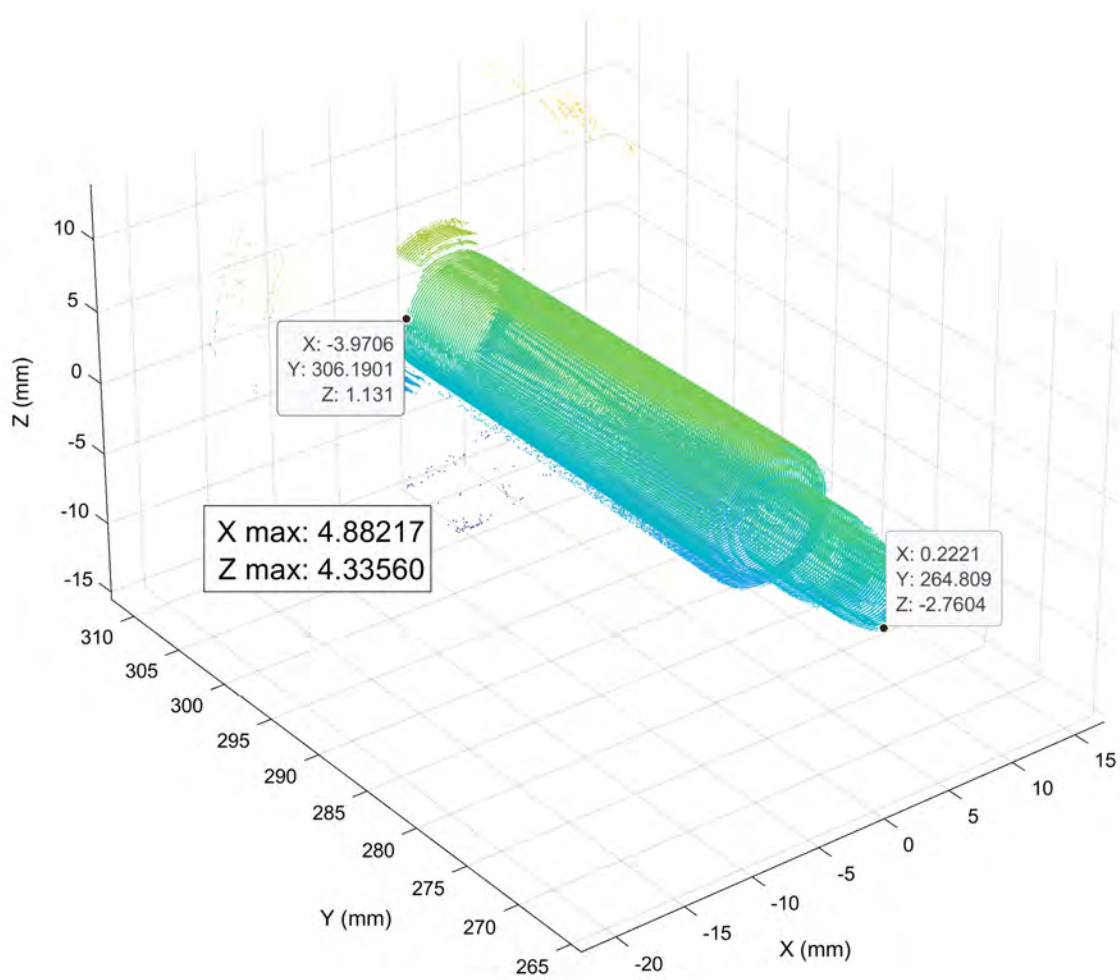


Figura B.19 Primera reconstrucción del centrador metálico

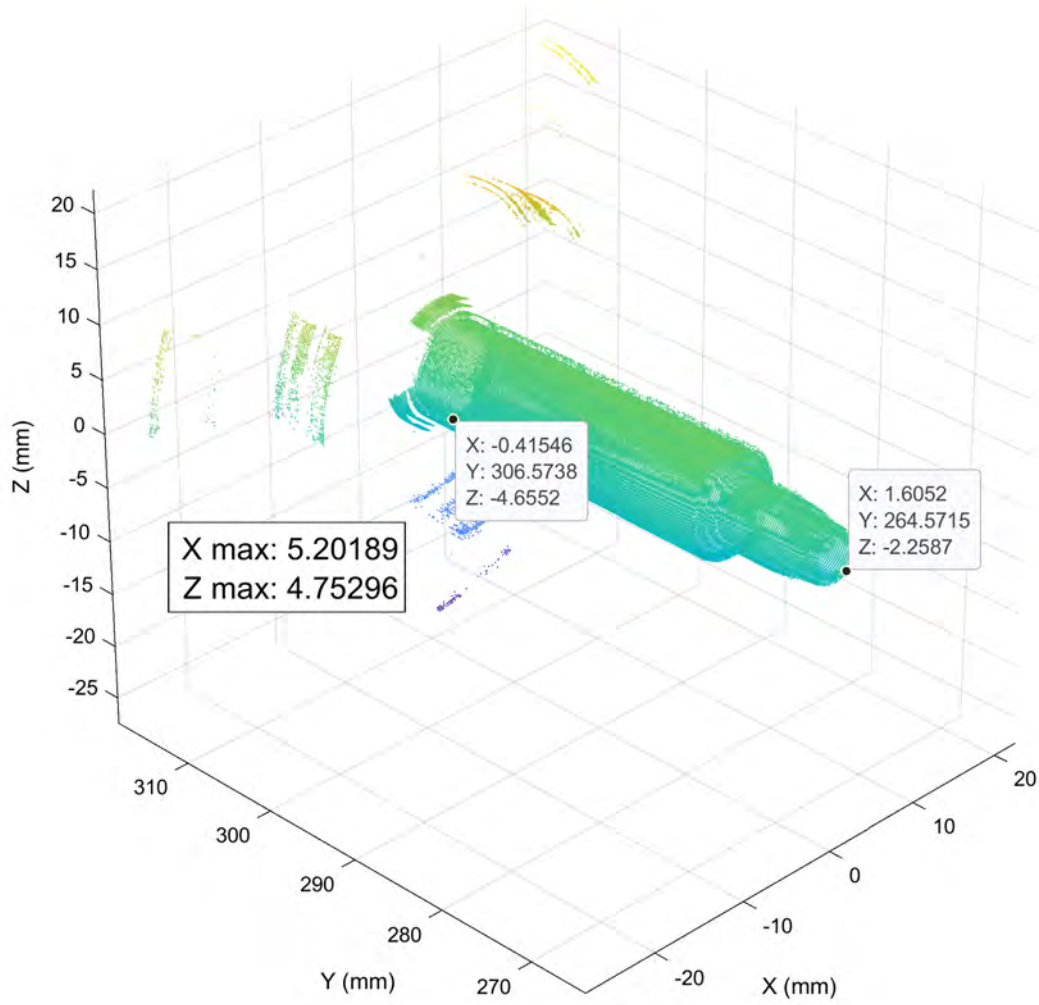


Figura B.20 Segunda reconstrucción del centrador metálico

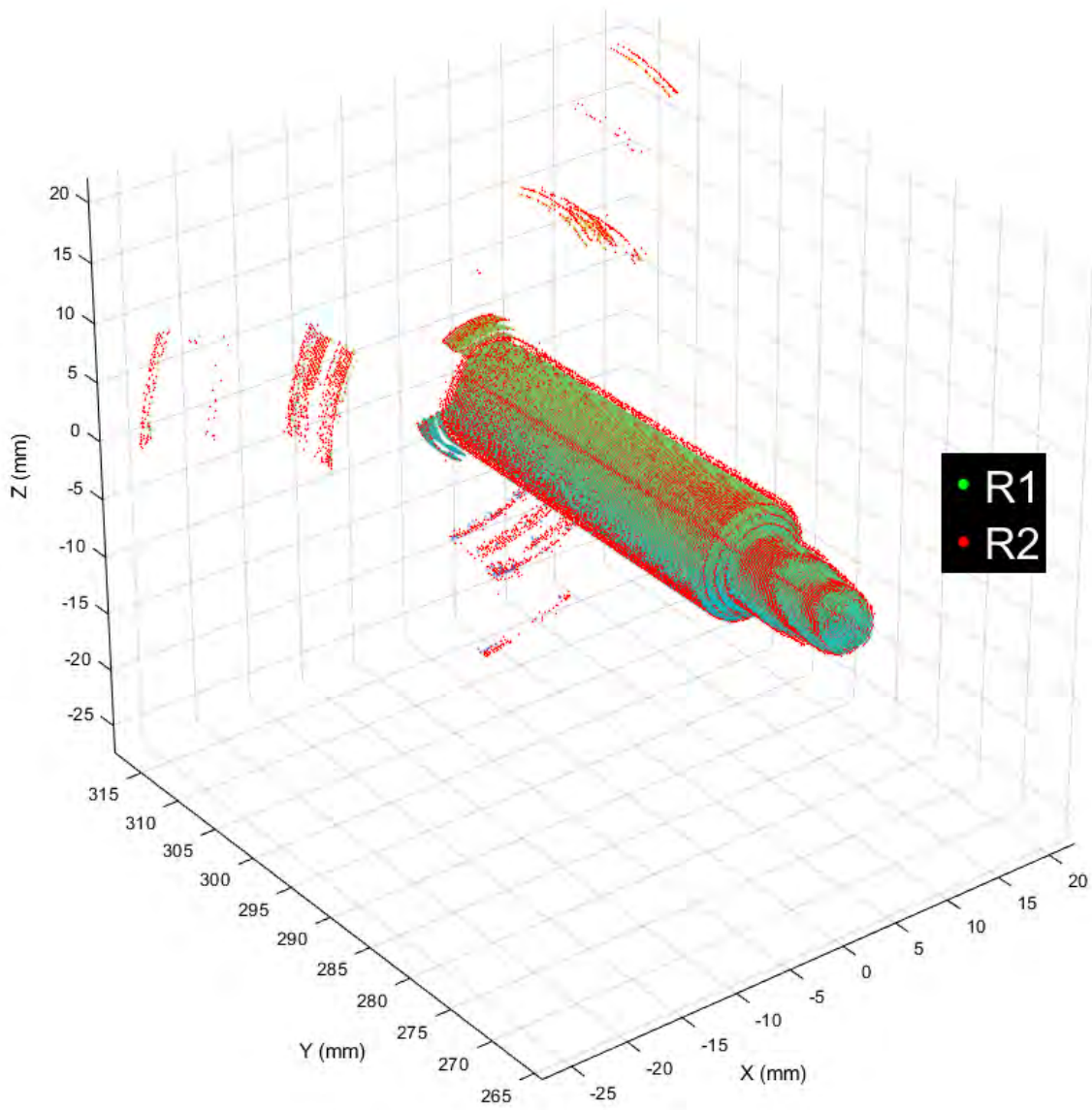


Figura B.21 Superposición de puntos del centrador

Planificación temporal

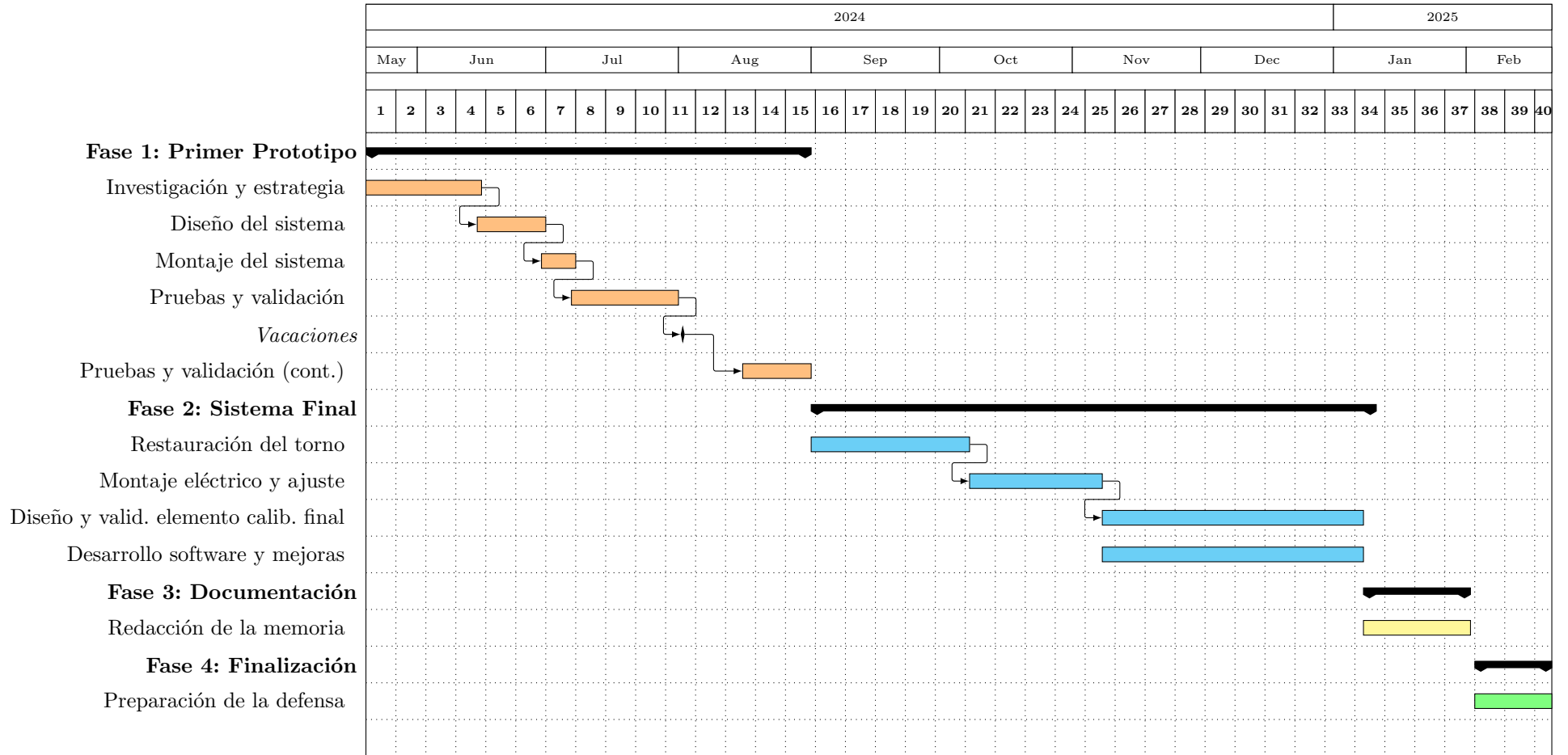


Figura C.1 Cronograma del desarrollo del sistema de visión tridimensional para la reconstrucción de objetos de revolución

Presupuesto

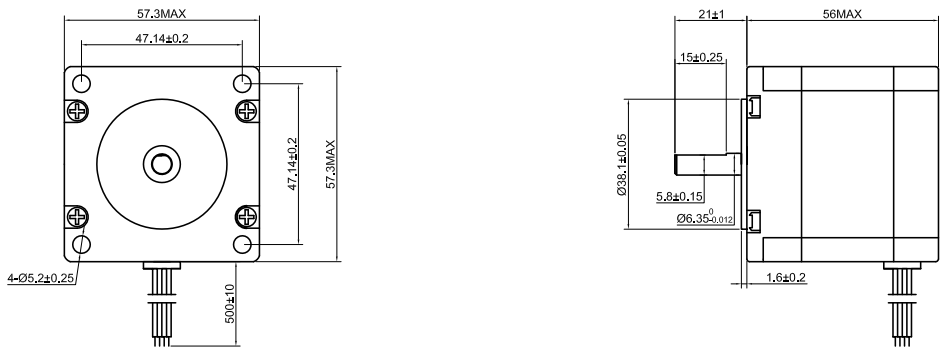
En la parte de componentes eléctricos se incluye la fuente de alimentación, las bornas, el magnetotérmico, conectores y todos los cables que no se especifican aparte como el de la cámara. La valoración del precio del torno es complicada ya que no se tiene ninguna referencia. Debido a su estado final e inicial, se valora en un precio de 800€. Los perfiles de aluminio y las ópticas fueron prestadas, por lo que su precio es estimativo. En el caso de los perfiles de aluminio se toma como referencia el precio del metro a fecha del presente *TFM*. Algunos materiales no fueron utilizados en el diseño final, pero fueron necesarios para el primer prototipo. Algunos artículos como, por ejemplo, las escuadras de aluminio o los rodamientos venían en cajas, así que su precio es por todo el contenido de la caja. En el ítem *ferretería varia* se incluye todo lo necesario para poder fabricar tanto el primer prototipo como el torno final. Por otro lado, la cantidad de horas de trabajo se debe a la restauración del torno y las diferentes pruebas necesarias hasta llegar al producto final.

Concepto	Cantidad	Precio unitario (€)	Total (€)
Cámara	1	353	353
Cable cámara	1	27.99	27.99
Adaptador CS-C	1	12.1	12.1
Ópticas	4	100	400
Componentes eléctricos	250	1	250
Láser	1	316.7	316.7
Impuestos láser	1	78.71	78.71
Inyector POE	1	19.1	19.1
NodeMCU8266	1	18.71	18.71
Cables nodeMCU	1	1	10
Escuadras aluminio	1	35.98	35.98
Rodamientos	1	10.45	10.45
Ferretería varia	1	100	100
Láser 650nm	1	9.48	9.48
Motor	1	18.09	18.09
Escuadra motor	1	2.21	2.21
Acoplamiento motor	1	3.19	3.19
Controladora DM542T	1	17.52	17.52
Impuestos motor	1	18.01	18.01
Cono morse estándar MT1	1	1	19.18
Torno	800	1	800
Perfiles de aluminio	9.08	10	90.8
Ordenador	1	1200	1200
Horas de trabajo del autor	380	42	15960
Horas de trabajo del tutor	30	55	1650
Total (€)			21421.22

Tabla D.1 Lista de componentes y precios

Hojas de características

E.1. Motor 23HM22-2804S

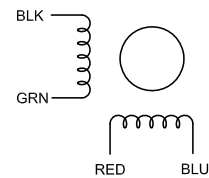


SPECIFICATION	CONNECTION	BIPOLAR
AMPS/PHASE		2.80
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C		1.16±10%
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz		4.20±20%
HOLDING TORQUE(Nm)[lb·in]		1.20[10.63]
STEP ANGLE(°)		0.90
STEP ACCURACY(NON-ACCUM)		±5.00%
ROTOR INERTIA(g·cm²)		300.00
LEAD STYLE		AWG22 UL1007
WEIGHT(Kg)[lb]		—
TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED)		
AMBIENT TEMPERATURE -10°C-50°C[14°F-122°F]		
INSULATION RESISTANCE 100 Mohm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)		
INSULATION CLASS B 130°C[266°F]		
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)		

PIN NO	TYPE OF CONNECTION (EXTERN)		MOTOR	
	BIPOLAR	LEADS	LEADS	WINDING
1	A+ —	BLK	BLK	A+
2	A- —	GRN	GRN	A-
3	B+ —	RED	RED	B+
4	B- —	BLU	BLU	B-

FULL STEP 2 PHASE-Ex. .
 WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A+	B+	A-	B-	DIRECTION	
1	+	+	-	-	↓	↑
2	-	+	+	-		
3	-	-	+	+	↑	↓
4	+	-	-	+		

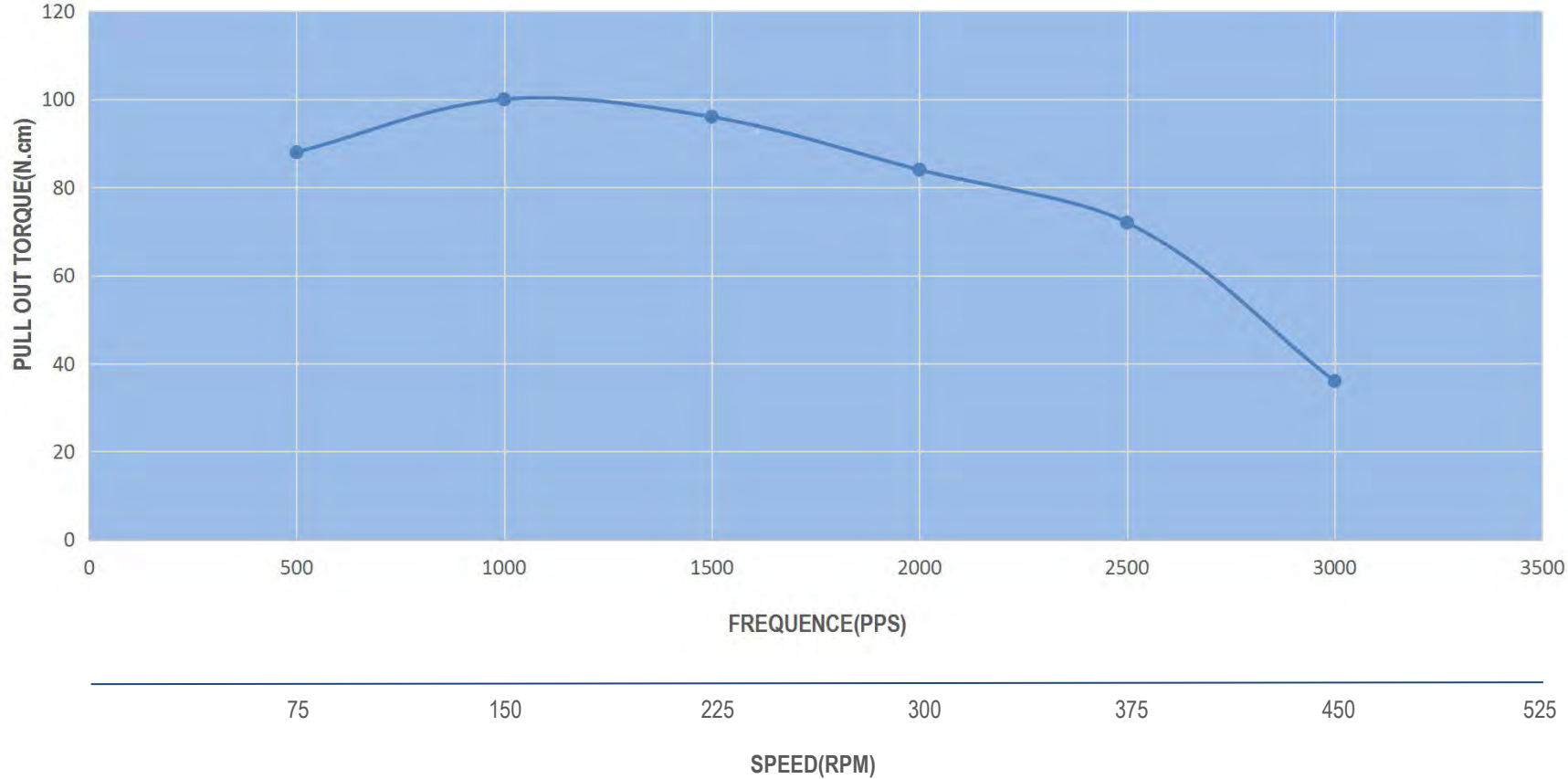


APVD		10.30.2020
CHKD		
1:1.5	DRN	
SCALE	SIGNATURE	DATE

STEPPER MOTOR

23HM22-2804S


23HM22-2804S PULL OUT TORQUE (2.8A/PHASE 24V CONSTANT CURRENT FULL STEP)



E.2. Cámara BFS-PGE-16S2-M

SPECS	BFS-PGE-16S2M-CS	BFS-PGE-16S2C-CS
Resolution	1440 x 1080	
Frame Rate	78 FPS / 137 FPS with Lossless Compression	
Megapixels	1.6 MP	
Chroma	Mono	Color
Sensor	Sony IMX273, CMOS, 1/2.9"	
Readout Method	Global shutter	
Pixel Size	3.45 µm	
Lens Mount	CS-mount	
ADC	10-bit, 12-bit	
Minimum Frame Rate*	1 FPS	
Gain Range*	0 to 47 dB	
Exposure Range*	20 us to 30 s	
Acquisition Modes	Continuous, Single Frame, Multi Frame	
Partial Image Modes	Pixel binning, decimation, ROI	
Image Processing	Gamma, lookup table, and sharpness	Color correction matrix, gamma, lookup table, saturation, and sharpness
Sequencer	Up to 8 sets using 6 features	
Image Buffer	240 MB	
User Sets	2 user configuration sets for custom camera settings	
Flash Memory	6 MB non-volatile memory	
Opto-isolated I/O	1 input, 1 output	
Non-isolated I/O	1 bi-directional, 1 input	
Serial Port	1 (over non-isolated I/O)	
Auxiliary Output	3.3 V, 120 mA maximum	
Interface	GigE	
Power Requirements	Power over Ethernet (PoE); or 12 V nominal (8 - 24 V)	
Power Consumption	3 W maximum (2.8 W nominal)	
Dimensions/Mass	29 mm x 29 mm x 30 mm / 36 g	
Machine Vision Standard	GigE Vision v1.2	
Compliance	CE, FCC, KCC, RoHS, REACH. The ECCN for this product is: EAR099.	
Temperature	Operating: 0°C to 50°C Storage: -30°C to 60°C	
Humidity	Operating: 20% to 80% (no condensation) Storage: 30% to 95% (no condensation)	
Warranty	3 years	

*Values are the same in binning and no binning modes.



Teledyne FLIR Integrated Imaging Solutions

CANADA
 12051 Riverside Way
 Richmond, BC, Canada
 V6W 1K7
 T: +1 866.765.0827 (toll free)
 T: +1 604.242.9937
 F: +1 604.242.9938
 E: mv-sales@flir.com
 www.flir.com/mv

USA
 T: +1 866.765.0827 (toll free)
 E: mv-na-sales@flir.com

EUROPE
 T: +49 7141 488817-0
 F: +49 7141 488817-99
 E: mv-eusales@flir.com

CHINA
 T: +86 10 8215 9938
 F: +86 10 8215 9936
 E: mv-chinasales@flir.com


ASIA
 E: mv-asiasales@flir.com


www.teledyneflir.com

©2021 Teledyne FLIR LLC. All rights reserved. Names and marks appearing on the products herein are either registered trademarks or trademarks of Teledyne FLIR LLC and/or its subsidiaries. Specifications are subject to change without notice. Rev. 05/11/21

VN: 21-0687-OEM-BFS-PGE-16S2-LTR

FIND THE BEST BLACKFLY'S FOR YOUR NEEDS





TELEDYNE FLIR
 Everywherelook™

E.3. Láser EL450-100G24LP



ELITE OPTOELECTRONICS CO., LTD.

Add: 3-10502 Modern Business Center, Zhangba 5th Rd.
 Hi-Tech Zone, Xi'an, China

Phone: +86-29-68590616 Fax: +86-29-68590728

E-mail: sale@s-laser.com www.s-laser.com

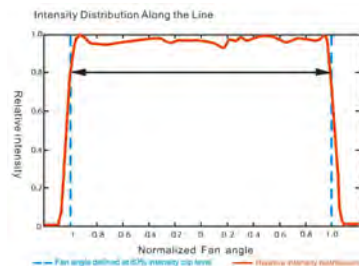
EL450-100G24LP (Uniform Line Laser Module)

Description

The EL450-100G24LP is a blue line laser module subassembly with collimated beam. The maximum laser output power is 50.0 mW at 450nm. **Energy is uniformly distributed.**

Features

- Uniform Line
- Superior Line and Focusing Quality
- High Pointing Stability
- Digital and Analogue Modulation
- High Power Stability (ACC control)
- Low Operating Current



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Ratings	Unit
Optical Output Power	P_0	≤ 50.0	mW
Operating Temperature	T_{opr}	-20 to +60	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to +85	$^{\circ}\text{C}$
Operating Humidity (none condensing)	RH_{opr}	90	%

Optical and Electrical Characteristics

Parameter	Specifications	Test Conditions
Wavelength	$450 \pm 5\text{nm}$	$T_c = 25^{\circ}\text{C}$
Output Power	$\leq 50.0\text{mw}$	$T_c = 25^{\circ}\text{C}$
Laser Modes	Pulse	TTL control
Output Aperture	$\varnothing 4.0\text{mm}$	
Line Width (1/e2)	$\leq 200\mu\text{m} (@320\text{mm})$	Factory fixed @ 320mm
	$\leq 260\mu\text{m} (@320 \pm 50\text{mm})$	
	$\leq 320\mu\text{m} (@320 \pm 100\text{mm})$	
Fan Angle	75° (uniform line)	
Optics	Glass lens	
Operating Current	$< 40\text{mA}$	$T_c = 25 \pm 3^{\circ}\text{C}$
Operating Voltage	24.0VDC	
CDRH Class	Class IIIb	
MTBF	> 10000 Hrs.	$T_c = 25 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Mechanical Characteristics

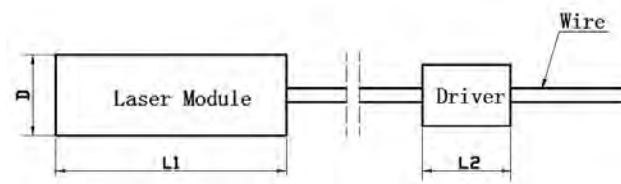
Parameter	Specifications
Dimensions	$\varnothing 12(\text{D}) \times 30(\text{L}1)\text{mm}$ (driver PCB outside)
Cable Length	200mm 26AWG
Case Material	Brass
Vibration	DIN EN 60068-2-6 Standard
Shock	DIN EN 60068-2-29 Standard



ELITE OPTOELECTRONICS CO., LTD.
 Add: 3-10502 Modern Business Center, Zhangba 5th Rd.
 Hi-Tech Zone, Xi'an, China
 Phone: +86-29-68590616 Fax: +86-29-68590728
 E-mail: sale@s-laser.com www.s-laser.com

Mechanical Drawing

Red wire: +24.0VDC
 Yellow wire: Control (TTL)
 Black wire: GND



PCB outside

Housing Dimension	
D	12.0 ⁰ _{-0.05} mm
L1	30.0±0.5mm

Caution:

1. The laser light is harmful to human body especially to eye no matter what directly or indirectly. The laser beam shall be observed or adjusted through infrared camera or equivalent.
2. Design your application so that the product is used within the range in the datasheet.
3. The above product specification are subject to change without notice.

