



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

Rosana Castaño Barrero

para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

**Estación para la detección de defectos  
superficiales en discos de freno mediante  
triangulación láser**

Julio 2021

# Índice de la Memoria

1	Introducción.....	1
1.1	Datos del proyecto.....	1
1.2	Descripción del proyecto.....	1
1.2.1	Empresa desarrolladora: Desarrollo de Soluciones Integrales Plus S.L.....	1
1.2.2	Proyecto desarrollado .....	1
1.3	Planteamiento del problema .....	2
2	Descripción del sistema .....	4
2.1	Estructura mecánica .....	6
2.1.1	Elementos Hardware relevantes .....	6
2.1.2	Software.....	7
3	Objetivos y alcance.....	14
4	Metodología.....	15
4.1	Selección de la tecnología .....	16
4.1.1	Visión 2D convencional .....	16
4.1.2	Generación de modelos 3D mediante luz estructurada .....	17
4.1.3	Holografía conoscópica .....	18
4.1.4	Triangulación láser .....	19
4.2	Estudio de la tecnología. Triangulación láser .....	20
4.3	Selección de los sensores .....	23
4.4	Desarrollo del software de adquisición .....	23
4.5	Identificación de las geometrías del disco.....	24
4.6	Tipos de superficies.....	24
4.6.1	Zonas planas .....	24
4.6.2	Esquinas.....	25

4.6.3	Zonas especiales .....	25
4.7	Desarrollo del software de detección de defectos .....	25
4.7.1	Programa de detección.....	26
4.7.2	Prototipo OpenCV .....	28
4.7.3	Integración en el software principal .....	29
5	Trabajo realizado .....	29
5.1	Desarrollo del software de adquisición .....	29
5.1.1	Estudio de la tecnología.....	29
5.1.2	Modo imagen (IMG) .....	30
5.1.3	Modo FIR Peak (FIRPeak) .....	31
5.1.4	Modo intensidad máxima del perfil (MAX).....	32
5.1.5	Modo Umbral (TRSH).....	32
5.1.6	El modo Centro de gravedad (COG) .....	33
5.1.7	Algoritmo seleccionado .....	34
5.1.8	Parámetros relevantes .....	34
5.1.9	Plug-in de adquisición .....	37
5.1.10	Interfaz de usuario (UI) .....	39
5.1.11	Adquisición.....	39
5.1.12	Configuración .....	41
5.2	Primeras tomas de datos .....	41
5.3	División de zonas medidas para su inspección .....	44
5.4	Análisis de datos y selección de algoritmos de detección.....	47
5.5	Algoritmo para zonas horizontales, planas sin agujeros .....	52
5.6	Algoritmo para zonas horizontales, planas con agujeros .....	59
5.7	Algoritmo de esquinas.....	64
5.7.1	Esquinas simples.....	64
5.7.2	Esquinas cercanas a zona de ventilación .....	68

# Índice de Figuras

Figura 1. Imagen de disco de freno rechazado de la línea de producción por contener un defecto en la pista superior (marcado en rojo).....	2
Figura 2. Esquema básico del sistema.....	4
Figura 3. Esquema general del sistema .....	5
Figura 4. Esquema representativo de la máquina de inspección de defectos.....	7
Figura 5. Bloques del sistema de visión.....	8
Figura 6. Flujograma del funcionamiento del software de adquisición. ....	9
Figura 7. Resumen comunicación PC-PLC.....	12
Figura 8. Pasarela Anybus utilizada para las comunicaciones.....	13
Figura 9. Ejemplo de implementación de RemoteInterface. Tabla de dimensional de defectos en un disco rechazado. ....	13
Figura 10. Ejemplo de implementación de RemoteInterface. Representación gráfica de las zonas con defecto en un disco rechazado. ....	14
Figura 11. Esquema de funcionamiento de escáner de luz estructurada.....	17
Figura 12. Especificaciones del sensor ConoLine-100 de Optimet [7].....	19
Figura 13. Características del sensor de triangulación láser. ....	19
Figura 14. Esquema explicativo del funcionamiento de un sistema de triangulación laser.....	20
Figura 15. Diferentes posibles configuraciones del sistema de triangulación láser.....	21
Figura 16. Sensor4090CS23-100 .....	23
Figura 17. Descripción de las zonas del disco. ....	24
Figura 18. Descripción de las zonas planas del disco de freno .....	25
Figura 19. Descripción de las zonas de esquina del disco de freno .....	25
Figura 20. Ejemplo de escaneo mediante sensor C5-CS sobre objeto en 3D [8].....	30
Figura 21. Ejemplo del modo imagen de sensor At serie C5.....	31
Figura 22. Cálculo de la primera derivada de la curva de Gauss del perfil de intensidad de la línea láser proyectada sobre el objeto. [9] .....	31
Figura 23. Cálculo del valor máximo de la curva de Gauss del perfil de intensidad de la línea láser proyectada sobre el objeto. [9].....	32
Figura 24. Cálculo de los puntos de corte de la curva de Gauss del perfil de intensidad de la línea láser proyectada sobre el objeto con la recta umbral [9].....	33

5.8	Zonas especiales .....	77
6	Procedimiento experimental .....	78
6.1	Pruebas sobre el prototipo en equipo de ensayos .....	78
6.2	Pruebas sobre máquina offline .....	78
6.3	Pruebas sobre la máquina online .....	81
6.4	Pruebas sobre máquina en producción .....	81
7	Resultados.....	81
7.1	Resultados obtenidos.....	81
7.1.1	Pruebas de falso negativo .....	81
7.1.2	Pruebas de falso positivo .....	82
8	Conclusiones y trabajos futuros.....	83
9	Presupuesto.....	85
9.1	Coste de ejecución material.....	85
9.1.1	Costes de equipos .....	85
9.1.2	Costes de software .....	85
9.2	Costes de mano de obra.....	86
9.3	Coste total del presupuesto de ejecución material .....	86
9.4	Gastos generales y beneficio industrial.....	87
9.5	Importe total .....	88
10	Planificación .....	89
11	Bibliografía .....	90

Figura 25. Cálculo del centro de gravedad de la curva de Gauss del perfil de intensidad de la línea láser proyectada sobre el objeto[9].	34
Figura 26. Ejemplo del mapa del nodos. Acceso desde Genicam Browser.	35
Figura 27. Interfaz de usuario para la adquisición de datos	40
Figura 28. Modo imagen en la interfaz de usuario	40
Figura 29 Equipo para ensayos preliminares.	42
Figura 30. reconstrucción del disco con defecto en la pared interior (bruto) en coordenadas cartesianas. Visualización en Cloud Compare.	43
Figura 31. Defecto de 0.48 mm sobre rugosidad de 0.03 mm	43
Figura 32. Reconstrucción 3D de disco escaneado desde la estación 1. Cada color corresponde con la zona escaneada por un sensor.	44
Figura 33. Reconstrucción 3D de disco escaneado desde la estación 2. Cada color corresponde con la zona escaneada por un sensor.	45
Figura 34. Representación de la zona diámetro externo (compuesta por dos medidas).	45
Figura 35. Representación de las medidas en pista superior.	46
Figura 36. Medidas en apoyo cara de amarre.	46
Figura 37. Medidas en pared del gorro.	47
Figura 38. Ejemplo de mapa de profundidades calibradas en z. El ancho de la imagen corresponde con el tamaño del perfil en píxeles, mientras el alto corresponde al número de perfiles. La escala de colores marca la profundidad en mm de cada píxel.	49
Figura 39. Detalle de defecto en mapa de profundidades	49
Figura 40. Uno de los perfiles en los que se muestra el defecto y detalle del defecto real.	50
Figura 41. Candidatos obtenidos mediante Savinsky-Golay	50
Figura 42. Candidatos obtenidos mediante Hampel.	51
Figura 43. Ampliación de defecto en 3D sobre superficie plana.	52
Figura 44. Representación de la pista superior en coordenadas cilíndricas.	53
Figura 45. Imagen en el plano z-Ro. En la figura se aprecia el alabeo de aproximadamente 1mm que presenta el disco durante el giro.	53
Figura 46. Explicación de funcionamiento de filtro de Hampel.	56
Figura 47. Detalle del mapa de diferencias de la imagen original y la imagen filtrada mediante un filtro de outliers de Hampel.	56

Figura 48. representación de 50 perfiles consecutivos pertenecientes al defecto. En azul los datos originales, en rojo el filtro de Hampel y en amarillo la diferencia entre ambos. .....	57
Figura 49. Candidatos a defectos obtenidos mediante filtro de outliers de Hampel ....	58
Figura 50. Candidatos a defectos tras aplicar apertura morfológica. ....	58
Figura 51. Caracterización del defecto para cálculo del diámetro. ....	59
Figura 52. Los discos tienen siete agujeros de sujeción avellanados. ....	60
Figura 53. Vista 3D en coordenadas cilíndricas de la zona de apoyo del disco. Se aprecian los puntos perdidos en los taladros y los brillos provocados por el chaflán. ....	61
Figura 54. Imagen binaria de los agujeros filtrada.....	61
Figura 55. Imagen binaria de los agujeros tras aplicar una apertura.....	62
Figura 56. Imagen binaria de los agujeros tras aplicar una apertura y una dilatación .....	62
Figura 57. Candidatos antes y después de la eliminación de agujeros.....	63
Figura 58. Etiquetado de agujeros.....	63
Figura 59. Búsqueda de agujeros con pre-posicionado y post-posicionado de los datos .....	64
Figura 60. Ejemplo de esquina simple: Exterior del gorro en disco ventilado. Arriba representación de la zona medida en coordenadas cartesianas (azul). Abajo plano proyección de la esquina a 45° y corte de la esquina en coordenadas cilíndricas.....	65
Figura 61. Efecto de un poro en la matriz de distancias e imagen del defecto en el disco. ....	66
Figura 62. Arriba: Mapa de profundidades del exterior del gorro. Se aprecia el grabado del disco (arriba a la derecha) y una pequeña marca que no cumple las restricciones dimensionales para ser un poro (arriba izquierda). Abajo: Binarización con umbral de profundidad de 0.07mm. ....	67
Figura 63. Imagen binaria tras aplicar una apertura morfológica para eliminar píxeles sueltos y marcas de pequeño diámetro. ....	67
Figura 64. Imagen esquina exterior del disco. En verde se marca el equilibrado y en rojo la banda de ventilación. Los números marcan que esquinas se miden desde cada estación. Las esquinas azules (1,3) se miden desde la estación 1, mientras que las esquinas naranjas (2 y 4) desde la estación 2. ....	69
Figura 65. Mapa de profundidades de disco rectificado .....	70

Figura 66. Imagen rectificada tras ignorar el equilibrado y suavizar la arista .....	71
Figura 67. Hampel sobre la proyección del disco en el plano e imagen binarizada de candidatos en la que se distingue el equilibrado. ....	71
Figura 68. Ejemplo de equilibrado en disco de freno. ....	72
Figura 69. Se toma como referencia la arista interior inferior del diámetro externo, por ser la más favorable a la posición del sensor. ....	73
Figura 70. Búsqueda de arista de referencia (en rojo). Imagen de gradientes. ....	73
Figura 71. Detalle de aristas interiores (rojas) y exteriores (verdes). ....	74
Figura 72. Comparación de radios de las aristas interiores (con equilibrado) y exteriores (sin equilibrado). ....	74
Figura 73. Búsqueda de candidatos a equilibrado. ....	75
Figura 74. Agrupación de candidatos y selección de grupos válidos. En cian, grupos de candidatos que cumplen condiciones de equilibrado. ....	76
Figura 75. Candidatos con y sin equilibrado en diámetro externo (esquina superior). ....	76
Figura 76. Búsqueda de arista de referencia. ....	77
Figura 77. Imagen de la zona exterior del disco en coordenadas cartesianas, reconstruida a partir de los datos obtenidos del sensor de triangulación láser. Se proyectan y se tratan los datos obtenidos. En las siguientes imágenes se pueden ver los datos proyecta .....	79
Figura 78. Mapa de profundidades del defecto (mm) en la proyección 2D de la parte exterior del disco. ....	79
Figura 79. Imagen de la parte exterior del disco proyectada en 2D y umbralizada. Imagen de salida del algoritmo. ....	80
Figura 80. Detección del equilibrado del disco. Imagen de salida del algoritmo. ....	80
Figura 81. Salida del algoritmo de detección. Izq.: Imagen de salida de depuración. Candidatos y defecto con su centro de masas marcado en rojo. Der. Arriba: ampliación imagen izquierda sobre el defecto. Der. Abajo: resultado que se envía a la interfaz con las medidas del defecto. ....	80
Figura 82. Resultados primera prueba de producción. ....	82
Figura 83. Resultados segunda prueba de producción. ....	82
Figura 84. Resultados de la tercera prueba de producción. ....	83



# 1 Introducción

## 1.1 Datos del proyecto

<b>Título:</b>	<b>Estación para la detección de defectos superficiales en discos de freno mediante triangulación láser.</b>
<b>Directores:</b>	<b>José María Enguita González.</b> Ingeniero Informático. Doctor por la Universidad de Oviedo. <b>Jorge Marina Juárez.</b> Doctor Ingeniero industrial. Director General en Desarrollo Soluciones Integrales Plus S.L.
<b>Autora:</b>	Rosana Castaño Barrero.
<b>Fecha:</b>	Julio de 2021.
<b>Empresa:</b>	Desarrollo Soluciones Integrales Plus S.L.

## 1.2 Descripción del proyecto

### 1.2.1 Empresa desarrolladora: Desarrollo de Soluciones Integrales Plus S.L.

Este proyecto se ha llevado a cabo en Desarrollo de Soluciones Integrales Plus (DSI Plus en adelante), una empresa tecnológica ubicada en Gijón, Asturias, y perteneciente al grupo empresarial CIN ADVANCED SYSTEMS GROUP. CIN, es un grupo especializado en la implantación de soluciones de digitalización por visión artificial y automatización que desarrolla su actividad empresarial por todo el territorio nacional.

### 1.2.2 Proyecto desarrollado

En este proyecto se llevará a cabo el desarrollo del software de una máquina de inspección de defectos mediante triangulación láser para una línea de fabricación de discos de freno para automóvil.

La línea original disponía de un puesto de inspección manual donde un operario examinaba todos los discos de cada lote de producción en busca de imperfecciones. Esta inspección era de tipo visual y se realizaba sin ayuda de ningún dispositivo de medición.

Con el objetivo de facilitar el trabajo del operario y realizar la inspección de forma automática, se proyecta una máquina de inspección sin contacto. La medición automática tiene como principal requisito mejorar la detección y evitar el error humano.

La máquina dispone de varios subsistemas independientes. Estos se pueden dividir en tres grandes grupos de desarrollo: la fabricación mecánica, la automatización y la visión. La fabricación mecánica agrupa la construcción de la estructura que albergará los elementos necesarios para el transporte y la inspección de los discos. La automatización se encarga de toda aquella parte software que relacionada con el desplazamiento y posicionado de los discos y los sensores. Por último, el grupo de visión es el que se encarga de la toma y análisis de datos, la comunicación entre bloques y la detección de defectos y anomalías en las piezas producidas en la línea.

### 1.3 Planteamiento del problema

Con el objetivo de mejorar el sistema de inspección de discos de freno (Figura 1), la empresa contratante ha decidido implantar un sistema de inspección automática sin contacto.



*Figura 1. Imagen de disco de freno rechazado de la línea de producción por contener un defecto en la pista superior (marcado en rojo)*

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de inspección era llevado a cabo mediante una revisión visual, realizada por un operario sin ayuda de ningún aparato de medida. Uno de los problemas que esto entraña es la dificultad que supone para el operario medir el diámetro y profundidad del defecto durante el proceso de producción continua. La falta de un criterio cuantitativo aplicable de forma sencilla por el operario provoca que se rechacen discos con marcas superficiales que realmente no son consideradas defecto. Se rechaza todo aquel disco que tenga una

marca susceptible de ser considerada defecto, sin poder comprobar de manera rápida y sencilla si el operario acierta a simple vista. Además, el hecho de tener al operario durante horas inspeccionando discos produce fatiga. Una mayor fatiga visual y mental incrementa las posibilidades de una mala toma de decisiones. Un alto índice de falso rechazo repercute en el beneficio económico de la línea, mientras que un defecto no detectado provoca la devolución posterior del cliente, lo que a su vez también repercute en el beneficio económico debido a que el disco ha sido pintado, mecanizado y preparado para su venta, pero luego es devuelto por el cliente. A lo anterior, hay que añadir las posibles sanciones económicas que conlleva la llegada de piezas defectuosas al cliente final.

La máquina de detección de defectos elimina el error humano y permite la cuantificación de la profundidad y diámetro de los defectos detectados, reduciendo el falso rechazo obtenido mediante una inspección puramente visual.

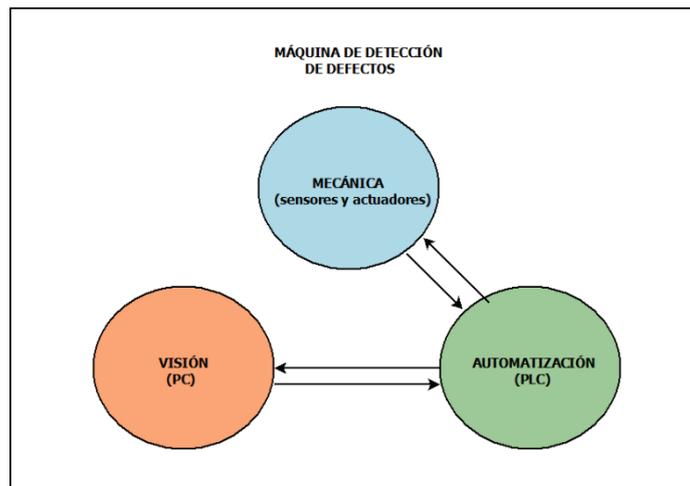
La inspección automática también permite disponer de unos históricos de defectos detectados por lote. Esta información es de gran utilidad para la empresa productora.

Mediante una interfaz de usuario intuitiva, el operario podrá visualizar inmediatamente el defecto detectado, la zona en la que ha sido detectado, sus medidas y si ha superado el límite de control o no. El límite de control es la medida mínima que debe tener un poro o falta de material para ser considerada defecto según el cuaderno de cargas. Se muestran los defectos y aquellos candidatos cuyas dimensiones en diámetro y profundidad son cercanas al límite de control marcado, aunque no se consideren defecto.

En resumen, la máquina deberá transportar los discos hasta el sistema de inspección, inspeccionar la pieza en busca de defectos superficiales y rechazarla o mandarla de vuelta a la línea según el resultado de la inspección. Además, deberá reportar el resultado de una forma intuitiva para el operario, así como su estado en cada momento. Para ello la máquina dispondrá de (Figura 2):

- Un sistema que permita desplazar, posicionar y girar el disco dentro de la línea. Esta será la parte mecánica de la máquina, que estará gobernada por un PLC.

- Un PLC que contendrá el software de automatización y estará conectado tanto con la parte mecánica como con el sistema de visión.
- Un sistema de visión que será el encargado de recolectar y tratar los datos necesarios para la inspección del disco.
- Una interfaz de usuario intuitiva y fácil de manejar para el operario.
- Comunicación entre PC y PLC.
- Comunicación entre PLC y parte mecánica.



*Figura 2. Esquema básico del sistema.*

## 2 Descripción del sistema

El proyecto asignado consiste en el desarrollo e implantación de un sistema de detección de defectos en discos de freno. La inspección ha de realizarse en todas las superficies del disco que sean accesibles. Solo se considerarán defectos aquellas marcas que tienen algún tipo de variación de altura, bien hacia el exterior del sólido, como rebabas, o bien hacia el interior, poros, faltas de material, grietas y golpes.

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema (Figura 3) dispondrá de una parte mecánica automatizada que se encargará de desplazar, colocar y girar los discos durante la toma de datos y de un software de visión que estará a cargo de tomar los datos, tratarlos, buscar los defectos en cada zona del disco y enviarlos a la interfaz gráfica. A su vez, también enviará la información necesaria al sistema de automatización, como pueden ser las órdenes de inicio y fin de medición, las posiciones de los sensores en x,y,z o la velocidad de giro del disco durante la medición.

Con este propósito se añadirá una pasarela de comunicación que permitirá enviar información desde un PC (ejecutando el software de visión) a un PLC (parte mecánica automatizada) y viceversa, además de la comunicación entre el PC y los sensores de medida.

Como elemento de inspección se utilizarán sensores de triangulación láser, como se explicará más adelante, que se añadirán a la propia máquina.

El sistema también dispondrá de una interfaz de usuario que permitirá configurar los dispositivos y controlar las adquisiciones manualmente en caso de ser necesario. La máquina dispone de una pantalla desde la que se pueden manejar los elementos manualmente.

Además, se desarrollará un programa de adquisición que permita recoger información de los sensores. El resultado de esta adquisición es una matriz de perfiles de distancias que se convertirán en una nube de puntos en 3D. La nube de puntos deberá tratarse para obtener una reconstrucción precisa de la superficie de los discos. Además, se llevará a cabo el postprocesamiento de la información obtenida del sensor. Deberán desarrollarse e implementarse los algoritmos de visión artificial y procesamiento de señal que permitan separar y clasificar los defectos. Con el objetivo de simplificar el análisis, se dividirá el disco en partes atendiendo al tipo de geometría y se implementará un algoritmo por cada tipo de superficie.

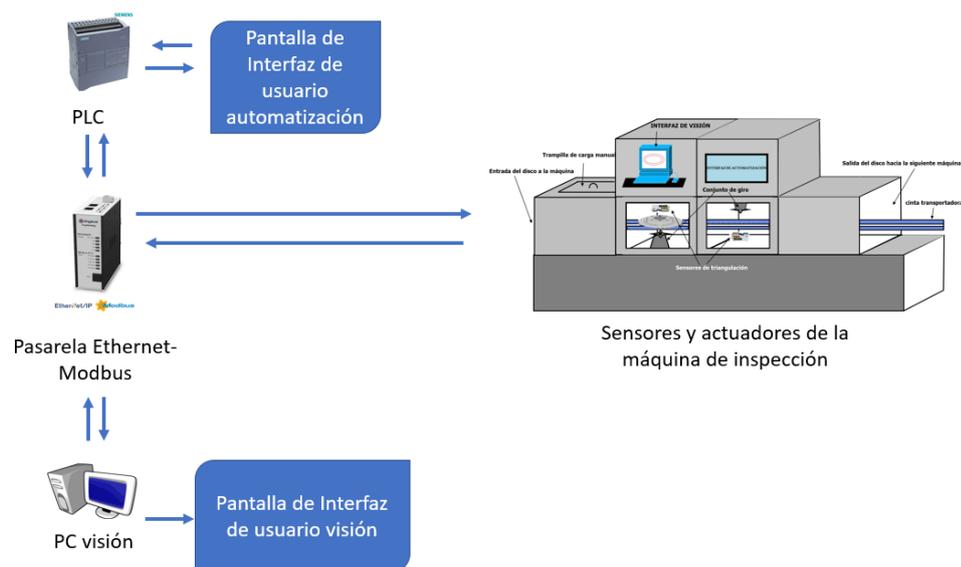


Figura 3. Esquema general del sistema

## 2.1 Estructura mecánica

A petición del cliente la máquina de defectos dispone de dos estaciones. Desde cada una de ellas se escanea una cara del disco (Figura 4).

Cada una de las estaciones cuenta con un sistema de rotación y elevación del disco y un movimiento lineal y de orientación del sensor.

El disco entra por la cinta, es agarrado por una pinza neumática. Un cilindro neumático lo eleva a unos 5 cm de la cinta transportadora y un motor eléctrico hace girar a todo el conjunto con el objetivo de que el sensor de triangulación láser escanee toda la superficie.

A continuación, se hace un resumen de los elementos hardware más relevantes para entender el funcionamiento global del sistema.

### 2.1.1 Elementos Hardware relevantes

- 1- Cinta transportadora: transporta el disco desde la entrada de la máquina hasta la salida hacia la siguiente máquina.
- 2- Pinzas neumáticas: agarran el disco durante el giro.
- 3- Cilindros neumáticos: Elevan el disco por encima de la cinta para que sea posible el giro.
- 4- Motor de giro: mueve el conjunto de giro.
- 5- Trampilla de entrada manual: sirve para introducir discos manualmente a la línea.
- 6- Salida rechazo: rampa por la que salen los discos rechazados.
- 7- Salida a la línea: salida de los discos no rechazados hacia la siguiente máquina.
- 8- Entrada a la máquina: entrada de los discos en la máquina de inspección.
- 9- Pasarela profinet (anybus): se encuentra en el armario eléctrico.
- 10- Interfaz de usuario (visión): pantalla del sistema de visión.
- 11- Interfaz de usuario (automatización): pantalla del sistema de automatización.
- 12- PC de visión: se encuentra en el armario eléctrico. Controla el sistema de visión.
- 13- PLC: se encuentra en el armario eléctrico. Controla el sistema de automatización.

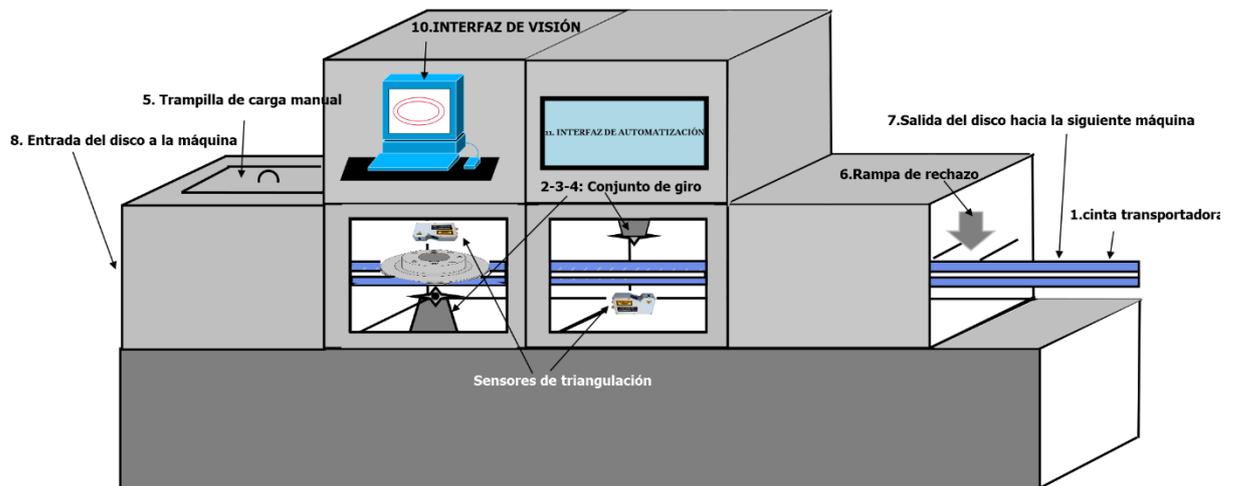


Figura 4. Esquema representativo de la máquina de inspección de defectos.

## 2.1.2 Software

Se pueden diferenciar dos grandes bloques de software en la aplicación. Por un lado, se encuentra el software que controla la automatización, que será el que contenga el PLC y que ha sido realizado por una empresa externa. Y por otro lado está el bloque de software que se ha denominado “bloque de visión” y que contiene todos los elementos necesarios para la adquisición, tratamiento y análisis de datos, la interfaz de usuario relativa a la inspección, la comunicación entre el PC de visión y el PLC y el control de la posición de los sensores y la velocidad de giro de disco en el momento de la medición.

La aplicación general de visión se divide en cuatro grandes partes: adquisición de datos, tratamiento de datos, comunicación con la máquina e interfaz de usuario (Figura 5).

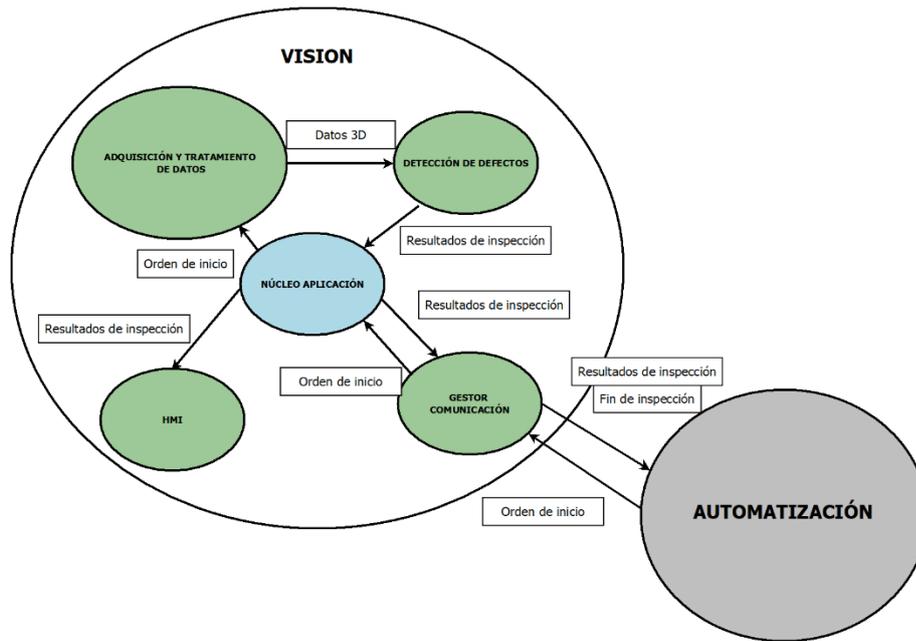


Figura 5. Bloques del sistema de visión.

Cada una de estas partes constituye un bloque de software independiente. Estos bloques están gobernados por una aplicación central que sirve de interfaz entre ellos.

### 2.1.2.1 Plug-in de adquisición

La función del plug-in de adquisición es servir de interfaz entre el sensor de triangulación láser y el software de detección de defectos. Está basado en las Common Vision Blox de Stemmer Imaging (CVB), unas librerías de visión artificial que permiten a los usuarios desarrollar aplicaciones de control para sensores de triangulación láser, entre otro tipo de tecnologías [1].

El software se conectará al sensor a través de las librerías y permitirá el control de las adquisiciones, así como los parámetros estas.

En el arranque, se inicializará el sensor con los parámetros por defecto. Estos podrán ser cargados desde un archivo XML o, en caso de no encontrarse el archivo en el directorio indicado, se asignarán los valores desde el propio código.

Una vez inicializado el sensor, se podrá empezar a adquirir o reconfigurar el parámetro o parámetros que sea necesario. Para ello, se dispondrá de una interfaz de usuario que permitirá cambiar los valores de configuración más importantes de

forma sencilla, así como iniciar y parar la adquisición, visualizar los valores del sensor por pantalla en tiempo real y guardar el resultado de la adquisición.

Además de adquirir los datos en bruto del sensor, se convertirán los valores obtenidos en puntos en tres dimensiones que representarán la situación del objeto escaneado en el espacio.

Una vez finalizada la adquisición, se libera el sensor y se deja listo para la siguiente adquisición, pudiéndose configurar sus parámetros entre adquisiciones (Figura 6).

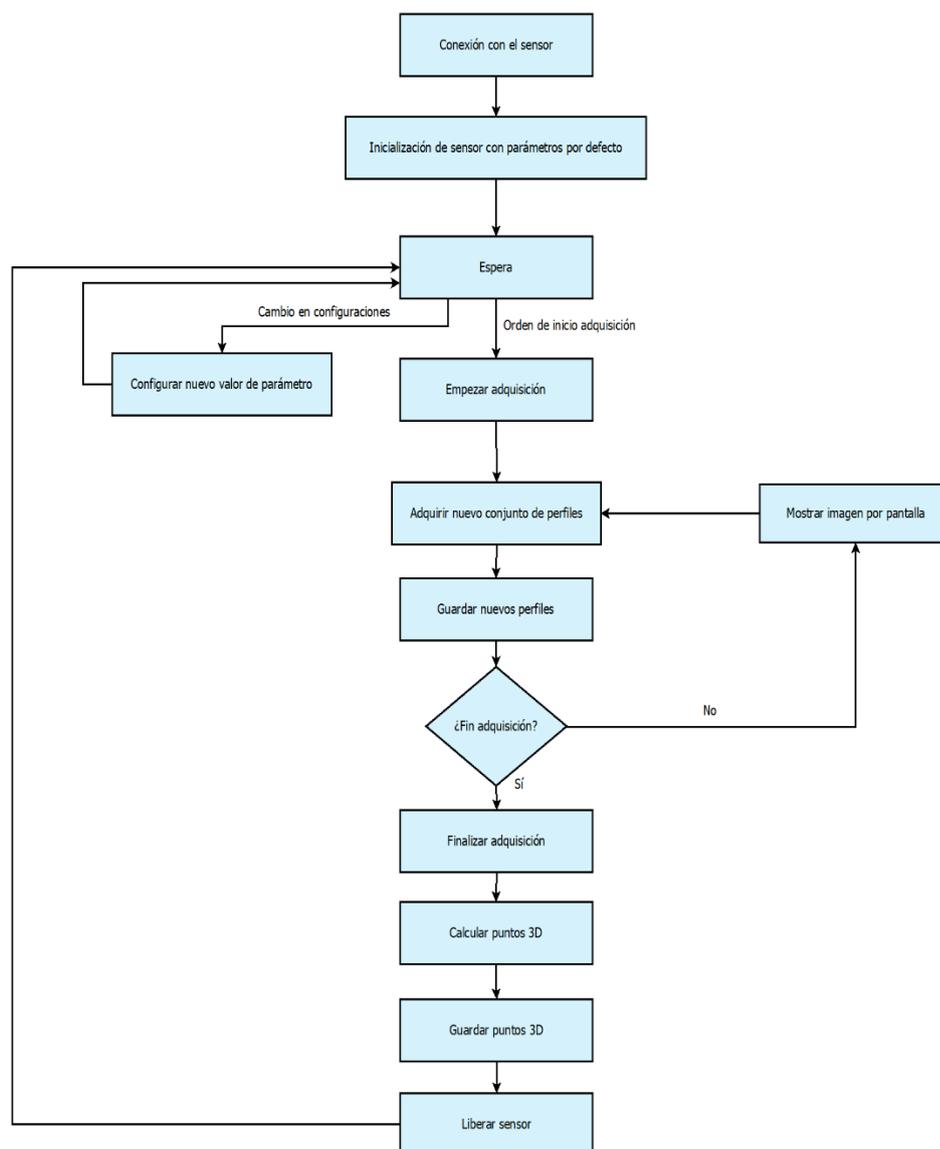


Figura 6. Flujograma del funcionamiento del software de adquisición.

### 2.1.2.2 Programa de detección de defectos

Una vez adquiridos y pretratados los datos, se envían al software de detección. Teniendo el disco superficies con varios tipos de geometrías, se decide dividir el procesamiento en tantas partes como geometrías clasificables hay en el disco. Finalmente, se desarrollan tres tipos de algoritmos de detección distintos: algoritmo de detección para superficies planas, algoritmo de detección para superficies en esquina y tratamiento de casos específicos como chaflanes al lado de agujeros, franjas de equilibrado o zonas en bruto.

Los dos grupos principales, zonas planas y esquinas, se dividen a su vez en varios subgrupos de código, que, aunque comparten el algoritmo básico de su grupo, difieren en parámetros. En algunos casos también se introducen algunas variaciones sobre el algoritmo base.

#### **Algoritmo de detección de zonas planas**

Se aplica a zonas del disco donde la superficie se puede considerar un plano y los defectos una variación de altura con respecto a este.

Sus variaciones son:

- Detección de defectos en superficies planas horizontales con taladrado de la superficie: El número de agujeros se especifica como parámetro. Si el número de agujeros es cero, se aplica el algoritmo base. Si es mayor de cero, se buscan los agujeros, se comprueba que el número de agujeros es el indicado, se eliminan de la detección y se aplica el algoritmo base.
- Detección de defectos en superficies planas verticales: Se aplica el algoritmo base cambiando la orientación del plano de referencia.
- Detección de defectos en superficies planas verticales sin mecanizar: Se aplica el algoritmo base con algunas modificaciones en la forma de detección. No es objeto de este informe.

#### **Algoritmo de detección en esquinas**

Se aplica en zonas de intersección entre superficies planas, que no pueden ser aproximadas por un plano en dos dimensiones sin realizar una proyección sobre un eje.

Sus variaciones son:

- Detección esquina simple: No hay elementos externos que influyan en la detección y que puedan propiciar falsos positivos. Se aplica el algoritmo base.
- Detección de esquina cercana a ventilación del disco: Se aplica en las esquinas cercanas a las ranuras de ventilación del disco. Se rectifican la excentricidad del giro del disco y se buscan los puntos válidos (fuera de la ventilación) antes de aplicar el algoritmo.

### **Zonas especiales**

Zonas no pertenecientes a superficies planas ni esquinas, a las que, por su geometría peculiar, se les aplicarán soluciones específicas.

#### **2.1.2.3 Comunicación**

La aplicación principal debe tener en cuenta el estado de la máquina (parada, en marcha, preparada para medir, en fallo, etc) y pasar a modo espera hasta recibir la orden de operación desde el software de automatización implementado en el PLC.

Una vez el PLC envía la orden de operación se queda en espera hasta que la aplicación de visión esté preparada para comenzar la medición. En ese momento se colocarán los sensores y cuando estos estén en posición, se empezará a girar el disco. A su vez comenzará la adquisición de datos. En paralelo se irán tratando y procesando estos datos, almacenando los resultados de la medición de cada zona (inspección ok o no ok, los defectos encontrados y la zona en la que encuentran y sus respectivas medidas). El procesamiento de cada conjunto de datos comienza en cuanto se acaba la adquisición en la zona correspondiente del disco. En la Figura 7 se muestra un resumen de la comunicación entre PC y PLC.

Las inspecciones de ambas estaciones se harán de forma paralela y se fusionarán en un solo resultado (que será no ok en caso de que se detecte algún defecto en alguna de las dos estaciones).

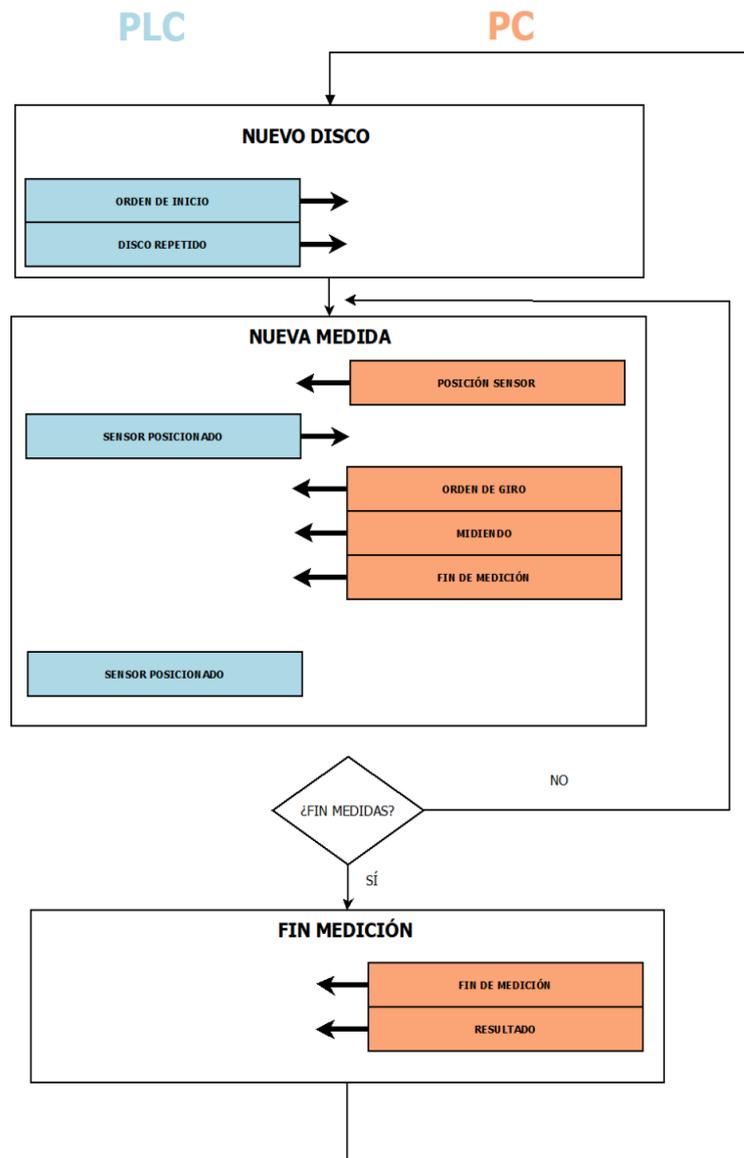


Figura 7. Resumen comunicación PC-PLC

Cada estación será un proceso independiente, de modo que se manejarán dos procesos de forma simultánea. Como pasarela de comunicación entre el PLC y el pc de visión, se ha seleccionado un Gateway de Anybus (Figura 8) que puede funcionar en modo *ModbusTCP server* por lo que ambos procesos podrán comunicarse a través de ModbusTCP como clientes y enviar los comandos que serán redirigidos al PLC a través de una comunicación Profinet.



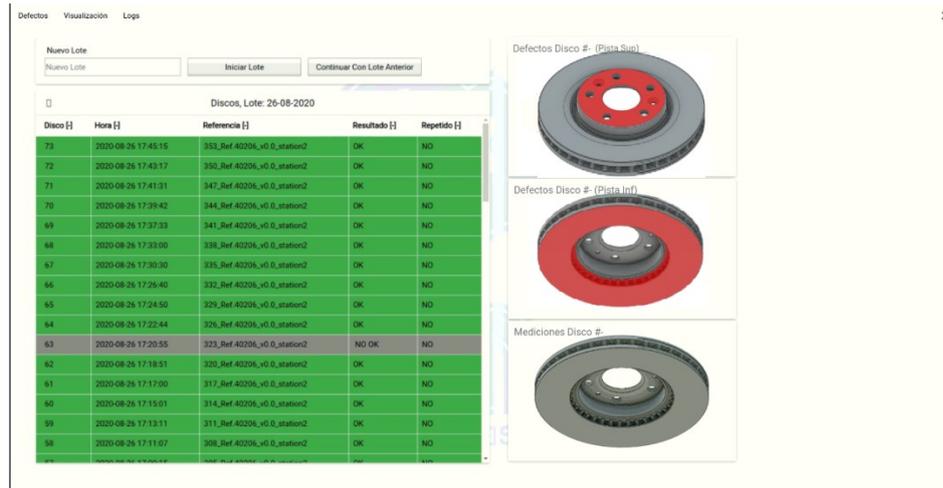


Figura 10. Ejemplo de implementación de RemoteInterface. Representación gráfica de las zonas con defecto en un disco rechazado.

### 3 Objetivos y alcance

Los objetivos de este trabajo fin de máster constituyen una parte fundamental del total del proyecto y se describen a continuación:

1. Desarrollo de un plugin de adquisición de datos para los sensores.
2. Desarrollo de un algoritmo de detección de defectos para superficies planas y superficies planas que incluyan agujeros de sujeción mecanizados.
  - a. Desarrollo de un prototipo de programa de detección en Matlab para llevar a cabo los primeros experimentos.
  - b. Recolección de datos con ayuda de un brazo robot y un cojinete neumático que simularán el funcionamiento de las estaciones de medición.
  - c. Desarrollo de una aplicación en C++ basada en el prototipo y se pasará a la experimentación en la propia máquina. El código estará basado en openCV.
  - d. Prueba del software sobre la máquina de detección de defectos.
3. Desarrollo de algoritmo de detección en esquinas.
  - a. Desarrollo del software sobre openCV, utilizando como base el código desarrollado para superficies planas.
  - b. Prueba del software en la máquina de detección de defectos.
4. Pruebas de falso rechazo y no rechazo sobre la máquina de detección de defectos.

Como se ha comentado en apartados anteriores, el software desarrollado será incluido en una máquina de detección de defectos para discos de freno que será, a su vez, desarrollada por varias empresas. DSI Plus será la empresa encargada del sistema de visión, mientras que la parte mecánica y la automatización han sido desarrolladas por dos empresas externas.

Dentro del alcance de esta parte del proyecto se incluye:

El desarrollo e implementación del plugin de adquisición de datos funcional que pueda ser utilizado como base para la aplicación real, y que además sirva para realizar pruebas sencillas desde cualquier aplicación de adquisición.

El desarrollo e implementación del software de detección, válido tanto para zonas planas como para esquinas. Se incluirá la detección y conteo de los agujeros de amarre del disco y detección de presencia de equilibrado. Será totalmente funcional en pistas, diámetro externo, caras de amarre, diámetro interno, diámetro interno pista inferior y pared del gorro tanto interior como exterior (las zonas del disco se explicarán más adelante).

Además, se tendrá como objetivo detectar defectos de 1mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad con un falso rechazo por debajo del 5%. Se incluye en el alcance llevar a cabo las pruebas que permitan comprobar que se cumple los márgenes requeridos para el límite de detección y el falso rechazo en esta fase del proyecto.

## **4 Metodología**

Una vez definidos los objetivos del proyecto por parte del cliente y el alcance de la parte desarrollada por el alumno, se dividen los objetivos planteados en unidades realizables de manera independiente que luego puedan ser integradas entre sí. Dentro del trabajo desarrollado, se encuentran dos grandes bloques: el programa de adquisición de datos y el algoritmo de detección de defectos para las distintas superficies del disco. Previamente al desarrollo del software, el primer paso es escoger y familiarizarse con la tecnología. Una vez seleccionada la tecnología más adecuada para cumplir con los objetivos propuestos, el siguiente paso es el desarrollo del software. En primer lugar, se diseña e implementa el software de adquisición, que permite tomar datos de las superficies del disco que se pretende inspeccionar. A partir

de estos datos, se diseñan los algoritmos de detección y se desarrolla e implementa el software de detección de defectos. Por último, se integran los dos programas en la aplicación principal y se realizan pruebas sobre la máquina.

## **4.1 Selección de la tecnología**

Dentro de la inspección sin contacto, existen varias tecnologías aplicables al proyecto planteado por el cliente que se resumen a continuación:

### **4.1.1 Visión 2D convencional**

Aunque es la opción más barata y sencilla a nivel hardware, presenta varios inconvenientes. Por un lado, si se trabaja sobre una sola cámara se pierde la información relativa a la profundidad. Se podría trabajar con esta tecnología para detectar o exceso de agujeros de sujeción, conteo de pivotes en las zonas ventiladas o presencia de rebabas y faltas de material de gran tamaño en piezas en bruto [2].

Sin embargo, para la detección de defectos superficiales, la inspección se vería afectada por el aspecto del disco, suciedad o cambio de tonalidad debido al mecanizado.

Para la detección de defectos de pequeño tamaño, se necesitarían varias cámaras que permitiesen obtener información en 3D mediante triangulación. Con el objetivo de cumplir con el cuaderno de cargas entregado por el cliente, se necesitarían cámaras de gran resolución. Por otro lado, el disco de freno tiene superficies irregulares y oquedades que dificultan la inspección mediante cámaras 2D.

Otra desventaja de la visión convencional es que es necesario un riguroso control de escena, siendo importante evitar los cambios de iluminación y el posicionamiento de la pieza.

La visión 2D convencional fue la primera tecnología implementada por la empresa contratante. Tras dos años de proyecto no se consiguieron resultados favorables.

### 4.1.2 Generación de modelos 3D mediante luz estructurada

Los sistemas de generación de modelos 3D mediante luz estructurada se basan en reconstruir la forma y características de un objeto mediante la proyección de un patrón de luz sobre este (Figura 11). El sistema consta de una fuente de luz (que proyecta el patrón) y una cámara que captura los puntos de la superficie. Mediante la búsqueda de variaciones en el patrón proyectado se obtiene información en tres dimensiones del objeto escaneado [3].

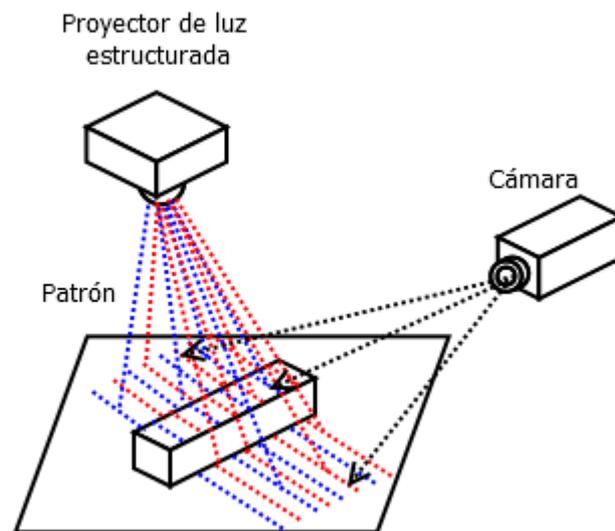


Figura 11. Esquema de funcionamiento de escáner de luz estructurada.

La principal ventaja de la tecnología de luz estructurada es la velocidad de adquisición. Además, los dispositivos basados en luz estructurada son extremadamente precisos y ofrecen una alta resolución [4]

La mayor desventaja con respecto a otros sistemas es que la luz ambiental y la iluminación de la escena tiene una gran influencia en la precisión de la medición mediante luz estructurada [5].

Las condiciones de inspección de las líneas de producción de la empresa contratante dificultan la implementación de esta tecnología. La luz ambiente es variable, así que se requeriría una cabina aislante de la luz con una fuente de iluminación propia (además de la propia del sistema de medición). Aunque la

tecnología sería adecuada para la superficie que se pretende inspeccionar, resulta menos económica y más compleja de implementar que otras opciones.

### 4.1.3 Holografía conoscópica

La principal ventaja de los sensores de holografía conoscópica es que permiten medir e inspeccionar oquedades y geometrías muy complejas con alta precisión. Los sensores de holografía alcanzan una resoluciones de hasta  $1\mu\text{m}$  [6].

Sin embargo, se descarta esta tecnología para el proyecto por varios motivos:

- No es necesaria una resolución tan elevada. Los defectos contemplados en el cuaderno de cargas son, como mucho, de 0.5 mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad.
- Las zonas del disco que se pretende inspeccionar son zonas mayoritariamente planas o de geometrías sencillas. La máquina de inspección de poros no está diseñada para inspeccionar las zonas interiores del disco (como la zona sin mecanizar en el interior de los ventilados), que se inspeccionan en otras máquinas.
- La inspección sería demasiado lenta. La mayoría de los sensores de holografía conoscópica comerciales son puntuales, y aunque se integrase un sensor lineal, la franja de inspección de estos sensores es muy reducida debido a que la distancia de trabajo es muy corta. Se muestra como ejemplo la hoja de características del sensor ConoLine-100 de Optimet (figura) [7]. El tamaño de la línea en el rango de medición óptimo son 15.5 mm. Para medir toda la superficie del disco en los 35s de tiempo de ciclo que impone el cliente se necesitaría girar a más de 600 rpm e inspeccionar el disco en más de 10 tomas o tener varios sensores por cada cara del disco y referenciarlos entre sí. No resulta posible utilizar esta tecnología en las condiciones propuestas por la empresa contratante. No es posible girar el disco a altas velocidades y el espacio disponible es demasiado reducido. Utilizar varios sensores por cada cara del disco encarecería demasiado el proyecto.

## Technical specification\*

### Vertical axis Z

Measurement range <sup>(1)</sup>	mm	30
Standoff <sup>(2)</sup>	mm	50
Accuracy <sup>(3)</sup>	μm	20
Linearity <sup>(4)</sup>	±%	0.05
Reproducibility (dynamic) <sup>(5)</sup>	μm	6
Angular coverage X <sup>(6)</sup>	°	170

### Line specifications

Lines / sec		100
Line span	°	10
Line length @ near range	mm	13
Line length @ center range	mm	15.5
Line length @ far range	mm	18
Line resolution @ mid range	mm	0.09
Line width (X direction) @ center range	μm	47
Adjustable line angle	°	-30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, +5, +10, +15, +20, +25, +30
Angular coverage (X)	°	220

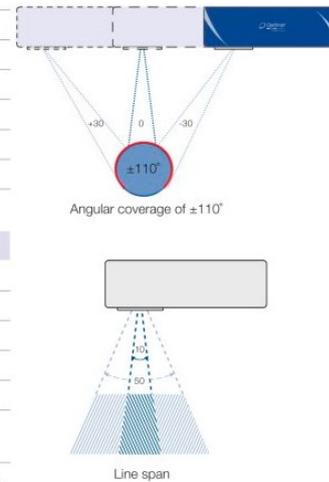


Figura 12. Especificaciones del sensor ConoLine-100 de Optimet [7].

## 4.1.4 Triangulación láser

Al contrario que los sensores de holografía conoscópica, los sensores de triangulación permiten medir grandes superficies en un solo escaneo. Se pueden encontrar sensores de triangulación láser comerciales con distintos rangos de trabajo y tamaños de línea láser (Figura 13), lo que los hace muy versátiles.

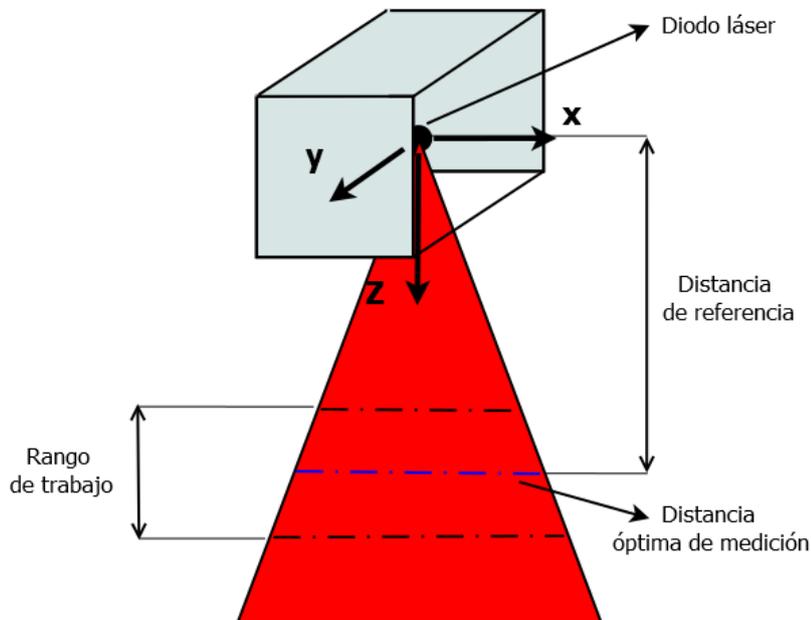


Figura 13. Características del sensor de triangulación láser.

Aunque estos sensores son menos precisos y tienen menos resolución que los sensores de holografía conoscópica, resultan más adecuados para el tipo de

inspección que se desea realizar. Como el sistema no está pensado para llevar a cabo controles dimensionales de gran precisión, si no para detectar defectos del orden de milímetros, la resolución de los sensores de triangulación láser resulta suficiente.

Además, son más baratos que los sensores de holografía y que los sensores basados en luz estructurada.

Esta es la tecnología elegida para el desarrollo del proyecto.

## 4.2 Estudio de la tecnología. Triangulación láser

Los sistemas de visión artificial basados en la triangulación 3D se emplean en todo tipo de industrias, desde la fabricación de automóviles y electrónica hasta las fábricas de madera. Si bien el concepto básico de medición mediante triangulación es simple, hay una serie de detalles importantes que deben abordarse al implementar dichos sistemas. Estos incluyen cómo se configuran los sistemas de triangulación 3D basados en láser y cómo se especifican los parámetros de la línea láser.

En los sistemas de triangulación láser, se proyecta una línea estrecha de luz sobre una superficie 3D que aparece distorsionada desde cualquier perspectiva que no sea la del propio proyector (Figura 14).

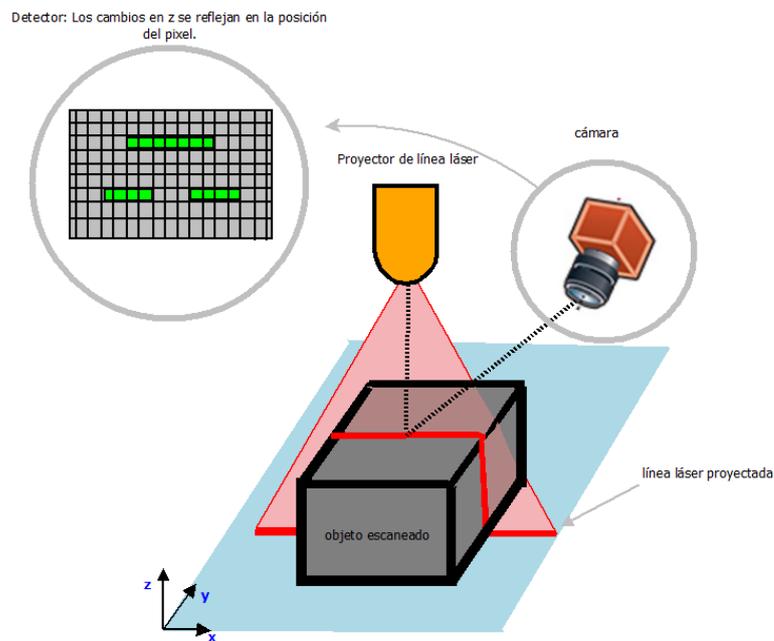
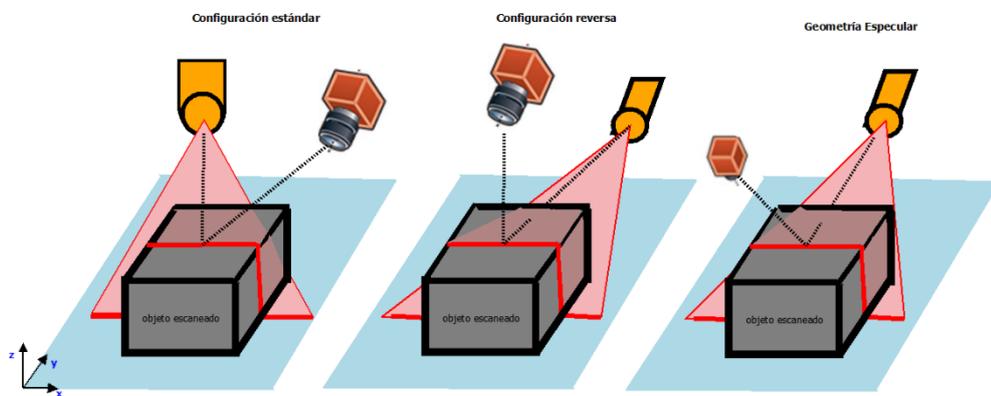


Figura 14. Esquema explicativo del funcionamiento de un sistema de triangulación láser

La distorsión producida por la perspectiva de la cámara se utiliza para obtener las componentes de las dimensiones del objeto escaneado.

Hay cuatro componentes principales de un sistema de triangulación 3D: la cámara, el proyector de línea láser, un mecanismo que mueve el objeto o el sistema de cámara/láser a través del campo de visión y un software para procesar los datos capturados.

Los sistemas de proyección láser se pueden implementar de varias maneras diferentes, cada una de las cuales tiene sus propias características, ventajas y desventajas (Figura 15).



*Figura 15. Diferentes posibles configuraciones del sistema de triangulación láser*

En la geometría estándar, que es el método más comúnmente empleado (ver Figura 15), la línea láser se proyecta perpendicular al plano de medición nominal (x, y). La característica más importante de esta configuración es que las variaciones de altura del objeto a lo largo de la línea proyectada no producen un cambio en los valores de la coordenada 'y' de la línea. Esto simplifica los cálculos posteriores necesarios para reconstruir la forma del objeto, lo que resulta en un sistema más rápido, preciso y fácil de calibrar durante la configuración. Una desventaja de esta configuración es que la cámara ve el objeto con un ángulo de incidencia. Esto aumenta la profundidad de campo que debe adaptarse para mantener el enfoque a medida que varía la altura del objeto. Otra desventaja, es que se pueden producir oclusiones cuando la cámara no se sitúa perpendicularmente a la superficie que se quiere escanear.

Cambiando las posiciones del proyector láser y la cámara se obtiene la geometría inversa. Esta configuración ofrece una mayor resolución en altura con respecto a la configuración estándar. Dado que la cámara se posiciona perpendicularmente al plano de medición, no hay oclusión en esta geometría. Sin embargo, en la configuración de geometría inversa, un cambio en la altura de la pieza provoca un cambio en la coordenada 'y' de la línea, lo que hace más complejo el cálculo de los resultados. Esta configuración es generalmente más útil con objetos planos.

En configuraciones de geometría especular, tanto el láser como la cámara se encuentran en ángulos similares y no normales a la superficie. Tener tanto proyección oblicua como ángulos de visión proporciona una mayor resolución en altura con respecto a cualquiera de las configuraciones descritas anteriormente. Sin embargo, en esta disposición, es posible que la cámara vea reflejos especulares o casi especulares del láser. Esto puede causar errores de medición si estos reflejos producen saturación en el detector. Por otro lado, una mayor reflexión podría usarse para aumentar los niveles de señal de los objetos de colores oscuros, ya que los objetos oscuros reflejan menos luz, lo que hace que el nivel de la señal de medición sea más bajo; en otras palabras, el detector tiene menos luz para medir. Trabajar cerca del ángulo de reflexión especular generalmente proporciona el nivel más alto de reflectividad para un objeto relativamente no rugoso. Por tanto, al medir un objeto oscuro y liso, esta geometría puede resultar ventajosa. Sin embargo, si el objeto tiene mucha textura, es posible que trabajar en el ángulo especular no produzca un gran aumento de la reflectividad.

En la configuración de geometría especular, un cambio en la altura de la pieza altera la posición de la coordenada 'y' de la línea, lo que hace que sea computacionalmente más complejo realizar los cálculos. Como la cámara se encuentra en ángulo, en esta configuración también pueden producirse oclusiones.

La configuración estándar es la utilizada por los sensores elegidos en este proyecto.

## 4.3 Selección de los sensores

Para seleccionar el sensor de triangulación láser adecuado, se deben de tener en cuenta principalmente tres características:

- Profundidad de campo de la cámara: La distancia a la que la cámara del sensor enfoca los objetos con nitidez ha de ser adecuada para la distancia a la que se pretende medir.
- Resolución: Adecuada para el tamaño de defecto que se quiere detectar. Demasiada resolución encarecerá el sistema y dará una excesiva cantidad de datos que harán más lentos los cálculos, mientras que una resolución insuficiente impedirá la correcta detección de los defectos más pequeños.
- Ancho de línea: Adecuado al tamaño de la superficie que se pretende inspeccionar en una sola medición.

Se utilizan sensores de triangulación láser de *AutomationTechnology* (sensor AT en adelante) modelo C5-4090CS (Figura 16), con una distancia de trabajo de 100mm y una apertura a la distancia de trabajo nominal de 100mm que encajaban con la geometría de la máquina, el tamaño y forma de los defectos que se pretendían detectar y las características de las superficies a inspeccionar.



Figura 16. Sensor4090CS23-100

## 4.4 Desarrollo del software de adquisición

El software se desarrollará partiendo de una librería perteneciente a DSI Plus y desarrollada para adquirir desde sensores de holografía conoscópica *Conoprobe* de *Optimet*. Se mantendrá la estructura original del plugin de adquisición para

holografía conoscópica, pero se sustituirán los métodos y funciones por las propias del sensor AT. Para ello se utilizarán las librerías *Common Vision Blox*, proporcionadas por *Steininger Imaging*, que pueden ser utilizadas tanto en Windows como en GNU/Linux. Además, proporcionan herramientas para varios entornos de programación entre los que se encuentra C++, entorno elegido para el desarrollo de este software. Una vez implementado el software de adquisición, se llevarán a cabo las primeras pruebas experimentales sobre los discos.

El objetivo del software de adquisición es que pueda ser utilizado como interfaz entre el sensor y una aplicación externa. Tendrá dos funciones principales: Por un lado, servirá para pretratar los datos de forma que puedan ser leídos por el software de procesamiento. Por otro lado, permitirá guardar los datos en distintos formatos para que puedan ser almacenados y procesados *offline*.

## 4.5 Identificación de las geometrías del disco

### 4.6 Tipos de superficies

Con el objetivo de simplificar el desarrollo, se busca dividir el disco en zonas con características similares. Tras el análisis, se llega a la conclusión de que el disco tiene tres tipos de superficies: zonas planas (horizontales y verticales), esquinas y zonas especiales como agujeros, equilibrados, diámetros internos, biseles, etc. (Figura 17).

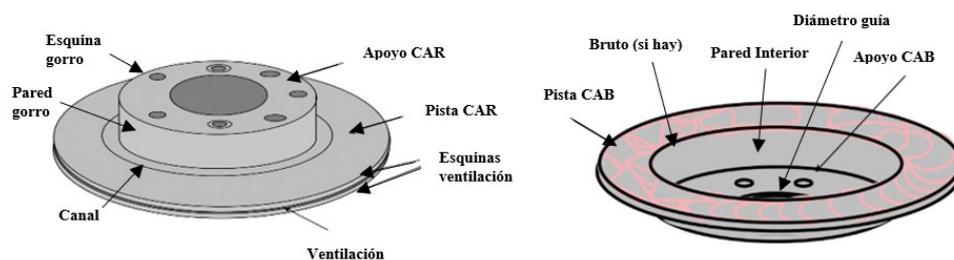


Figura 17. Descripción de las zonas del disco.

#### 4.6.1 Zonas planas

Las zonas planas son superficies horizontales y lisas del disco, donde las variaciones producidas por irregularidades en el mecanizado solo tienen influencia

sobre un eje (Figura 18). Hay dos tipos de zonas planas, las que tienen agujeros de sujeción y las que no.

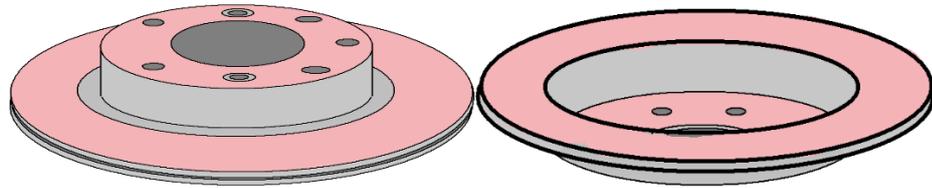


Figura 18. Descripción de las zonas planas del disco de freno

#### 4.6.2 Esquinas

Las esquinas son zonas donde las variaciones producidas por irregularidades en el mecanizado tienen influencia sobre dos ejes (Figura 19).

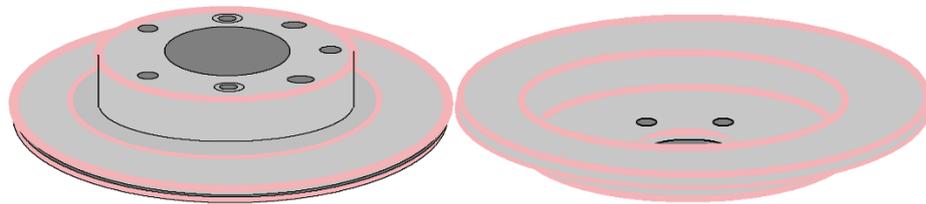


Figura 19. Descripción de las zonas de esquina del disco de freno

#### 4.6.3 Zonas especiales

Son zonas del disco que se deben analizar por separado. Algunos ejemplos de estas zonas son los agujeros, el equilibrado del disco, el diámetro guía o el bruto. Los agujeros, el equilibrado y el diámetro guía son zonas pequeñas, en las que se pierden datos con más frecuencia que en otras zonas y que tienen una geometría muy particular, pero que siempre se repite y que tiene una tolerancia dimensional pequeña. En cuanto al bruto, es una zona más sencilla de tratar ya que es mate, lo que evita los brillos en la superficie, y los defectos buscados son más groseros que en el resto de las zonas.

El análisis de estas zonas está fuera del alcance de este proyecto.

### 4.7 Desarrollo del software de detección de defectos

Una vez acabado el análisis inicial, se desarrolla el software de detección de defectos.

## 4.7.1 Programa de detección

Una vez terminado el plug-in de adquisición, se realizaron las primeras pruebas sobre los discos y se comienza el desarrollo del algoritmo de detección de defectos.

Se desarrolla un prototipo del programa final en Matlab que solo contempla el caso de zonas planas y zonas planas con agujeros.

### 4.7.1.1 Prototipo Matlab

El objetivo de este prototipo es hacer la primera evaluación de la validez del algoritmo y mostrar resultados tangibles al cliente.

Se divide el software en dos bloques: el bloque de detección y el bloque de clasificación y visualización de resultados.

### 4.7.1.2 Bloque de detección

El bloque de detección consiste en una implementación del algoritmo de detección de defectos en superficies planas con y sin agujeros mencionado en apartados anteriores con herramientas de Matlab.

Se utiliza Matlab porque es una herramienta muy potente para el desarrollo primario del software. Cuenta con un potente conjunto de librerías de visión que permiten probar distintas soluciones de forma rápida y sencilla. Al estar orientado a trabajar con matrices, resultó ventajoso para el desarrollo del primer prototipo.

Se realizan las primeras pruebas y se decide aplicar el procedimiento mencionado en secciones anteriores.

#### **Tratamiento de datos**

Se convierten los datos de entrada en cuatro mapas de píxeles: uno de radios, uno de ángulos, uno de profundidades y uno de datos brutos del sensor.

A partir de este momento, se trabaja solo con los datos en bruto del sensor.

#### **Primer filtrado**

Se aplica el algoritmo de Hampel [12] (en el prototipo inicial se utiliza `isoutlier()` de Matlab, que sigue el mismo principio) para realizar el primer filtrado sobre la imagen. Se aplican filtros de distintos tamaños y se suman. Esta práctica se

descarta en versiones posteriores por ser muy lenta y no aportar una diferencia significativa en los resultados.

Se realiza un filtro de mediana para eliminar los píxeles sueltos. En la versión final, se sustituye por una apertura morfológica por ser más rápida y dar mejores resultados.

### **Búsqueda de agujeros**

En caso de que el número de agujeros buscado sea mayor que cero (se pide como parámetro) se realiza una búsqueda de los agujeros. Se aplica un filtro de Hampel de tamaño 600 sobre los datos y se clasifican las masas por áreas. Se desechan aquellas masas que son 10 veces menores que la mediana de las masas. Esta práctica se descarta en la versión final y se sustituye por un filtrado más agresivo.

Se filtran los datos con operaciones morfológicas y se utilizan como máscara sobre la imagen de candidatos inicial.

#### **4.7.1.3 Bloque de clasificación**

La empresa contratante estipula una serie de criterios para la consideración de un poro como defecto. Uno de ellos, es que cualquier poro que este a menos de 0.5 mm de otro poro es considerado defecto por ‘nebulosa’. Estos defectos se llaman ‘defectos no aislados’.

Se clasifican los defectos como ‘rojos’ si superan el límite de control designado para la zona en la que se encuentran y naranjas si no lo superan, pero son visibles.

Con el fin de poner un límite coherente a la búsqueda de defectos no aislados fuera de los rangos de detección requeridos para los defectos aislados, se han establecido una serie de criterios de detección basados en la profundidad y diámetro máximos aceptados para cada superficie del disco. Se considera qué:

- Un poro es inadmisibles y por tanto marcado en rojo si: o es mayor del 75% del diámetro y profundidad recogido en el cuaderno de cargas (Criterio del lado de la seguridad). o es mayor de 25% del diámetro y profundidad recogido en el cuaderno de cargas y además está cerca de otro poro que cumpla la misma restricción.

- Un poro es considerado admisible pero marcado en naranja si es mayor del 50% del diámetro y profundidad recogido en el cuaderno de cargas y no está cerca de ningún otro poro.

Se han realizado pruebas con distintos umbrales de detección para buscar el menor ratio de falsos positivos que no infiera en falsos negativos para defectos dentro de los límites establecidos en el cuaderno de carga.

Por encima de un 15% solo se detecta uno de los tres defectos, pero al no entrar dentro de la especificación de defecto ‘naranja’ y no encontrarse los otros dos defectos, este se descarta. Para umbrales más pequeños, los tres defectos aparecen, pero traen consigo falsos positivos provocados por los desprendimientos de granito del disco, los surcos y el propio ruido del sensor.

El límite que se considera adecuado para la detección de defectos dentro del rango de poros admitidos, pero no aislados, es  $\frac{1}{4}$  del diámetro y profundidad especificadas como máximas en cada zona. Por debajo de ese umbral, empiezan a aparecer falsos positivos debidos a diferentes factores descritos en este documento. En el momento actual se detectan y clasifican tres tipos de defectos: defectos inadmisibles por especificación (rojos): aquellos que superan un 75% de la profundidad y diámetro dados como máximos en cada zona. Defectos inadmisibles por proximidad: aquellos, que, aun no superando el criterio anterior, superan el 25% del diámetro y profundidad máximas admitidas en la zona correspondiente y están a una distancia en la que se consideran ‘agrupados’ o ‘no aislados’ en dicha zona. Admisibles: aquellos que se encuentran aislados, pero están entre el 50% y el 75% de la profundidad y el diámetro admitidos para la zona en la que están (naranjas).

#### **4.7.2 Prototipo OpenCV**

Se porta el prototipo a c++ mediante las librerías de opencv y se desarrolla el primer prototipo del algoritmo de esquinas. Este software es muy parecido a la versión final implementada en la máquina de detección de defectos.

Los cambios con respecto al primer prototipo son:

- El mapa de profundidades en el algoritmo para zonas planas se realiza a partir de los datos en Z calibrados en lugar de utilizar el bruto del sensor al comprobarse que se obtienen mejores resultados sobre el nuevo mapa.

- El filtro de mediana que filtra los píxeles sueltos se sustituye por una apertura morfológica por ser más rápida y dar mejores resultados.
- Se sustituye el filtrado de los agujeros por área por un filtrado más agresivo mediante operaciones morfológicas.
- Se implementa el algoritmo de detección en esquinas.

### 4.7.3 Integración en el software principal

Se integra el prototipo en el software principal y se comienzan las pruebas sobre producción. Se refinan algunos parámetros de configuración, como la rugosidad del disco, el tamaño de las ventanas de los filtros, o el algoritmo de búsqueda del equilibrado del disco.

## 5 Trabajo realizado

### 5.1 Desarrollo del software de adquisición

#### 5.1.1 Estudio de la tecnología

Con el objetivo de conocer mejor la tecnología, se desarrolla un software de adquisición sencillo cuyo único propósito es realizar experimentos con los sensores AT y familiarizarse con las librerías *Common Vision Blox* de *Steimner Imaging* de las que se hablará más adelante. Para ello se estudian las características de la tecnología, el funcionamiento del sensor AT, las funcionalidades que ofrecía las limitaciones que tiene y el funcionamiento de la aplicación Gennicam Browser, una aplicación, también de *Steimner Imaging*, basada en las librerías CVB, diseñada para conectarse fácilmente a cualquier sensor AT y poder configurarlo de forma sencilla.

Puesto que las superficies a inspeccionar siempre son lisas y no presentan geometrías que puedan dar lugar a oclusiones, y siendo además los defectos siempre variaciones en altura con respecto a la superficie del disco.

Se estudian las características del sensor para poder elegir las configuraciones y el algoritmo de detección que mejor se adecuan a los escaneos que se pretenden obtener

Los sensores compactos C5 (C5-CS) escanean objetos mediante triangulación láser. Esto ocurre a través de la proyección de una línea láser a largo de la superficie

del objeto (Figura 20). Escaneando la línea láser, se obtiene el perfil 3D del objeto y se genera la imagen de este, obtenida por el sensor [9].

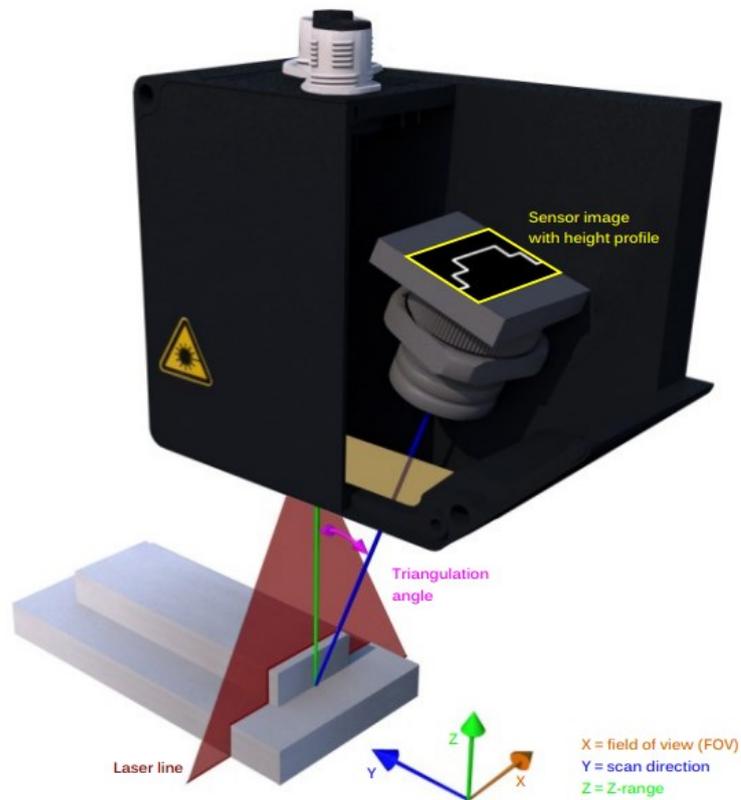


Figura 20. Ejemplo de escaneo mediante sensor C5-CS sobre objeto en 3D [8]

El C5-CS genera los datos de escaneo 3D mediante un procesamiento interno de las imágenes de la línea. El procesamiento puede realizarse mediante diferentes algoritmos de evaluación, que pueden ser elegidos por el usuario. El sensor cuenta con varios modos de adquisición basados en los algoritmos de evaluación disponibles [9]. Los modos utilizados en este proyecto son dos:

1. Modo imagen (IMG): Usado para configurar el sensor
2. FIRPeak: seleccionado finalmente para la implementación final

### 5.1.2 Modo imagen (IMG)

En el modo de imagen, la serie de modelos C5 funciona de forma similar a una cámara CMOS estándar.

En este modo, los datos de escala de grises se adquieren a través de la interfaz de la cámara, con una resolución de 8 o 10 bits.

Desde el Genicam Browser, la imagen de este modo se vería así (Figura 21):



Figura 21. Ejemplo del modo imagen de sensor At serie C5

Como se ve en la figura, en este modo es posible ver directamente la imagen sin tratar que el sensor obtiene de la proyección de la línea láser. Observando la proyección de la línea láser sobre el objeto, resulta muy cómodo ajustar la medida de la región de interés (como se explicará más adelante).

### 5.1.3 Modo FIR Peak (FIRPeak)

En este modo, se calcula la primera derivada de la curva de Gauss del perfil de intensidad proyectado por la línea láser (Figura 22).

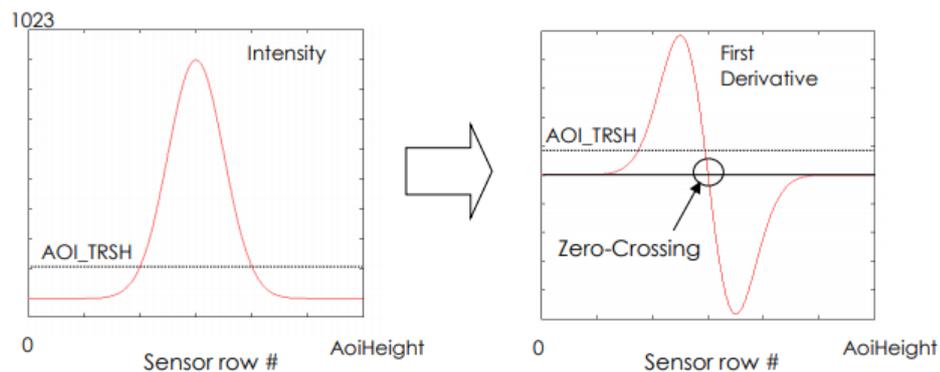


Figura 22. Cálculo de la primera derivada de la curva de Gauss del perfil de intensidad de la línea láser proyectada sobre el objeto. [9]

Se calcula el punto de paso por cero de la primera derivada y se da como salida de intensidad. En este caso, el umbral AOI\_TRSH se utiliza para detectar el primer flanco ascendente de la señal de intensidad derivada. Los valores válidos de AOI\_TRSH oscilan entre 513 y 1023 (Mono16).

Este modo de funcionamiento se comporta mejor antes cambios bruscos en la luminosidad. Además, el suavizado de la imagen de salida es menor, así que se pierde menos detalle del objeto escaneado. Por otro lado, al no suavizar la imagen, la adquisición se presenta con más ruido [10].

#### 5.1.4 Modo intensidad máxima del perfil (MAX)

En este modo se calcula la intensidad máxima del perfil proyectado por la línea láser (Figura 23). El resultado incluye la posición del punto de valor máximo (P<sub>MAX</sub>) así como el valor máximo de la intensidad (IMAX).

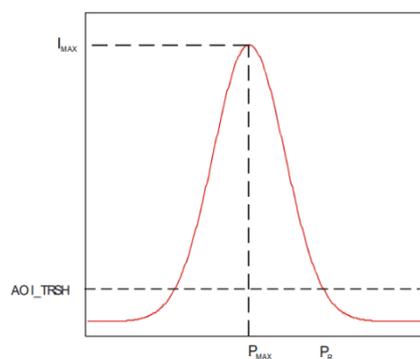


Figura 23. Cálculo del valor máximo de la curva de Gauss del perfil de intensidad de la línea láser proyectada sobre el objeto. [9]

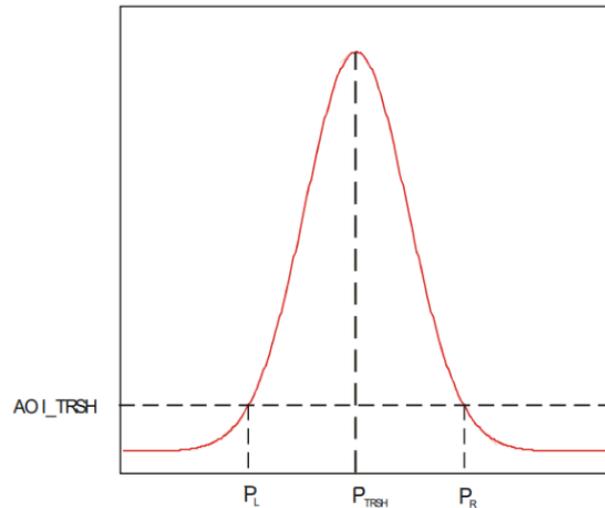
El cálculo del valor de la posición del pico máximo se realiza con una precisión de píxel simple, es decir, la evaluación de 1088 filas ofrece un rango de posición de 0 a 1087 píxeles (11 bits). No hay evaluación subpíxel. Si hay más de un máximo local (por ejemplo, cuando la intensidad está saturada), la posición del primer máximo encontrado es la salida.

La detección de la posición de máxima intensidad se puede mejorar habilitando el modo de suavizado del filtro FIR de la cámara. Esto hará que se pierdan detalles de la superficie del objeto, pero atenuará el ruido de la señal.

#### 5.1.5 Modo Umbral (TRSH)

En este modo, se detecta la posición del borde izquierdo (PL) y derecho (PR) del perfil proyectado por la línea láser para un valor umbral dado (AOI\_TRSH).

El valor de posición de la línea láser es aproximadamente la media de los dos extremos encontrados. Para simplificar la representación digital, la división entre 2 no se realiza y, por lo tanto, el valor es un número entero (Figura 24).



*Figura 24. Cálculo de los puntos de corte de la curva de Gauss del perfil de intensidad de la línea láser proyectada sobre el objeto con la recta umbral [9].*

La precisión del cálculo de la posición se puede mejorar habilitando el suavizado modo del filtro FIR de la cámara, pero igual que en el modo anterior, se pierden detalles de la superficie del objeto.

### **5.1.6 El modo Centro de gravedad (COG)**

En este modo se calcula el centro de gravedad del perfil proyectado por la línea láser. El suavizado de la imagen es más intenso en este modo de funcionamiento (Figura 25).

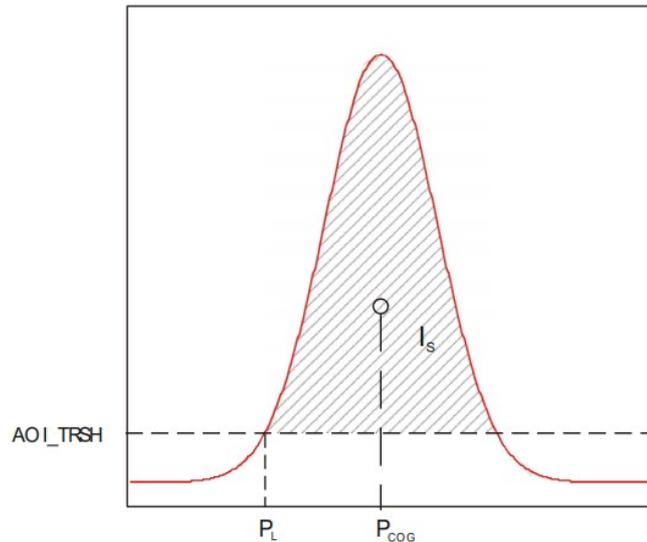


Figura 25. Cálculo del centro de gravedad de la curva de Gauss del perfil de intensidad de la línea láser proyectada sobre el objeto[9].

### 5.1.7 Algoritmo seleccionado

Dado que la superficie en la mayoría de las zonas del disco es metalizada, con lo que la presencia de brillos es mayor que en una superficie mate, y que la iluminación en la escena no es estable, al no existir un sistema de oclusión de la luz ambiente en las estaciones, se elige el algoritmo FIRPeak, que es el que mejor se comporta en superficies lisas y ante cambios de luminosidad pronunciados sobre la superficie. Sin embargo, esto no significa que no se pueda cambiar con facilidad a alguno de los anteriores en el futuro, por ejemplo, si las condiciones de luminosidad cambian.

### 5.1.8 Parámetros relevantes

El sensor AT contiene un mapa de nodos accesible desde Genicam Browser que marcan los parámetros de configuración del sensor y pertenecen a la capa de transporte del sensor, por lo que se pueden importar y exportar. La estructura de los parámetros es en forma de árbol (Figura 26). El sensor contiene varios mapas de nodos, que a su vez contienen varios nodos raíz que contienen varias ramas [1].

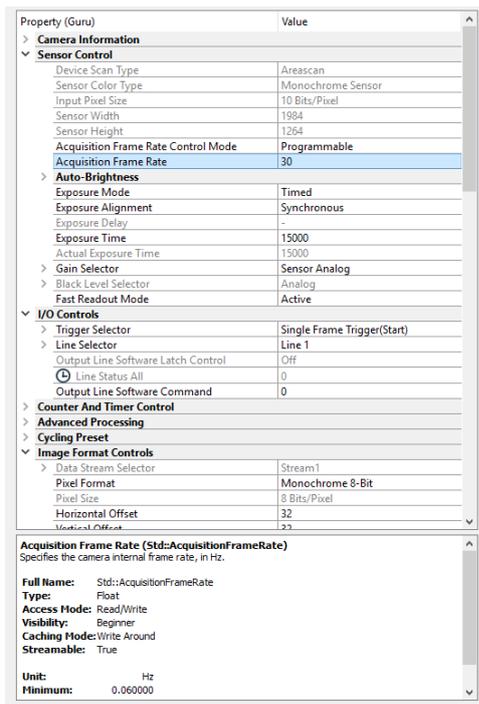


Figura 26. Ejemplo del mapa del nodos. Acceso desde Genicam Browser.

Dentro de los nodos, el sensor AT cuenta con una serie de parámetros configurables que son importantes para realizar las adquisiciones correctamente. En esta sección se explican los más relevantes, y que por tanto han sido tenidos en cuenta y añadidos a la interfaz del plugin 17-ATsensor para que así puedan ser modificados fácilmente desde esta.

#### 5.1.8.1 Configuraciones relativas a la región de interés (AOI)

La región de interés (AOI) es la franja de la imagen adquirida por el sensor que es relevante para su análisis. Los sensores AT permiten configurar qué parte de la imagen es relevante y que parte de la imagen se puede obviar, disminuyendo el tamaño de la imagen y por tanto la cantidad de datos adquiridos, y aumentando así la velocidad a la que es posible adquirir.

Aunque el sensor tiene varias opciones que permiten un autoajuste de la región de interés [9], buscando el láser sobre el objeto y centrando la región en él de forma automática, se ha decidido ajustar las regiones manualmente. Dado que el sensor está parado en el momento de la medición, el disco siempre está en la misma posición, y las zonas a medir se mantienen entre discos de la misma referencia, resulta más cómodo ajustar de forma manual la región de interés previamente a la medición, y

que esta región también permanezca constante para una misma zona en diferentes discos.

Los parámetros del AOI fijo configurables por el usuario son:

- **Height:** Alto de la imagen adquirida en píxeles.
- **Width:** Ancho de la imagen adquirida en píxeles.
- **AOI Offset:** Offset desde el origen en altura.

El ancho de la imagen afecta a la resolución de la adquisición y puede ser 512, 1024, 2048 o 4096. En este proyecto se utilizan 2048 píxeles para todas las adquisiciones.

La altura de la imagen va desde 1 hasta 1000 y determina qué cantidad de los datos visibles por el sensor se van a procesar. Cuanto más estrecha sea la franja adquirida, más rápido se puede adquirir, pero menos superficie del objeto podrá visualizarse.

#### 5.1.8.2 Control de luz

Configuraciones relacionadas con la luz de la línea láser. Las más importantes y que, por tanto, son configurables desde la interfaz son:

- **Potencia del láser:** se configura la potencia de la línea láser de 0 a 100%. Dependiendo de la superficie, la iluminación ambiente, el tipo de material, las oquedades y la distancia de trabajo interesa tener más o menos brillo en la línea.
- **Tiempo de exposición:** es el tiempo que la luz penetra en el sensor óptico en cada *frame*. Su funcionamiento es parecido al de la una cámara convencional. De este parámetro depende la cantidad de luz recogida, pero también la velocidad máxima de adquisición (a más tiempo de exposición, menos velocidad de adquisición máxima).

#### 5.1.8.3 Control de disparo (Trigger Control)

Es un conjunto de parámetros que permiten controlar cada cuanto se realiza una captura y cuál es el evento que la dispara. La captura se puede lanzar en dos modos:

- **RS422 Resolver:** la orden de disparo se da por pulsos de enconder. Es posible configurar cada cuantos pulsos de enconder se lanza una captura.
- **Free run:** El sensor captura a la velocidad de adquisición máxima permitida por las configuraciones.

### 5.1.9 Plug-in de adquisición

Con el objetivo de que sea reutilizable en otras aplicaciones, el software de adquisición se ha realizado en forma de plug-in. Esto es, un bloque de software que añade una característica o servicio a un sistema más grande, de forma que solo haya que añadirlo al programa principal. Si el bloque tuviera que ser actualizado o cambiado en el futuro, solo habría que eliminar el viejo bloque e introducir el nuevo y, siempre y cuando tuvieran las mismas entradas y salidas, el sistema seguiría funcionando. Además, este mismo bloque puede ser utilizados en otros sistemas donde se requiera la misma funcionalidad.

El sensor incluye un software de adquisición en base Windows para poder trabajar con él. Sin embargo, el programa que incluye es muy limitado y el sistema operativo requerido es GNU/Linux, para el que la empresa fabricante no facilita ninguna herramienta. Se investiga y se encuentra el programa de adquisición Genicam Browser, de steimner imaging, basado en Common Vision Blox. Common Vision Blox es un conjunto de software y librerías pensadas para aplicaciones de visión artificial. El software ofrecido tiene la finalidad de permitir al usuario adquirir, transferir manipular e interpretar la información extraída de una cámara.

Genicam Browser es una herramienta útil pero que no tiene la funcionalidad buscada. No permite la captura de datos prolongada desde el sensor, ni ser integrado en otra aplicación. Sin embargo, la base de Genicam Browser son una serie de librerías que Steimner imaging facilita también en su página web. Las librerías están portadas a varios entornos de programación, entre los que se encuentra c++.

El plug-in de adquisición se ha denominado 17-AtSensor, continuando con la nomenclatura interna de las librerías de la empresa. Está diseñado para que permita al usuario conectarse a cualquier sensor AT de forma sencilla, simplemente disponiendo del archivo de configuración correspondiente. El archivo de

configuración del sensor AT es un archivo .bin que se obtiene desde el software propio del sensor y que contiene todas las configuraciones y los datos relativos a este.

El software de adquisición está basado en una librería anterior, creada con el propósito de servir como interfaz para los sensores de holografía conoscópica Conoprobe de Optimet. Se conserva la estructura y se introducen nuevos métodos adaptados a la funcionalidad del sensor AT.

Los métodos y funciones internas están basados en las librerías de Common Vision Blox [1], un conjunto de librerías proporcionadas por Steimner Imaging para el manejo del sensor desde distintos entornos de programación. En este caso, el entorno elegido ha sido c++, por ser el lenguaje en el que se programan la mayoría de los proyectos de la empresa.

El plugin 17-AtSensor ha servido para realizar los primeros experimentos con el sensor sobre los discos y como base para el plugin definitivo que se ha implementado en la máquina. También sirve diariamente, junto con una pequeña aplicación, como programa de adquisición rápida desde el sensor AT. RELEER

Se desarrolla un Plug-in de adquisición de datos en base a las librerías Common Vision Blox de staimmer imagine, que permiten el manejo de los sensores ópticos desde un entorno C++. El plug-in permite adquirir y guardar datos en formato raw y txt, configurar el sensor tanto desde un archivo de configuración xml como desde la interfaz de usuario y la visualización en directo de lo que está capturando el sensor en dos modos: el modo imagen y el modo perfil.

Está compuesto de una clase principal PluginSensorAT que deriva de la clase base *DSISensorInterface*, desarrollada íntegramente desde la empresa como clase base para el control de sensores ópticos.

La clase base contiene los siguientes métodos virtuales de obligada reimplementación en las clases derivadas:

**Start():** comienza la adquisición. Se le pasa como parámetro la posición del sensor en el momento de inicio de la adquisición y su orientación.

**Stop():** Finaliza la adquisición. Se debe reimplementar en las clases derivadas. Como parámetros se le pasa la orientación final del sensor.

Además, se han utilizado los siguientes métodos en la clase derivada:

**ShowConfigDialog():** muestra el diálogo de configuración si lo hubiera.

**SetParam():** Cambia el valor de cualquier parámetro que sea configurable en el sensor.

**SetFrecuency():** Cambia la frecuencia de muestreo del sensor.

**SetPower():** cambia la potencia del láser.

Como se muestra en la figura, el plug-in se divide en tres grandes partes: adquisición, configuración e interfaz de usuario.

### **5.1.10 Interfaz de usuario (UI)**

El diálogo de configuración es la interfaz con el usuario. Puede abrirse o no desde la aplicación principal, y sirve para configurar el sensor manualmente y visualizar el escaneo en tiempo real. Tiene dos modos de visualización, el modo perfil, y el modo imagen, que se explicaran en la siguiente sección. La interfaz de usuario se conecta con el bloque de configuración y con el bloque de adquisición de manera bidireccional.

### **5.1.11 Adquisición**

El bloque de adquisición es el encargado de conectarse con el sensor, enviar la orden de inicio de adquisición y fin de adquisición, guardar los datos adquiridos y mandar la información de escaneo del láser a la interfaz de usuario en tiempo real. La adquisición ocupa su propio hilo de procesamiento, realizándose en paralelo al resto de las tareas.

Para una configuración más cómoda del sensor, se añade dentro del diálogo de configuración un botón para empezar y otro para finalizar la adquisición. De esta forma, previamente a la adquisición que se quiera realizar desde la aplicación externa, se pueden hacer pruebas desde el dialogo de configuración, realizando escaneos previos que pueden ser guardados, mostrados por pantalla o ambas.

Para mostrar el escaneo en tiempo real, se añade en la interfaz de usuario una pantalla en la que se muestran dos modos de visualización: el modo perfil, que muestra el primer perfil de cada *frame* (o imagen individual) adquirido por el sensor.

Cada *frame* del sensor, tiene un número fijo de perfiles, que este caso se han dejado por defecto (100). Cada perfil, es la posición del láser proyectada sobre la lente en cada fracción de tiempo. El periodo de adquisición marca cada cuantos milisegundos se lanza una captura, que a su vez tiene un número fijo de perfiles que marca la fracción de tiempo entre dos proyecciones consecutivas capturadas (ver Figura 27).

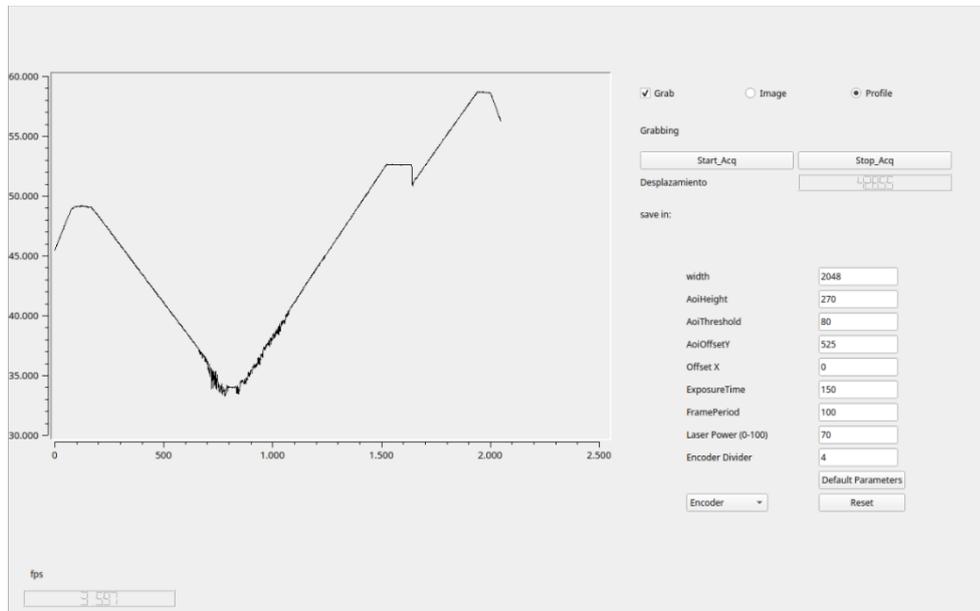


Figura 27. Interfaz de usuario para la adquisición de datos

El modo imagen, como se explica en apartados anteriores, muestra la imagen directa del sensor, en la que se ve la línea láser reflejada sobre el objeto (Figura 28).

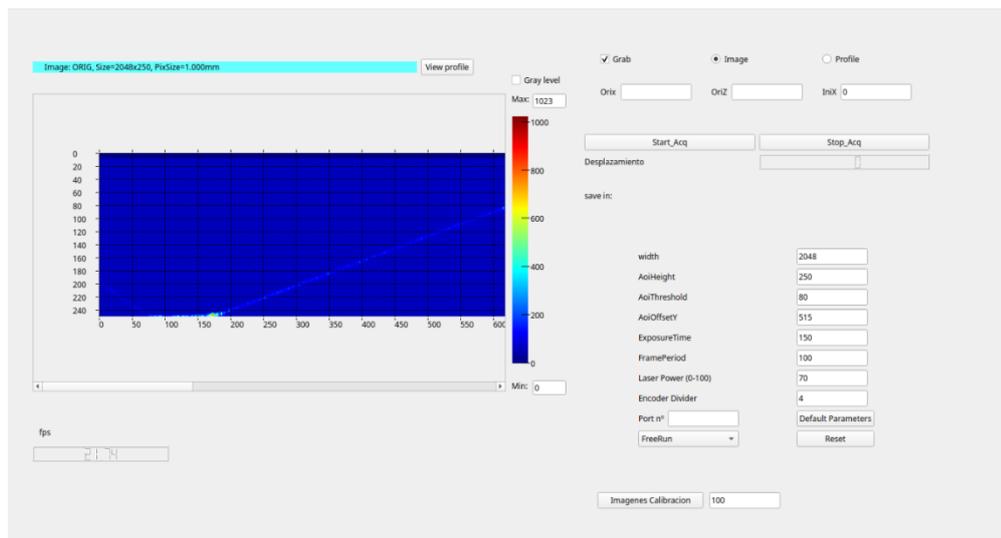


Figura 28. Modo imagen en la interfaz de usuario

Si se llama al inicio de la adquisición fuera del diálogo de configuración, el escaneo se realiza con las configuraciones guardadas y se guarda en el path configurado desde el XML.

Los datos se guardan en coordenadas cilíndricas por comodidad a la hora de analizarlos. Se toma la imagen bruta del sensor, y se calculan radio, ángulo y profundidad como se explica en secciones anteriores. Después se exporta un archivo .txt de cuatro columnas, en las que las tres primeras son radio, ángulo y profundidad y la última es el resultado bruto del sensor. También se exporta un archivo en formato raw con la imagen de los perfiles escaneados, siendo cada fila de la imagen un perfil y el número de columnas el ancho de la captura del sensor.

### **5.1.12 Configuración**

Previamente a la adquisición, se inicializa el sensor y se configuran los parámetros. Las configuraciones se cargan desde un archivo XML cuyo formato se muestra en la figura.

El método `setParam()`, accede al mapa de nodos del sensor (sección 5) y cambia el valor del parámetro especificado como cadena de texto. Así, se implementa una función `InitSensor`, que lee los parámetros guardados en el XML y cambia sus valores en el mapa de nodos del sensor. De esta forma se configuran los parámetros por defecto y ya sería posible comenzar una adquisición. En la máquina, esta es la forma de configurar los parámetros y empezar a adquirir.

Sin embargo, resulta interesante tener la posibilidad de modificar la configuración mientras se escanea, para poder configurar el sensor la primera vez o realizar pruebas rápidas.

Por ello, se añaden a la interfaz de usuario las configuraciones más básicas para poder modificarlas mientras se visualiza la imagen del sensor, en modo perfil o en modo imagen.

## **5.2 Primeras tomas de datos**

Una vez acabado el *plug-in* de adquisición, se comenzó con los experimentos. Como los dos primeros meses no se disponía de la máquina, se montó un equipo de ensayos que simulaba el funcionamiento de la máquina en la primera estación. El

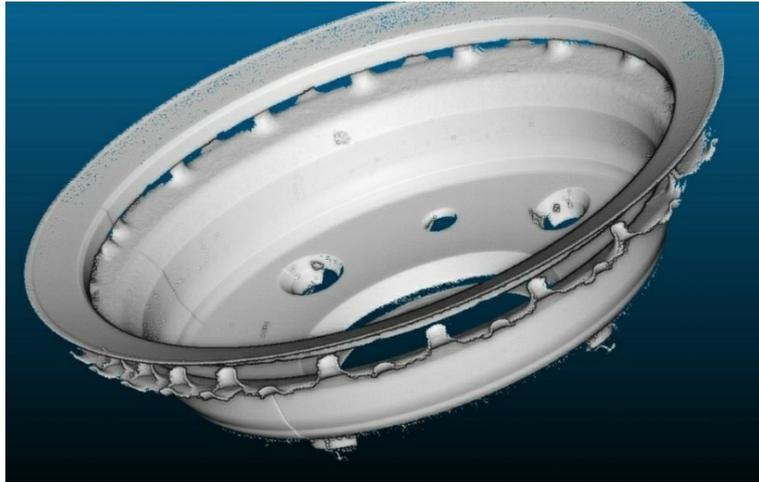
equipo disponía de un robot *Stäubli TX2-90* en el que se sujetaba el sensor para simular el posicionamiento. El giro se realiza a través de un cojinete de aire de la marca Eitzenberger modelo EZ-1309 que garantiza una concentricidad por debajo de las 0,2 micras. Sobre este, se situaba el disco para simular el giro del disco agarrado por la pinza (Figura 29). El encoder utilizado es el mismo modelo que se utilizó en la máquina final: IFM RVP510. Se trata de un codificador incremental TTL con una resolución de 5000 pulsos por vuelta (20000 en cuadratura).



*Figura 29 Equipo para ensayos preliminares.*

Con este procedimiento, se toman los primeros datos, que sirven para elegir el algoritmo de adquisición del sensor, las posiciones del sensor en cada medida y las velocidades a las que puede girar el disco en cada medida. Una vez seleccionadas las configuraciones, se toman datos de discos con defectos y se analizan los resultados con el objetivo de comenzar a desarrollar el algoritmo de detección de defectos.

Las primeras tomas de datos se realizan como muestra para el cliente. Se toman medidas del disco desde 4 posiciones diferentes y se reconstruye en coordenadas cartesianas con el objetivo de ver si el defecto destaca entre los datos (Figura 30).

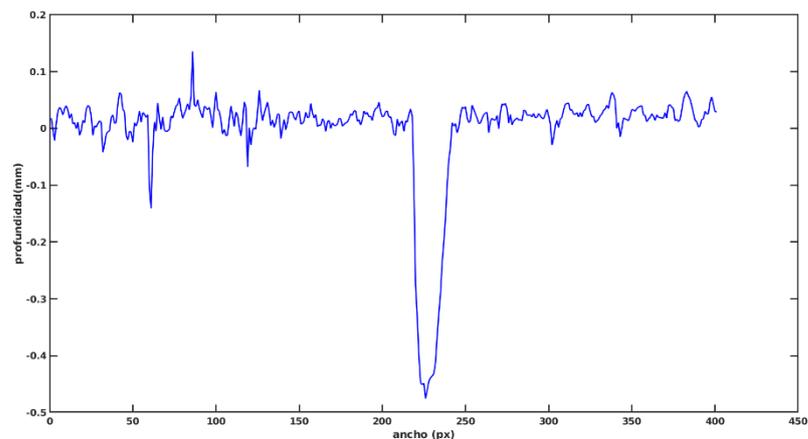


*Figura 30. reconstrucción del disco con defecto en la pared interior (bruto) en coordenadas cartesianas. Visualización en Cloud Compare.*

Se hacen pruebas con las configuraciones seleccionadas y se concluye que el tiempo de adquisición necesario por zona puede variar entre 2,5 y 5 segundos, lo que supone una velocidad de giro entre 25 y 12 rpm.

Se toman como muestra los datos cercanos a varios defectos y se comprueba cual es la profundidad del defecto con respecto a la rugosidad de la superficie (Figura 31).

Se estima la rugosidad del disco en torno a 0.03 mm en las superficies planas horizontales del disco. Este valor se utilizará en apartados posteriores en el desarrollo del algoritmo.



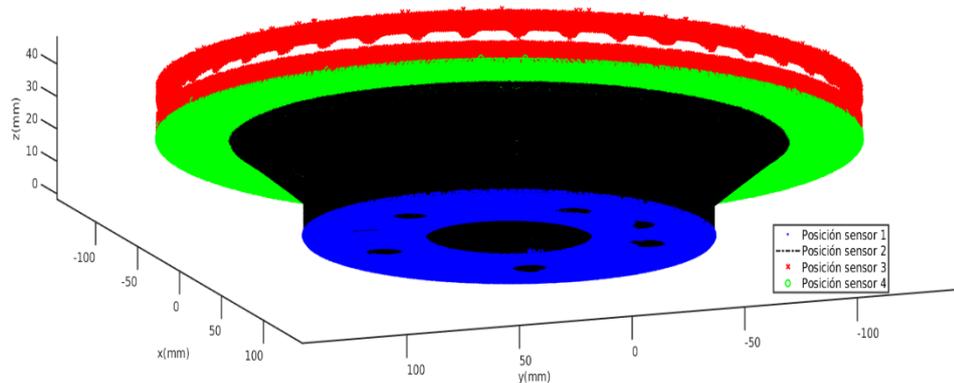
*Figura 31. Defecto de 0.48 mm sobre rugosidad de 0.03 mm*

## 5.3 División de zonas medidas para su inspección

Tras realizar diferentes pruebas, se concluye que el número de posiciones necesarias para medir cada cara del disco es de cuatro por cada estación. Desde la estación 1 se escanean:

- Posición 1: Pared externa del gorro.
- Posición 2: apoyo cara de amarre.
- Posición 3: diámetro externo.
- Posición 4: banda de frenado superior.

En la (Figura 32) se muestra el disco reconstruido en 3D con los datos tomados desde cada posición de la estación 1.



*Figura 32. Reconstrucción 3D de disco escaneado desde la estación 1. Cada color corresponde con la zona escaneada por un sensor.*

Y desde la estación 2 se escanea la parte interna del disco en otras cuatro posiciones:

- Posición 1: diámetro guía.
- Posición 2: banda de frenado inferior.
- Posición 3: pared interior del gorro.
- Posición 4: apoyo cara del buje.

En la (Figura 33) se muestra el disco reconstruido en 3D con los datos tomados desde cada posición de la estación 2.

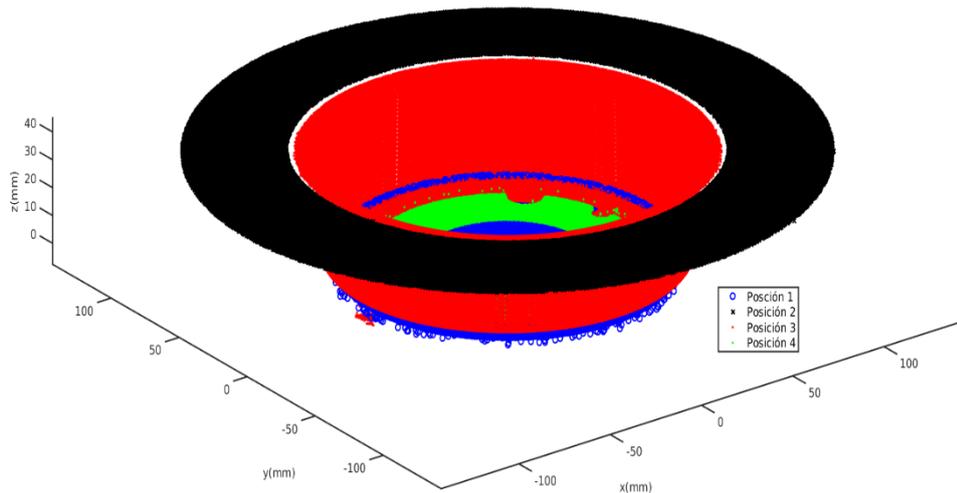


Figura 33. Reconstrucción 3D de disco escaneado desde la estación 2. Cada color corresponde con la zona escaneada por un sensor.

Los datos adquiridos en cada posición se dividen en medidas dependiendo del tipo de superficie. Por cada escaneo puede haber una o múltiples medidas que el programa de procesamiento trata por separado.

En la estación 1 se realizan las siguientes medidas:

- Diámetro externo (figura): El diámetro externo se divide en dos medidas que se tratan mediante el procesamiento de esquinas. Se analizan por separado la esquina superior que conecta con la pista y la esquina inferior que conecta con la ventilación del disco. Por otro lado, antes de tratar las esquinas por separado, es necesario eliminar el equilibrado de los datos para que no aparezca como un defecto. En la 715.7.2.1 se explica el algoritmo de detección del equilibrado.

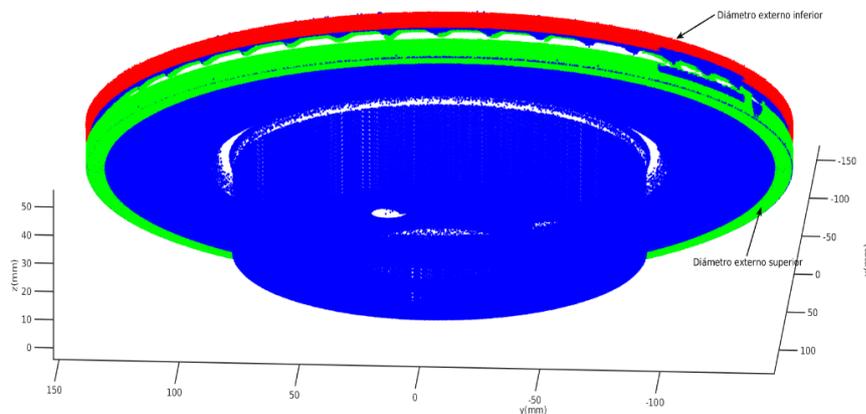


Figura 34. Representación de la zona diámetro externo (compuesta por dos medidas).

- Pista y canal: se diferencian tres zonas, la pista, el canal y la unión entre el canal y la pista. La pista se trata mediante el procesamiento para zonas planas mientras que el canal y la unión entre el canal y la pista se trata con el procesamiento de esquinas.

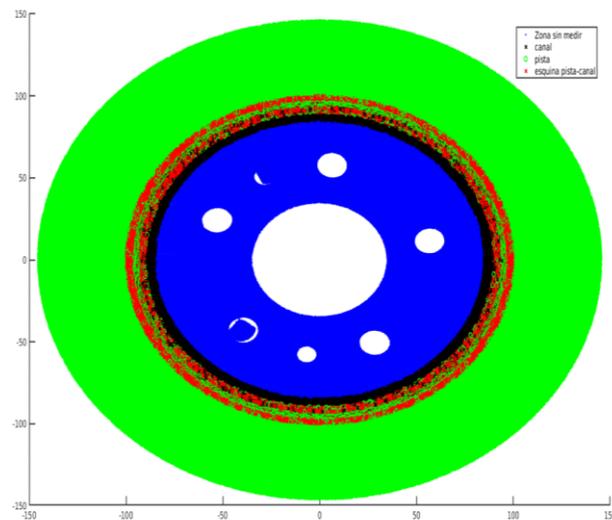


Figura 35. Representación de las medidas en pista superior.

- Apoyo y diámetro guía: se diferencian dos zonas, el diámetro guía, que se trata con el procesamiento de esquinas y el apoyo cara de amarre que se trata con el procesamiento de zonas planas.

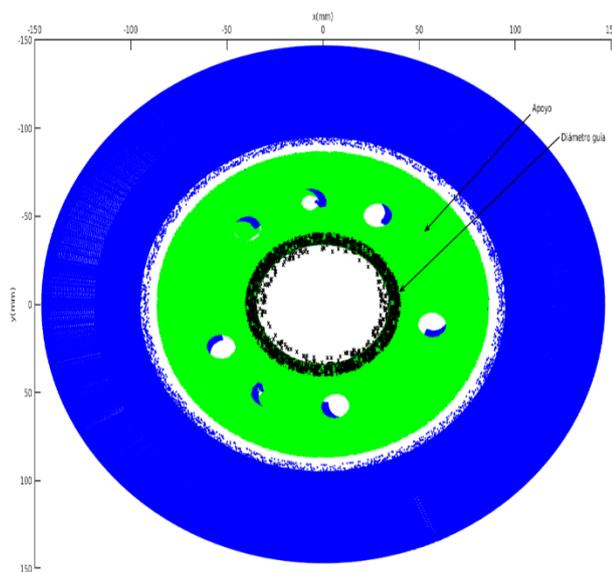


Figura 36. Medidas en apoyo cara de amarre.

- Pared del gorro. Se trata con el procesamiento de zonas planas.

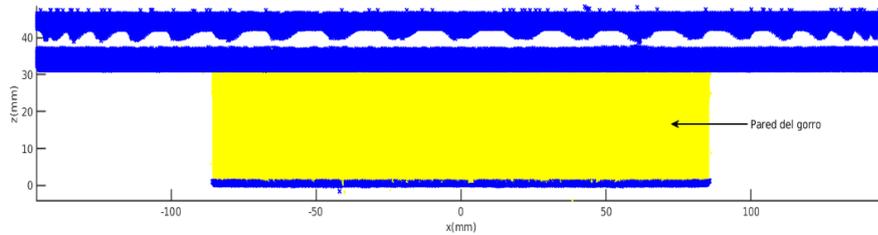


Figura 37. Medidas en pared del gorro.

Las medidas en la estación 2 son similares a las de la estación 1.

- Diámetro guía, que tiene su propio escaneo y se corresponde con la esquina interna del diámetro que no puede medirse desde la estación 1.
- Apoyo cara del buje. Se trata de la misma forma que el apoyo cara de amarre.
- Pared del gorro. En este caso, la pared interna se divide en tres medidas: esquina superior del gorro, esquina inferior del gorro, pared interior del gorro. Las tres se procesan con el algoritmo de esquinas, excepto en aquellas referencias en las que el disco incluye una franja sin mecanizar. Para las zonas en bruto se ha implementado un procesamiento específico.
- Pista inferior, que se procesa misma forma que la pista superior.

## 5.4 Análisis de datos y selección de algoritmos de detección

Cualquier irregularidad en la superficie del disco aparece en los datos como un conjunto de puntos que se alejan del valor medio de los puntos de la superficie. Atendiendo a esta particularidad, se buscan métodos de filtrado que permitan encontrar estos valores atípicos y catalogarlos como candidatos a defecto.

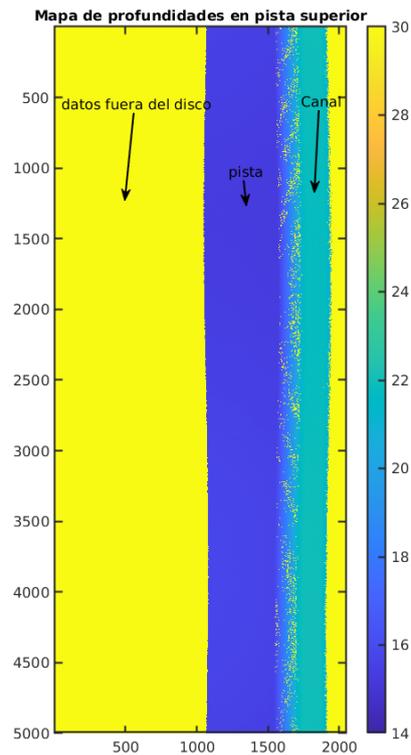
Una vez aislados los candidatos, se calcula su diámetro y su profundidad para comprobar si superan los límites de control establecidos por la empresa contratante y descartar aquellos provocados por factores externos, como brillos del sensor, agua o la suciedad del disco.

Como base para el resto de las zonas, primero se desarrolla un algoritmo pensando en zonas planas, horizontales y sin agujeros. Una vez conseguido un método eficaz de búsqueda de candidatos en estas zonas, se realizan los cambios oportunos para inspeccionar el resto de las zonas.

Antes de empezar a describir los métodos planteados, primero es necesario describir los datos con los que se pretende trabajar. La salida del sensor de triangulación son paquetes de datos con los que se pueden construir imágenes cuyo alto es el número de perfiles adquiridos por disparo del sensor y el ancho es el número de pixeles que representan todo el ancho de la línea láser (100 x 2048 en este caso). El conjunto de las imágenes adquiridas en una vuelta completa del disco conforma una matriz compuesta por la concatenación de las imágenes adquiridas en cada disparo del sensor. En este caso se adquieren 50 imágenes en cada vuelta, por lo que la matriz resultante es de 5000x2048. Cada fila de esta matriz contiene las distancias en bruto medidas por el sensor en micras y se corresponde con la distancia desde el centro de la cámara hasta el punto correspondiente de la línea láser.

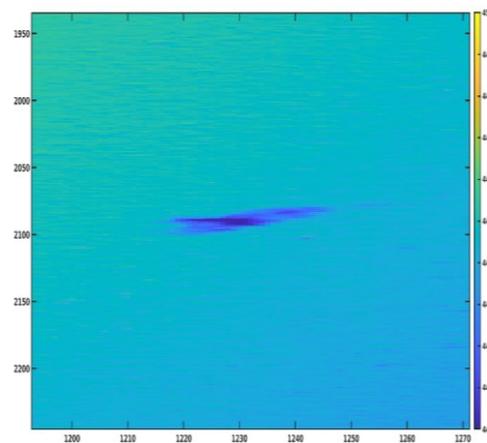
El propio sensor contiene un archivo de calibración que permite obtener los datos en x,y,z de forma automática. A partir de este archivo se genera una matriz de cuatro canales. Cada canal es un mapa con los valores en x,y,z y los valores brutos del sensor. Se extraen los valores en coordenadas cilíndricas debido a la comodidad que supone a la hora de filtrar los datos.

Puesto que las superficies planas y horizontales del disco solo sufren variaciones provocadas por los defectos en una dirección (por la geometría de la medición, en la dirección z), se toman solo los datos en esa dirección. Con ellos, se construye un mapa de profundidades cuyo ancho es la resolución del sensor y cuyo largo es el número de perfiles adquiridos. En la Figura 38 se muestra un ejemplo de mapa de profundidades (calibradas en z) en la pista. Se puede apreciar que el sensor capta una profundidad constante correspondiente a la pista y otra correspondiente al canal. También se pueden ver los datos que quedan fuera del disco, saturando a la máxima profundidad que el sensor mide en este caso específico.



*Figura 38. Ejemplo de mapa de profundidades calibradas en z. El ancho de la imagen corresponde con el tamaño del perfil en píxeles, mientras el alto corresponde al número de perfiles. La escala de colores marca la profundidad en mm de cada píxel.*

En la Figura 39 se muestra el detalle de un defecto en el mapa de profundidades y en la Figura 40 se muestra uno de los perfiles que atraviesan el defecto y el defecto real.



*Figura 39. Detalle de defecto en mapa de profundidades*

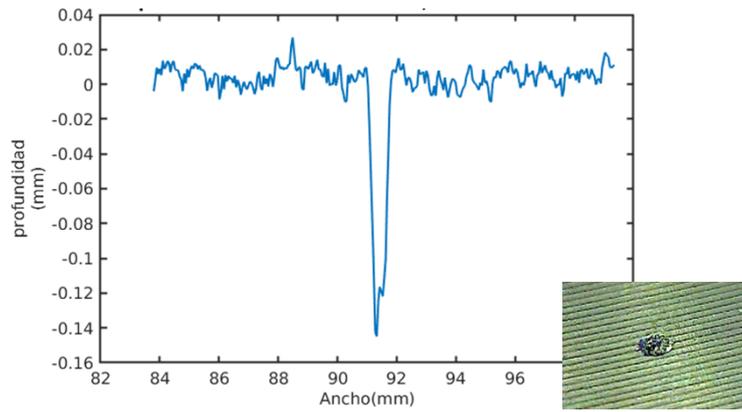


Figura 40. Uno de los perfiles en los que se muestra el defecto y detalle del defecto real

Se plantean dos métodos para buscar candidatos sobre la superficie:

- Ajustar los datos un savinsky-golay [11] de pequeño tamaño de ventana (que elimine los puntos perdidos, pero no los defectos) y luego aplicar el mismo filtro, pero con una ventana mayor, de tal forma que se filtren los defectos. Los candidatos serían los valores mayores de la diferencia entre las dos imágenes filtradas (Figura 41).

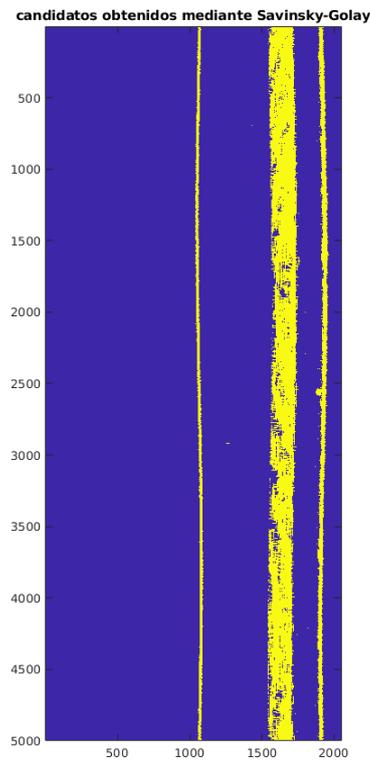
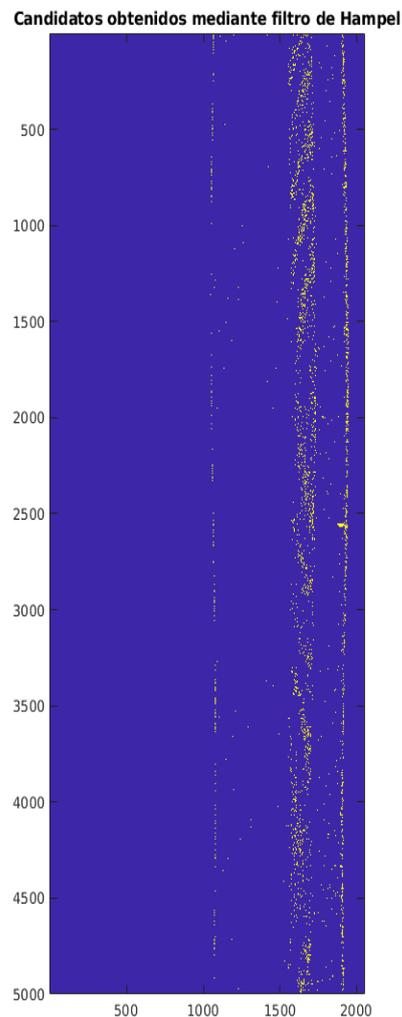


Figura 41. Candidatos obtenidos mediante Savinsky-Golay

- Buscar valores atípicicos con aplicando un filtro de Hampel [12] y restando los datos originales para buscar valores altos en la diferencia (Figura 42).



*Figura 42. Candidatos obtenidos mediante Hampel*

Aunque las dos opciones dan resultados parecidos, el filtro de Savinsky-Golay resultaba ser demasiado lento para el tiempo de cálculos requerido. Además, como se aprecia en las imágenes, se ve más afectado por el ruido y por los bordes del disco, así que se decidió utilizar el filtro de Hampel.

Una vez elegido el filtro más adecuado para la obtención de candidatos, se desarrollan los algoritmos de detección de defectos.

## 5.5 Algoritmo para zonas horizontales, planas sin agujeros

Dado que la más simple y con menos excepciones de las zonas sería la zona de las bandas de frenado, se desarrolla un primer prototipo de algoritmo funcional para estas zonas que después se utilizará como base para el resto de las zonas.

El primer paso es analizar cómo se refleja un defecto en los datos. En los experimentos con el robot sobre discos con defectos se puede observar que un poro no es más que un conjunto de puntos que se desvían de la media de los datos circundantes. Analizándolo en tres dimensiones, se ve como un agujero en el plano que forma la pista (Figura 43). Si se analiza en dos dimensiones, para cada perfil, un defecto es un conjunto de puntos cuyo valor se desvía de la media de los puntos del resto del perfil en un valor más elevado que la rugosidad del disco (Figura 31).

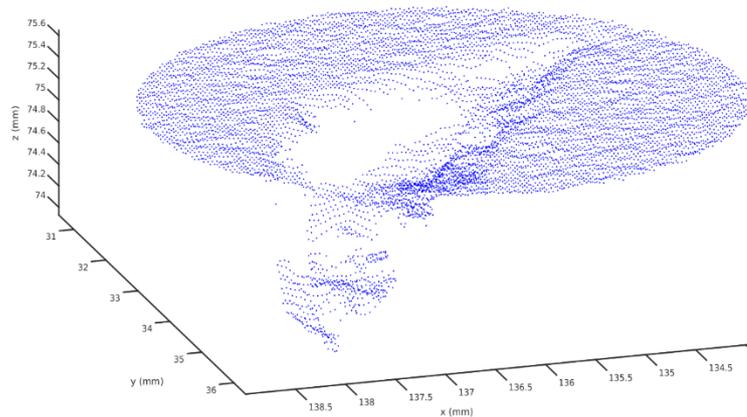


Figura 43. Ampliación de defecto en 3D sobre superficie plana.

Para simplificar el análisis, se reconstruyen los datos en coordenadas cilíndricas. Como se mencionó en apartados anteriores, el radio ( $r$ ) es la distancia desde la posición cero del sensor, hasta cada punto dentro de la línea láser (2048 puntos en cada línea). El ángulo ( $R_0$ ) está en radianes y va de  $0$  a  $2\pi$ , representa el giro del disco, y se calcula en relación con los pulsos de encoder. Por último, la profundidad ( $z$ ) es la distancia del punto de salida del láser hasta la línea proyectada sobre el objeto (Figura 44).

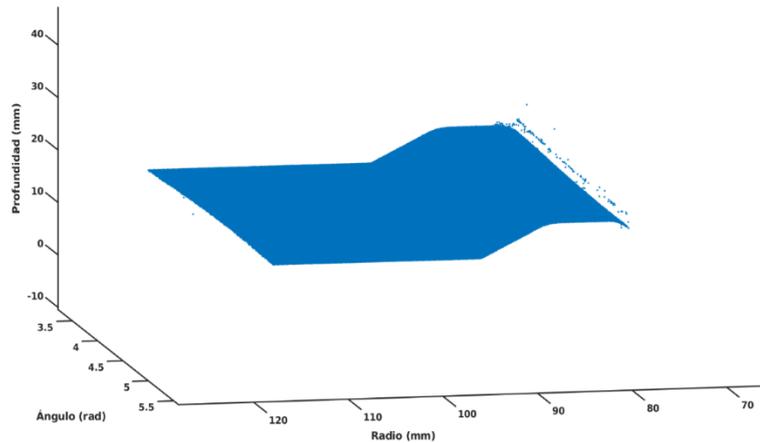


Figura 44. Representación de la pista superior en coordenadas cilíndricas.

Se plantea ajustar la superficie con un plano y calcular la distancia de los puntos al plano, para así considerar defecto todo aquello que diste del plano más de la profundidad permitida y tenga un diámetro mayor al diámetro permitido. Sin embargo, se observa que el disco presenta un alabeo de alrededor de 1 mm (Figura 45) que además varía con cada medición. Las garras de agarre de la pinza neumática se desgastan y el agarre de la pinza varía entre medidas, lo que provoca un problema de alabeo y excentricidad que resulta difícil de corregir mecánicamente. Dado que los defectos buscados son de entre 0.5 y 2 mm, el propio alabeo sería considerado un defecto al analizar la superficie.

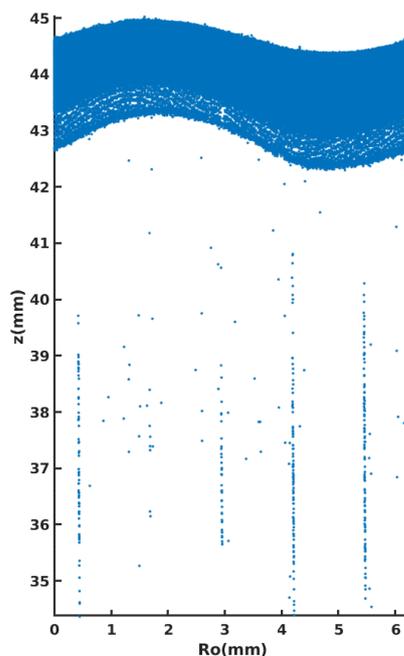


Figura 45. Imagen en el plano z-Ro. En la figura se aprecia el alabeo de aproximadamente 1mm que presenta el disco durante el giro.

Además, al ser las pistas superficies horizontales medidas con el sensor colocado perpendicularmente a las mismas, puede considerarse que la variación producida por un poro sobre la superficie afectaría tan solo al eje z (profundidad).

Para simplificar los cálculos, se construye un mapa de profundidades de tamaño 5000x2048, donde 5000 son los perfiles adquiridos en cada vuelta del disco, mientras que 2048 es la resolución de la línea láser proyectada sobre el sensor. Sobre este mapa se realizan las operaciones de búsqueda de candidatos a defecto. Para el cálculo de las dimensiones reales de los candidatos encontrados, se recuperan las tres dimensiones y se opera con ellas en coordenadas cartesianas. El cálculo de dimensiones se explicará más adelante.

Dado que el alabeo supone un cambio suave con respecto a la superficie, mientras que los defectos suponen un cambio brusco en la profundidad de la superficie, cualquier método de filtrado por ventana permitiría ajustar la superficie manteniendo el alabeo intacto. Basta con elegir una ventana lo suficientemente pequeña como para poder considerar que el alabeo no afecta a los vecinos dentro de la ventana, pero suficientemente grande como para que el defecto suponga un cambio brusco con respecto a los puntos que lo rodean dentro de ella.

Siendo la rugosidad de la superficie combinada con el ruido del sensor de unas 3.5 micras y siendo los defectos buscados más de 10 veces la rugosidad medida, puede considerarse a los defectos un dato anómalo con respecto a los datos circundantes. Si se filtrasen los datos, eliminando de ellos todos los puntos que superasen la media en un valor determinado, y después se restase esa imagen de la imagen original, los valores más altos de la imagen de diferencias serían los candidatos a defectos del mapa de profundidades.

Un filtro de media móvil o similar podría servir para filtrar los datos. Sin embargo, la media se ve afectada muy severamente por los valores anómalos en los datos. En un disco con muchos defectos o con defectos muy pronunciados, un filtro de media se vería afectado, y los candidatos menos prominentes serían descartados antes de ser medidos. Otro factor determinante a la hora de escoger el tipo de filtrado son los puntos perdidos por el sensor. En ocasiones, por causa de brillos u oclusiones, algunos de los puntos capturados por el sensor no son válidos. Estos puntos se muestran como ceros en los datos en bruto del sensor, y como el valor máximo de

profundidad dentro de rango en los datos calibrados. Aunque los filtros de media son más rápidos que los filtros de mediana, al verse afectados por puntos muy lejanos al valor normal del resto de puntos, se ven muy perjudicados por los puntos perdidos del sensor. Por ello, se elige utilizar un filtro de mediana.

Se utiliza el filtro de Hampel para buscar candidatos a defecto sobre el mapa de profundidades. El filtro se realiza en la dirección longitudinal del disco, ya que puntos en el mismo radio, es decir, la misma posición de la línea láser, tendrán valores más semejantes a sus vecinos cercanos con el mismo radio, que a sus vecinos cercanos con el mismo ángulo. Si bien es cierto que en superficies planas el cambio de aplicar el filtro longitudinalmente o en la dirección de la línea láser, no es muy significativo más adelante se verá que en otro tipo de superficies esta consideración cobra más importancia.

Se considera candidato todo aquel punto cuya distancia a su equivalente en la imagen filtrada sea el doble de la rugosidad estimada del disco. De esta forma se obtiene una imagen binaria de candidatos en la que se tendrán: por un lado, píxeles sueltos que corresponderán a ruidos y puntos perdidos. Por otro lado, puntos consecutivos que corresponderán con los verdaderos candidatos.

El filtro de Hampel [12] elimina valores atípicos de los datos. Esto son los valores sigma veces mayores que la desviación mediana absoluta o MAD (ecuación 1) y los sustituye por la mediana de los puntos circundantes.

$$(1) \text{MAD} = M_e(\overline{(X_i - M_e(X))})$$

La vecindad del punto la marca la ventana elegida. El valor sigma, marca cuántas veces el MAD tiene que desviarse el punto para ser considerado atípico (Figura 46).

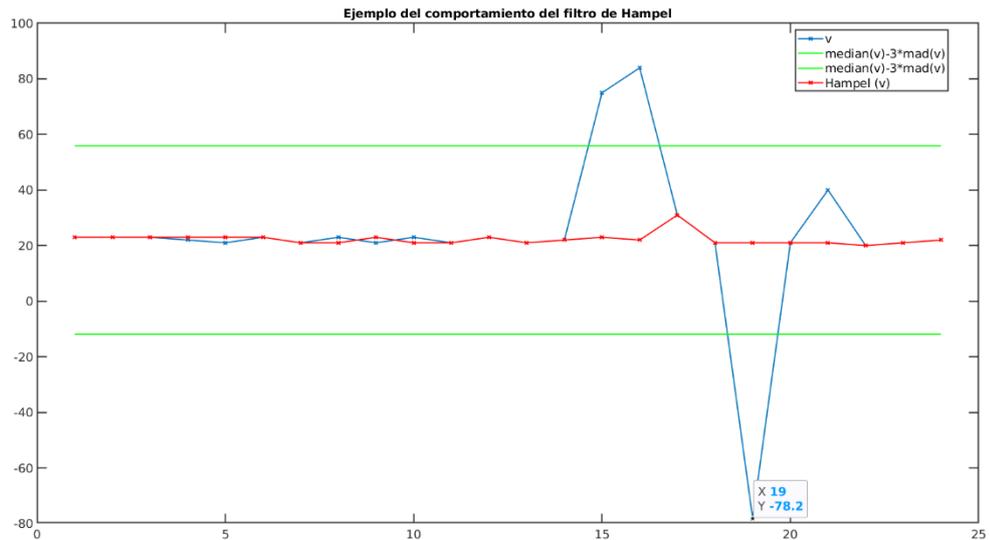


Figura 46. Explicación de funcionamiento de filtro de Hampel.

Calculando la diferencia entre los datos reales y los datos filtrados, se obtienen los puntos atípicos.

Aplicado al disco, el filtro de Hampel constituye una reconstrucción ideal de la superficie, sin defectos, brillos ni puntos perdidos, que se sustituyen por el valor mediano de la ventana.

En la Figura 47 y la Figura 48, se muestra un ejemplo del comportamiento del filtro de Hampel (utilizado restando los datos originales de los datos filtrados) ante un defecto de dimensiones cercanas al límite de control.

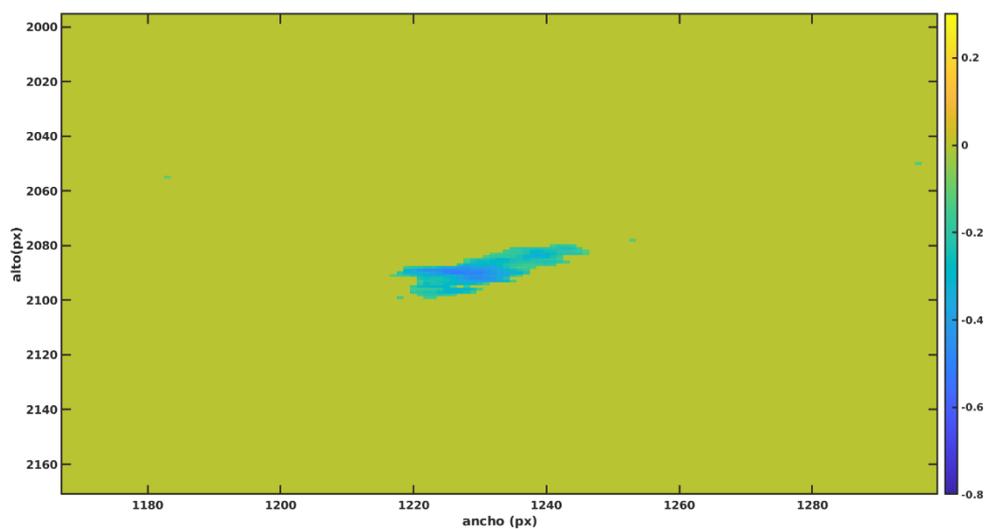


Figura 47. Detalle del mapa de diferencias de la imagen original y la imagen filtrada mediante un filtro de outliers de Hampel.

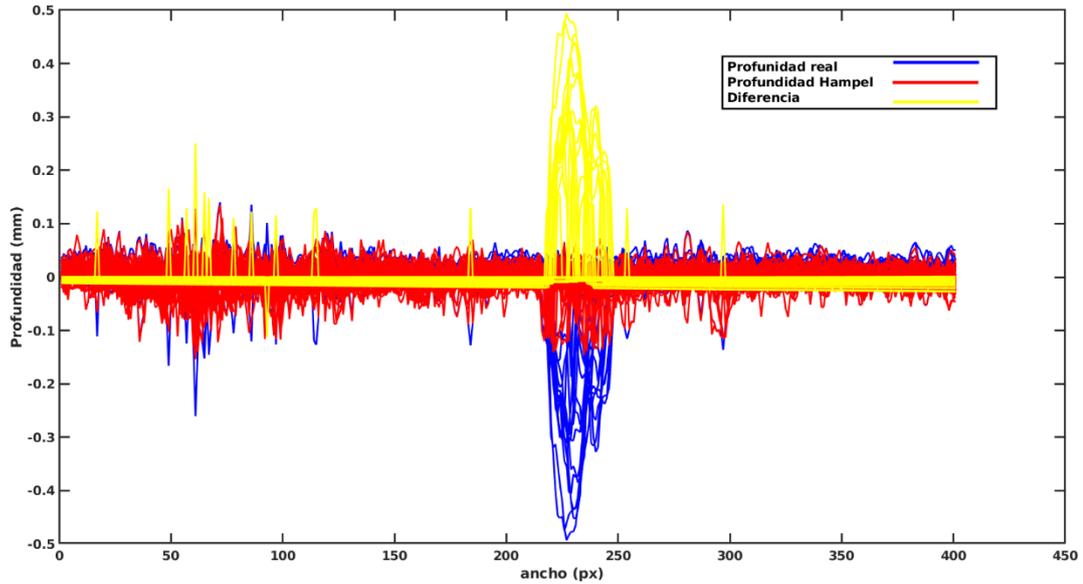


Figura 48. representación de 50 perfiles consecutivos pertenecientes al defecto. En azul los datos originales, en rojo el filtro de Hampel y en amarillo la diferencia entre ambos.

Se ha elegido heurísticamente, una ventana de 150 puntos, lo que corresponde con el 30% de la superficie del disco para cada ventana.

Se estudia realizar varias pasadas del filtro para distintos valores de la ventana, de tal forma que en cada pasada se busquen defectos de distintos tamaños. Sin embargo, la mejora no es significativa, y el tiempo de los cálculos aumenta. El filtro de Hampel es uno de los cuellos de botella a la hora de reducir el tiempo de cálculo, si se pasa el filtro varias veces, se supera el tiempo de ciclo de la línea.

Se observa que, para ventanas de menos puntos, el número de candidatos aumenta, lo que ralentiza el tiempo de los cálculos posteriores. Además, algunos de los defectos de mayor tamaño, ocupan una superficie significativa de la ventana con respecto a los datos, y esto provoca errores en su detección.

Para ventanas mayores, el alabeo del disco comienza a ser un factor relevante, y aparecen falsos positivos por un mal ajuste de la imagen filtrada a los datos (Figura 45).

Una vez filtrado el mapa de profundidades y restado las dos imágenes, se binariza la imagen de diferencias con un umbral que corresponde con el valor considerado candidato. Como se mencionó anteriormente, este valor es 0.07 mm. La

imagen resultante es una imagen binaria, en la que los candidatos valen 1 y el resto de la imagen vale 0 (Figura 49).

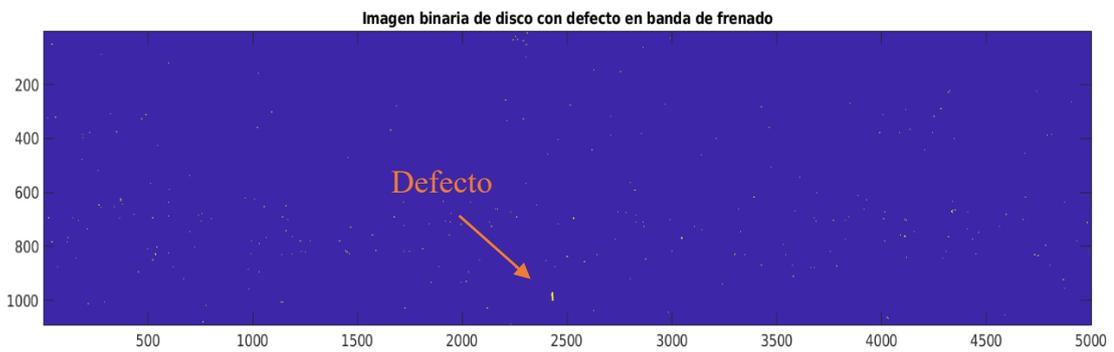


Figura 49. Candidatos a defectos obtenidos mediante filtro de outliers de Hampel

Para filtrar los puntos sueltos, se realiza una operación morfológica de apertura [13] que primero elimina los conjuntos de puntos menores que el tamaño del *kernel* elegido y después restaura el tamaño original de los objetos filtrados (Figura 50).

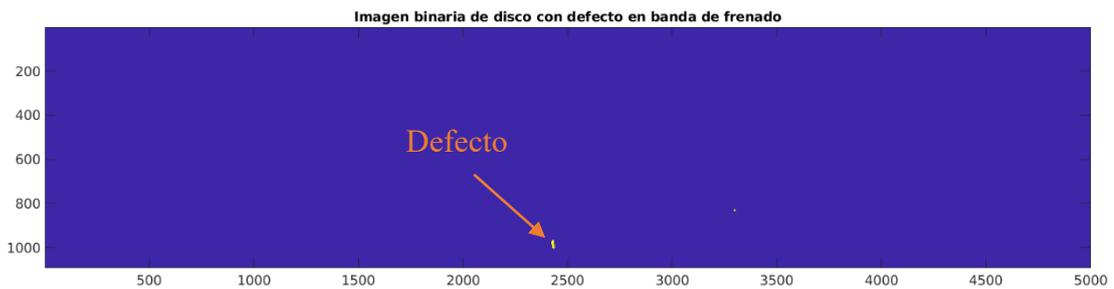


Figura 50. Candidatos a defectos tras aplicar apertura morfológica.

Dentro de los candidatos, también habrá puntos perdidos debido a brillos u oscuridades cuya área será suficientemente grande para eludir el filtrado. Para eliminarlos, se filtran todos aquellos puntos cuyo píxel equivalente en el mapa de valores en bruto del sensor sea cero. Los puntos de valor cero de la imagen de salida del sensor son puntos fuera del rango de medición.

Se buscan masas en la imagen binaria. Esto son, píxeles unidos entre sí de manera consecutiva. Se buscan masas que tengan un número suficiente de píxeles como para ser un defecto.

La imagen resultante contiene las masas mayores que el número de píxeles dado etiquetadas con un número entero cada una.

Además, se guarda una lista con las masas encontradas que contiene su área, su valor mínimo y máximo en 'x' e 'y' su valor de profundidad máximo.

Para calcular el diámetro de cada candidato, se convierten los puntos extremo de la masa a coordenadas cartesianas. Se calcula la mayor distancia en 'x' y la mayor distancia en 'y' y se toma como diámetro el máximo entre ambas (Figura 51)

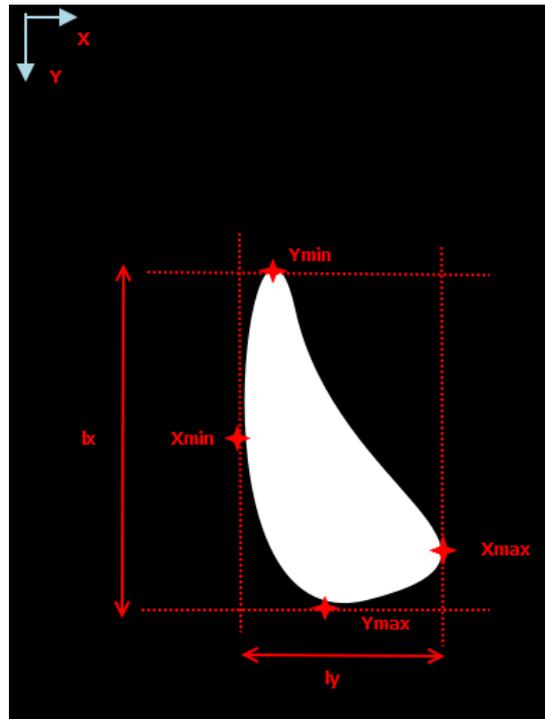


Figura 51. Caracterización del defecto para cálculo del diámetro.

Para buscar la profundidad, se recorren todos los perfiles entre Ymin e Ymax y para cada uno, se analizan todos los puntos válidos entre Xmin y Xmax. La profundidad del defecto se considera como la mayor distancia entre los puntos sin filtrar y los puntos filtrados dentro de la masa.

## 5.6 Algoritmo para zonas horizontales, planas con agujeros

Una vez desarrollado el algoritmo para superficies planas, horizontales y sin agujeros, se amplía para superficies que contienen agujeros de sujeción. En el caso de los discos inspeccionados, esta zona es la zona de amarre, y tiene un total de siete agujeros mecanizados con avellanado (Figura 52).



*Figura 52. Los discos tienen siete agujeros de sujeción avellanados.*

Con respecto a los agujeros se plantean dos problemas. El primero, es retirarlos de los candidatos para que no afecten al algoritmo de detección de defectos. Además, la empresa contratante especifica en el cuaderno de cargas que el número de agujeros puede ser incorrecto, bien por un mecanizado incompleto o por un mecanizado sobrante. El segundo problema planteado es contar los agujeros e indicar si el mecanizado está bien.

El primer paso para solucionar ambos, es identificar los agujeros. Atendiendo la premisa de que un agujero, no es más que un defecto de gran tamaño y forma regular, se decide aplicar el mismo filtrado que para la detección de poros, pero con una ventana mayor. Si bien es cierto que la geometría regular de los agujeros permitiría que se buscasen con algoritmo de búsqueda de círculos (por ejemplo, el algoritmo de Hough [14]), los brillos en el chaflán del avellanado y la irregularidad de los puntos captados por el láser en la oquedad (Figura 53), dificultan su uso.

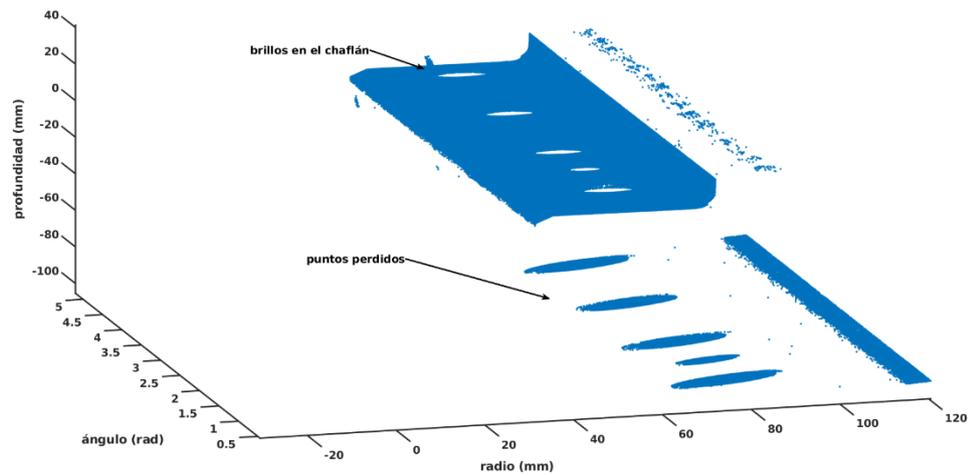


Figura 53. Vista 3D en coordenadas cilíndricas de la zona de apoyo del disco. Se aprecian los puntos perdidos en los taladros y los brillos provocados por el chaflán.

Dado que el único propósito es contar los agujeros y retirarlos de los datos para analizarlos aparte, la simplicidad del filtro de Hampel resulta ventajosa frente a soluciones más precisas, pero también más complejas.

Se observa que dos de los agujeros presentan el avellanado por la cara de amarre (cara superior) mientras que los otros cinco lo presentan en la cara del buje (cara inferior). Por lo tanto, se encuentran dos tipos de agujeros por cada cara: los avellanados (que tendrán un diámetro mayor) y los no avellanados.

El diámetro de los agujeros avellanados con respecto a la superficie del disco es del 7% (ocupan unos 300 píxeles de 5000 de la imagen). Se escoge una ventana de 600, suficientemente grande como para que un agujero sea un valor anómalo con respecto al resto de los datos, pero suficientemente pequeña como para que los agujeros no afecten a la mediana de la ventana (Figura 54).

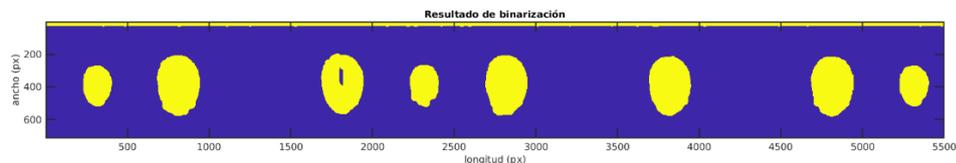


Figura 54. Imagen binaria de los agujeros filtrada

Se obtiene la imagen binaria de la imagen diferencia entre la imagen original de profundidades y la imagen filtrada por el Hampel. En este caso no se filtran los

puntos perdidos, ya que son una característica intrínseca de los agujeros, al no llegar el láser al fondo de la oquedad.

Se realiza una apertura a la imagen binaria resultante para eliminar los puntos sueltos y se recortan los bordes, que carecen de interés para la búsqueda de los taladros, que se encuentran en el centro del disco (Figura 55).

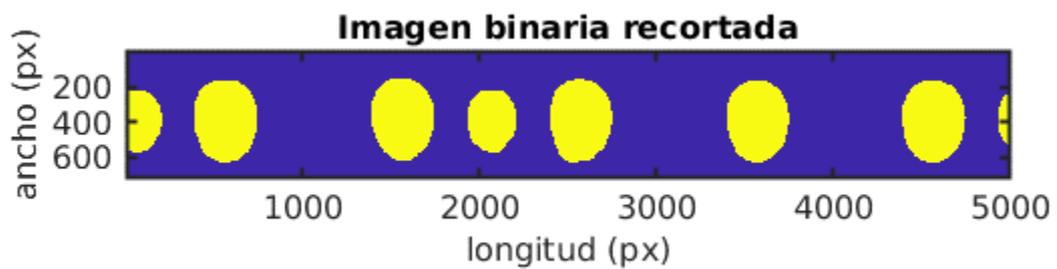


Figura 55. Imagen binaria de los agujeros tras aplicar una apertura

Y por último se dilatan los agujeros para dar margen a que toda su superficie sea eliminada de los datos (Figura 56).

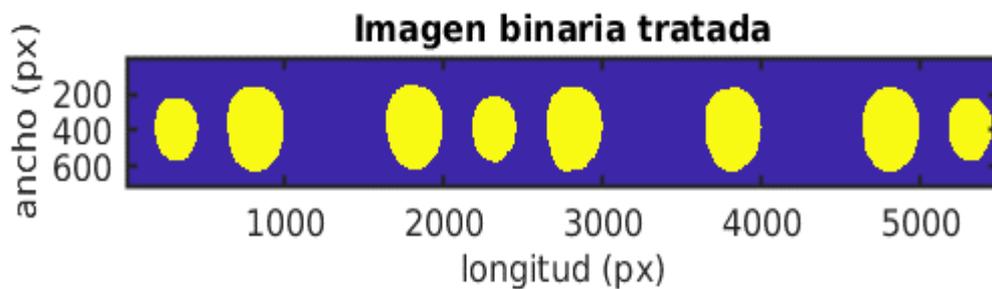


Figura 56. Imagen binaria de los agujeros tras aplicar una apertura y una dilatación

Se comparan la imagen de los agujeros y la de los candidatos y se eliminan aquellos puntos que estén en la imagen de candidatos y además estén en la de agujeros (Figura 57).

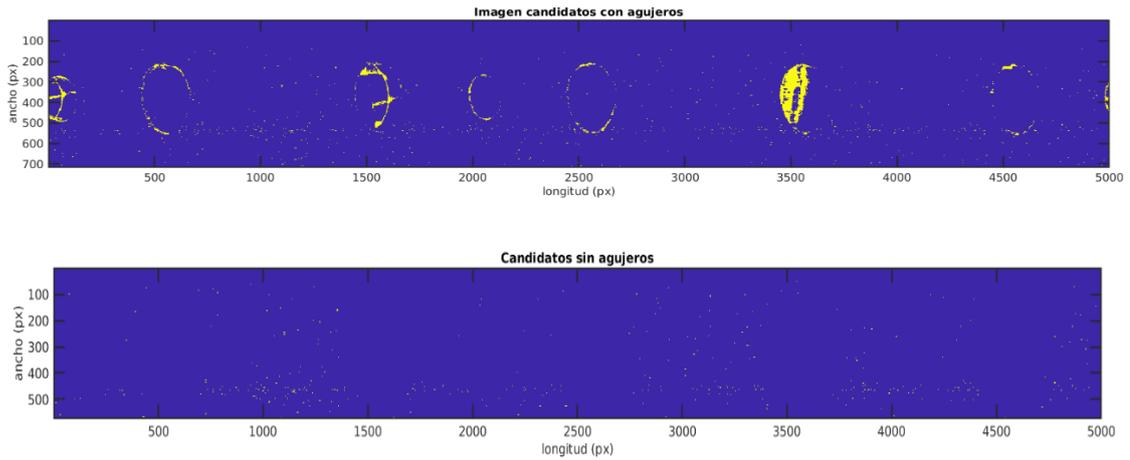


Figura 57. Candidatos antes y después de la eliminación de agujeros

Para contar los agujeros, se etiquetan las masas de la imagen binaria filtrada de los agujeros (Figura 58).

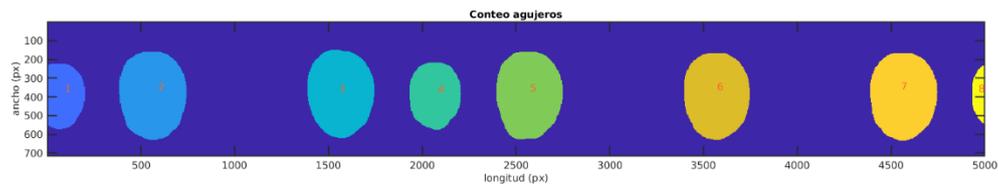


Figura 58. Etiquetado de agujeros

Sin embargo, esto entraña varios problemas:

El primero, es que uno de los agujeros puede estar presente al principio y al final de la imagen, con lo que se encontrarían dos masas en lugar de una, y se contaría un agujero de más.

Para evitar esto, se comprobaría la existencia de una masa al principio y al final de la imagen, y se restaría un agujero del total.

No obstante, este no es el único problema que entraña que un agujero quede partido por la imagen. Si gran parte del agujero se ven en un lado de la imagen y la otra parte del agujero es muy pequeña, puede ocurrir que la parte más pequeña se elimine en el filtrado y por tanto no elimine de los candidatos y produzca un falso positivo.

Para evitar esta circunstancia, se recurre al preposicionado de los datos finales de la imagen al principio de esta y viceversa. Se elige el número de puntos que añadir

a la matriz teniendo en cuenta el espacio entre los agujeros. De esta forma, se filtra sobre la imagen ampliada, y después se regresa a la imagen original para la eliminación de los agujeros de los candidatos (Figura 59).

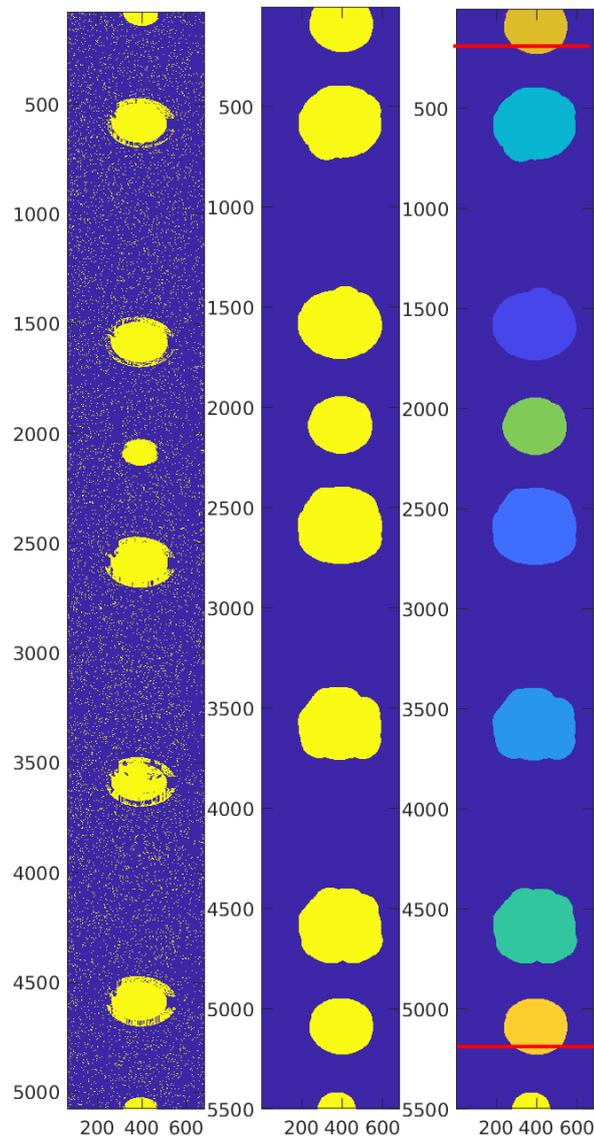


Figura 59. Búsqueda de agujeros con pre-posicionado y post-posicionado de los datos

Para el conteo, se sigue teniendo en cuenta que un agujero esté en la primera fila de la imagen y la última, pero ahora se tiene siempre la información completa.

## 5.7 Algoritmo de esquinas

### 5.7.1 Esquinas simples

La característica que simplifica la detección en superficies planas horizontales respecto a otras superficies es el hecho de que las variaciones apreciables ante la

aparición de un defecto se producen solo en una dimensión (en el eje Z). Por el contrario, si el poro o golpe aparece en la unión entre dos superficies, la variación que produce se percibe en dos dimensiones (en X y en Z). Por lo tanto, el mapa de profundidades de una dimensión utilizado en la detección para superficies planas arroja información incompleta sobre los posibles candidatos encontrados.

Para construir un mapa de profundidades sobre el que trabajar y que además contenga la mayor cantidad de información posible para el primer filtrado, se plantea proyectar la esquina en dos dimensiones sobre un plano a 45 grados (Figura 60).

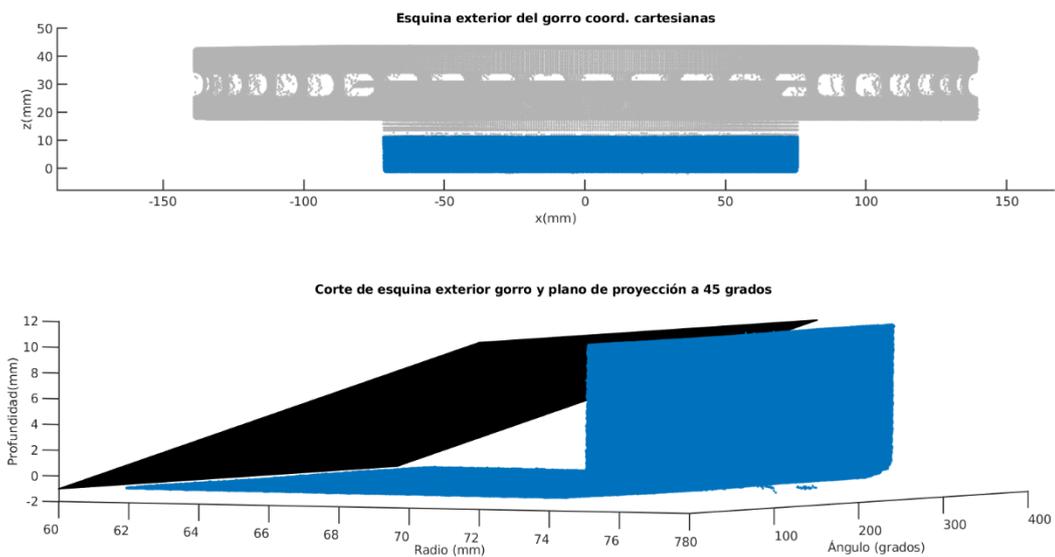


Figura 60. Ejemplo de esquina simple: Exterior del gorro en disco ventilado. Arriba representación de la zona medida en coordenadas cartesianas (azul). Abajo plano proyección de la esquina a 45° y corte de la esquina en coordenadas cilíndricas.

El mapa de distancias, consistirá en una matriz que contenga la distancia euclídea de cada punto (en las dimensiones x,z) al plano de proyección. De esta forma, se consigue una matriz en una dimensión sobre la que trabajar. Esta matriz, al igual que la utilizada para superficies planas, es una imagen de 5000x2048, que contiene las profundidades calculadas. Sin embargo, la matriz anterior solo contenía la profundidad en z, o en caso de superficies verticales, la profundidad en x, pero no daba ninguna información de las otras dimensiones. En este caso, al calcular la distancia euclídea de cada punto (x,z), las profundidades (Figura 62). contienen información de las dos dimensiones. Un punto con una fuerte componente en profundidad en x tendrá en mismo valor que un punto con una fuerte componente en

profundidad en z. La distancia al plano será cero en los puntos de corte, e ira subiendo hasta hacerse máxima en la esquina.

La presencia de un defecto sobre la esquina provoca una distancia anómala al plano con respecto a los puntos circundantes (Figura 61). Por tanto, el algoritmo planteado para superficies planas sigue siendo válido para encontrar candidatos a defectos.

Por otro lado, el cálculo de diámetro y profundidad real es ligeramente distinto en este caso.

Se aplica un Hampel sobre la proyección en el plano, y se resta de la imagen original. Al igual que en el caso anterior, se buscan aquellos puntos que son mayores que el doble de la rugosidad (0.07 mm) y se binariza la imagen en base a ellos.

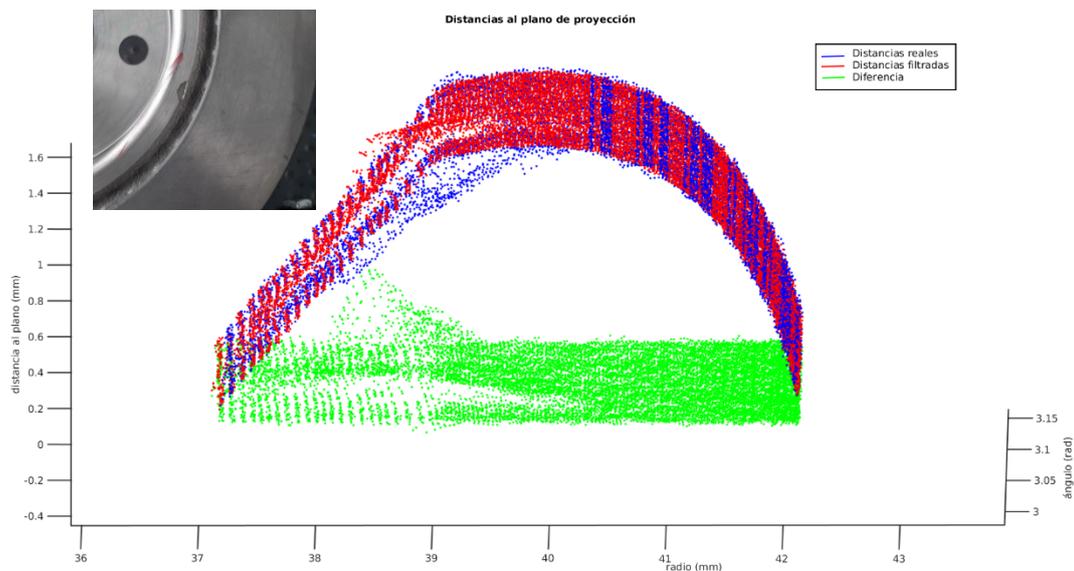


Figura 61. Efecto de un poro en la matriz de distancias e imagen del defecto en el disco.

En la Figura 62 se muestra un ejemplo de mapa de profundidades del disco y la binarización en base a él. La imagen corresponde a un disco con un pequeño poro y que contiene un grabado hecho por punzonado.

Sobre la imagen resultante se aplica una apertura morfológica para eliminar píxeles sueltos y defectos muy pequeños (Figura 63).

Tras observar que muchos de los defectos pueden quedar partidos al filtrar, se aplica un cierre morfológico que conserve el tamaño original de las masas, pero que una aquellos que son suficientemente cercanos como para que se consideren defectos. La apertura previa elimina píxeles sueltos, lo que impide que en la operación posterior se unan masas de pequeño tamaño (ruido) y estas conformen una masa única de diámetro irreal que provoque la detección de un falso positivo.

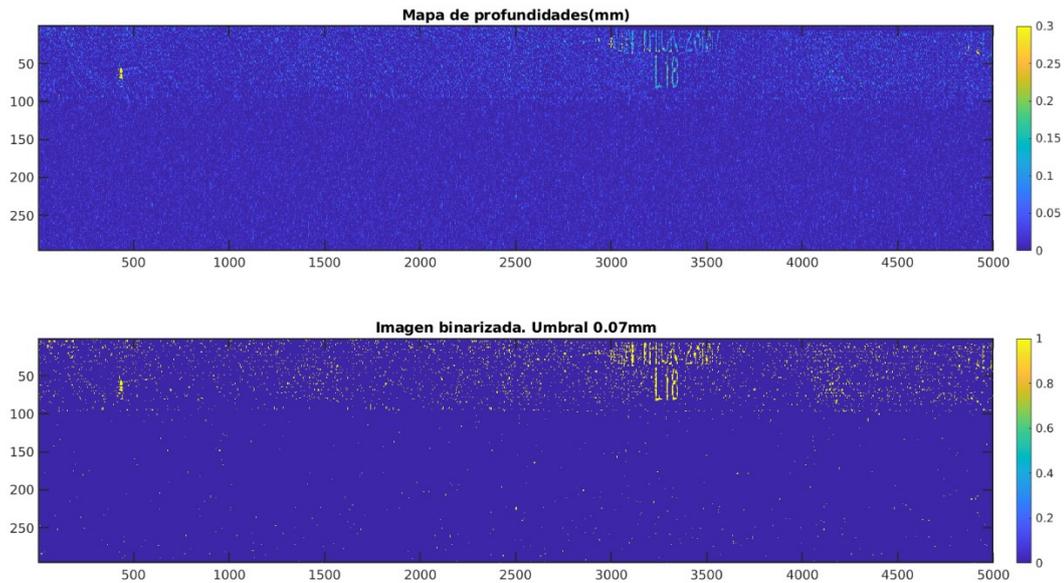


Figura 62. Arriba: Mapa de profundidades del exterior del gorro. Se aprecia el grabado del disco (arriba a la derecha) y una pequeña marca que no cumple las restricciones dimensionales para ser un poro (arriba izquierda). Abajo: Binarización con umbral de profundidad de 0.07mm.

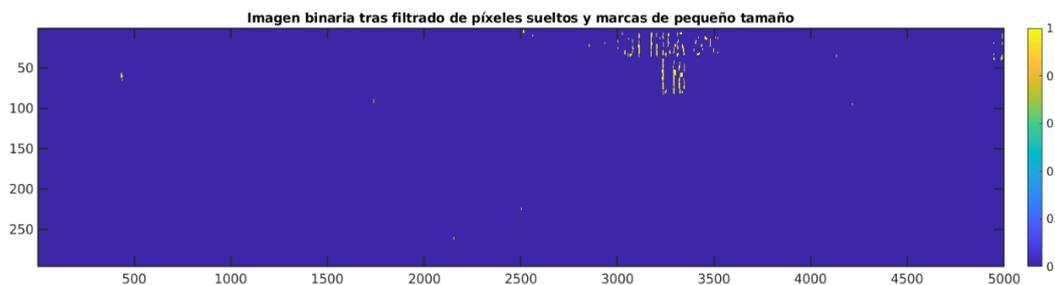


Figura 63. Imagen binaria tras aplicar una apertura morfológica para eliminar píxeles sueltos y marcas de pequeño diámetro.

Para tener una masa lo más parecida a la realidad posible, se eliminan las operaciones morfológicas de la imagen binaria. Para ello, se utiliza la imagen binaria tratada con operaciones morfológicas, como máscara en la imagen binaria sin tratar.

De esta forma, se elimina el ruido y los defectos pequeños como en la imagen filtrada, pero se mantienen los diámetros de la imagen original.

Sobre esta imagen, se elabora una lista de masas candidatas, y se miden los diámetros y profundidades de cada una para clasificarlas.

El cálculo del diámetro es ligeramente diferente al cálculo realizado en el algoritmo anterior, dado que en este se deben tener en cuenta dos dimensiones.

Al igual que en el algoritmo general, se toman los puntos extremos de las masas y se pasan a coordenadas cartesianas. Pero ahora las dos longitudes no se calculan en  $x$ ,  $y$ , si no en  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Por lo tanto, se calcula:

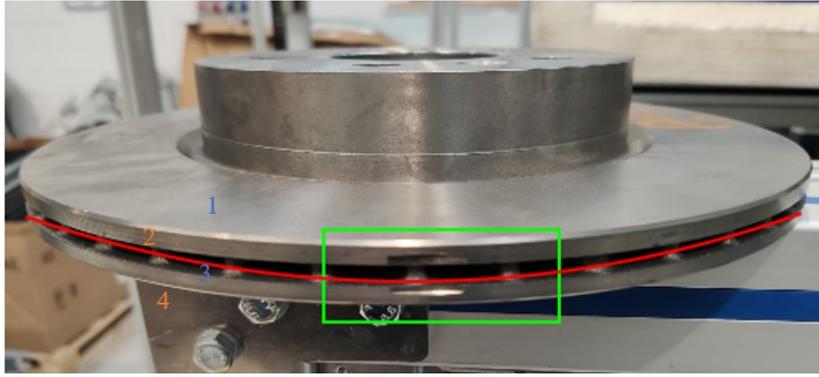
- Distancia euclídea entre el máximo  $X$  y el mínimo  $X$  (de la imagen) en  $(x,z)$ .
- Distancia euclídea entre el máximo  $Y$  y el mínimo  $Y$  (de la imagen) en  $(x,z)$
- Distancia entre el máximo  $X$  y el mínimo  $X$  (de la imagen) en  $(x,y)$ .
- Distancia entre el máximo  $Y$  y el mínimo  $Y$  (de la imagen) en  $(x,y)$ .

Se considera el diámetro como el máximo de todos esos valores.

Por su lado, la profundidad se calcula como la diferencia de las distancias al plano de proyección entre los puntos sin filtrar y los puntos filtrados de las masas. Como en los casos anteriores, la profundidad del candidato se considera la profundidad máxima de todos los puntos de la masa.

### **5.7.2 Esquinas cercanas a zona de ventilación**

El algoritmo de detección de defectos en esquinas es válido para esquinas situadas entre dos zonas lisas. Pero no es válido para las esquinas del exterior del disco donde se encuentra el equilibrado (zona mecanizada a posteriori de la fabricación para equilibrar el peso del disco, marcada en verde en la Figura 64) y la franja de ventilación (marcada en rojo en la Figura 64).



*Figura 64. Imagen esquina exterior del disco. En verde se marca el equilibrado y en rojo la banda de ventilación. Los números marcan que esquinas se miden desde cada estación. Las esquinas azules (1,3) se miden desde la estación 1, mientras que las esquinas naranjas (2 y 4) desde la estación 2.*

El primer paso para poder aplicar el algoritmo es eliminar el equilibrado igual que se hizo con los agujeros en la cara de apoyo. La búsqueda del equilibrado se explica en la sección 5.7.2.1

Una vez encontrado el equilibrado, se elimina de los candidatos como se hizo anteriormente con los agujeros.

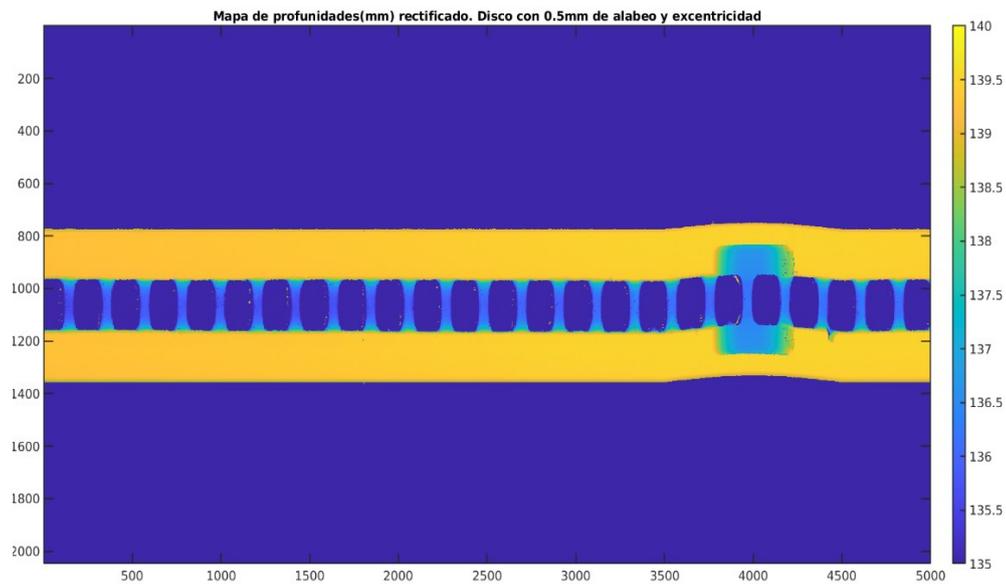
Para las esquinas más exteriores, eliminar el equilibrado basta para utilizar el algoritmo de esquinas sin ninguna otra modificación.

Sin embargo, en las esquinas interiores de la ventana se da la circunstancia de que la superficie que conecta la esquina con el interior de la ventana es muy reducida, y que dentro de la ventana se encuentran los pivotes de unión entre las dos caras del disco.

El espacio reducido entre la esquina y los pivotes sumado a la excentricidad del giro del disco, hacen que, en algunas ocasiones, se cuelen pivotes en la imagen proyectada. Estos pivotes empeoran el funcionamiento del filtro de Hampel, y aparecen como falsos positivos. Para evitar la aparición de pivotes en la imagen proyectada, se rectifica la imagen para corregir la excentricidad del disco antes de recortar la zona que se desea inspeccionar.

Para rectificar la imagen, se busca una arista vista. Las aristas vistas son las dos esquinas que se quieren inspeccionan desde cada cara. Desde la estación 1 se inspeccionan las esquinas 1 y 3 mientras que desde la estación 2 se inspeccionan la 2 y la 4. La búsqueda de esquinas se explicará en el apartado 5.7.2.2.

En este caso, se utiliza la esquina 2 como referencia, tanto para rectificar la imagen como para buscar el equilibrado.



*Figura 65. Mapa de profundidades de disco rectificado*

Como se observa en la figura, el rectificado, los posibles defectos, y el ruido afectan a la detección de la esquina. Para evitar esos puntos, se igualan los puntos pertenecientes al equilibrado a la mediana de los datos y se suaviza la arista obtenida con un filtro de Savinsky-Golay [11] de tercer orden. El filtro reconstruye la arista, ajustando los puntos a una función de tercer orden según la ventana seleccionada. Se selecciona una ventana de gran tamaño para que los puntos sueltos sean filtrados.

En la Figura 66 se muestra la imagen rectificada tras ignorar el equilibrado y suavizar la arista.

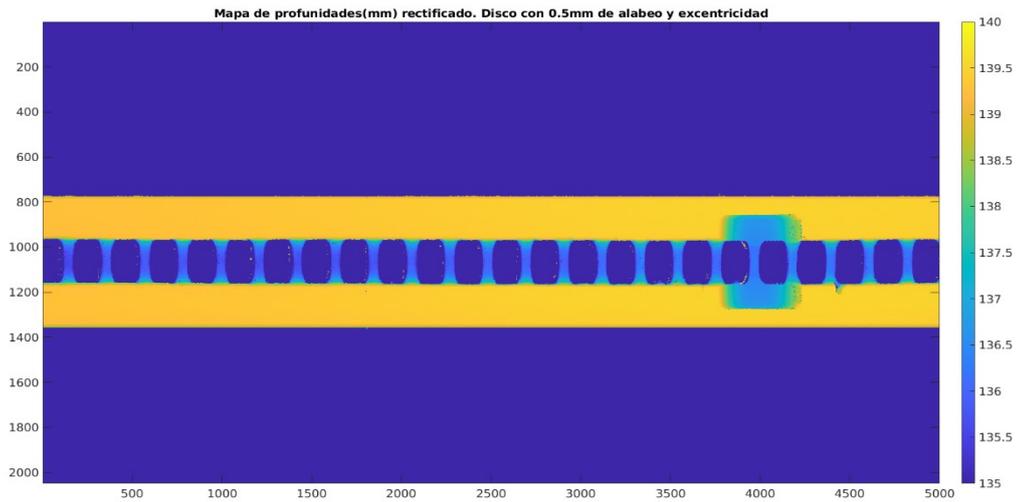


Figura 66. Imagen rectificada tras ignorar el equilibrado y suavizar la arista

Una vez rectificada la imagen, se descartan los puntos que estén lejos del radio y la profundidad límites de la esquina analizada y se aplica el mismo algoritmo de detección que en el resto de las esquinas.

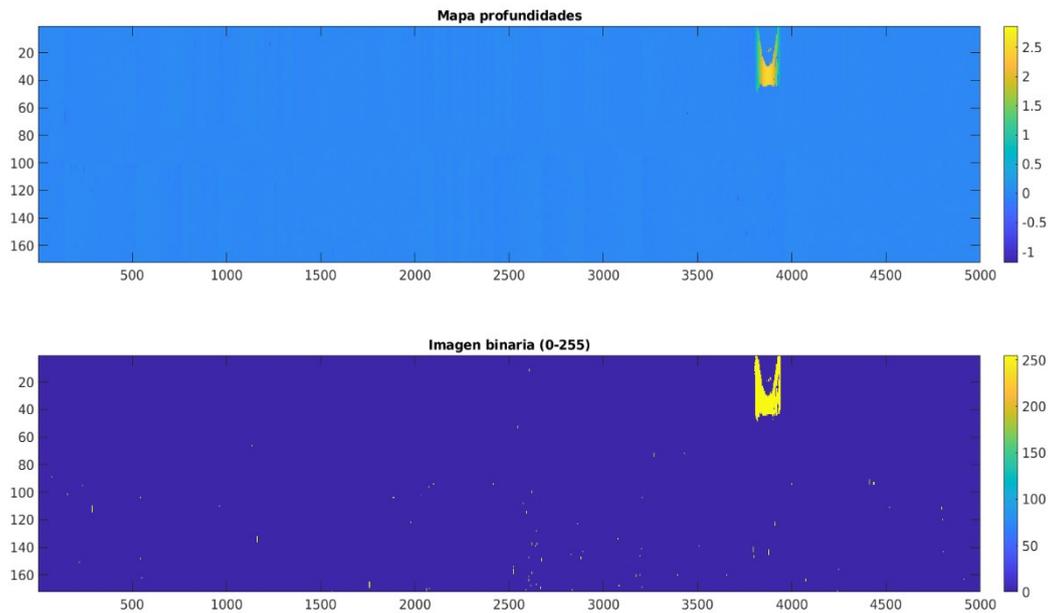
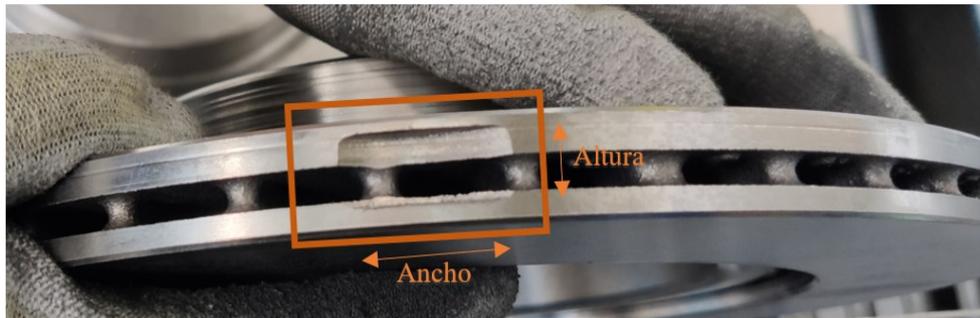


Figura 67. Hampel sobre la proyección del disco en el plano e imagen binarizada de candidatos en la que se distingue el equilibrado.

### 5.7.2.1 Búsqueda del equilibrado

Previamente a la inspección, los discos de freno de la línea pasan por una máquina equilibradora que mide las vibraciones de disco y realiza una franja de 2.5

mm de profundidad y un tamaño tal que haga que el peso del disco se equilibre y no se produzcan esas vibraciones (Figura 68).



*Figura 68. Ejemplo de equilibrado en disco de freno.*

Por profundidad y diámetro, este equilibrado es detectado como un defecto, por lo que, para medir el diámetro externo, primero será necesario buscarlo en los datos, y en caso de que aparezca (no todos los discos tienen equilibrado), retirarlo de los candidatos.

Para ello, primero se analizan las características propias del equilibrado:

- 2.5 mm de profundidad.
- Rectangular de alto fijo (10mm) y ancho variable (máximo 70°, 19.9% del perímetro del disco).
- Presente en las dos paredes del diámetro externo.
- Centrado en el diámetro externo.

Y se basa la detección en la búsqueda de estas características. Se utilizan como eje central de la detección la profundidad del rebaje, su presencia en las dos paredes y su localización en el disco.

Primero se toma como referencia una de las aristas sobre las que se posiciona el equilibrado (Figura 69). Se elige la arista interior inferior del diámetro externo, por ser la más favorable a la posición del sensor.

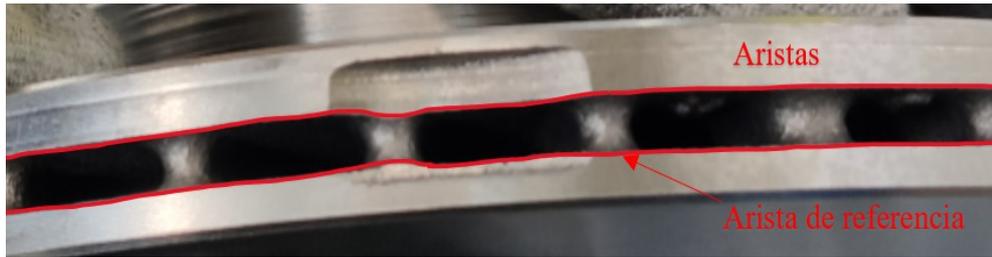


Figura 69. Se toma como referencia la arista interior inferior del diámetro externo, por ser la más favorable a la posición del sensor.

Se busca la arista de referencia mediante el algoritmo de búsqueda de aristas que se verá en la sección 5.7.2.2. En la Figura 70. Búsqueda de arista de referencia (en rojo). Imagen de gradientes. En la Figura 70 se muestra la imagen de gradientes (ver sección 5.7.2.2.) y la arista de referencia (en rojo).

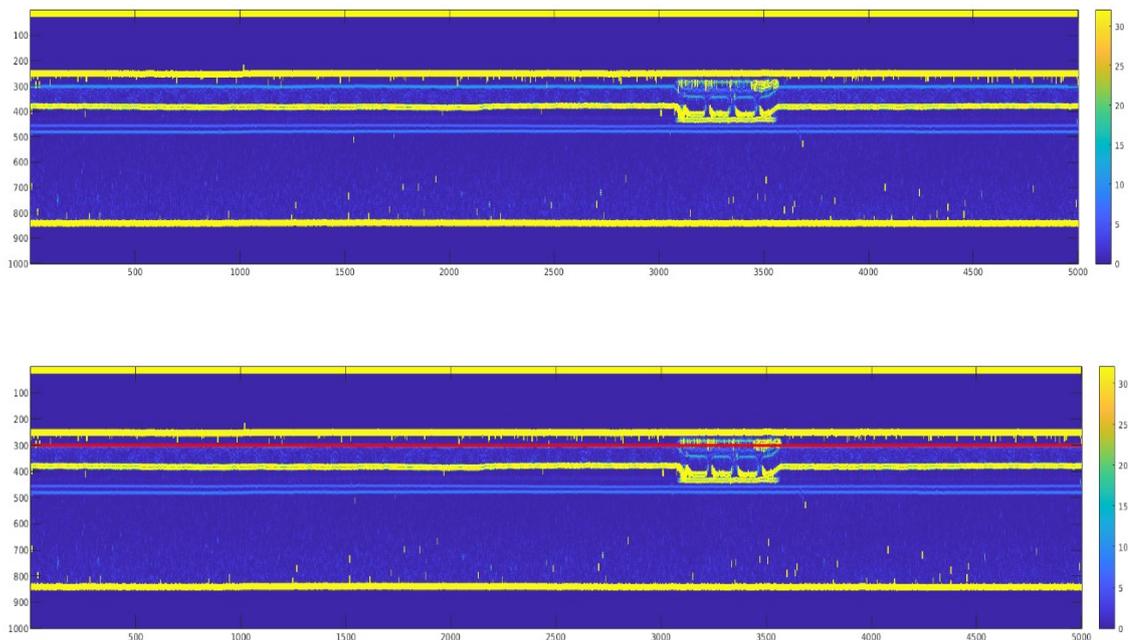


Figura 70. Búsqueda de arista de referencia (en rojo). Imagen de gradientes.

Una vez encontrada la arista de referencia, se utiliza para obtener información sobre la arista interior superior. Conocido el espesor de la ventana y los espesores de las paredes, se puede obtener la posición de las otras tres aristas (Figura 71) sin volver a realizar la búsqueda (que incrementaría el tiempo de cálculos).

Una vez encontradas las aristas, se utilizan para realizar una comparación de radios. Por un lado, se toman varias líneas vecinas a la arista de referencia

(configurable) y se calcula la media de los radios en cada punto de cada línea (Figura 72).

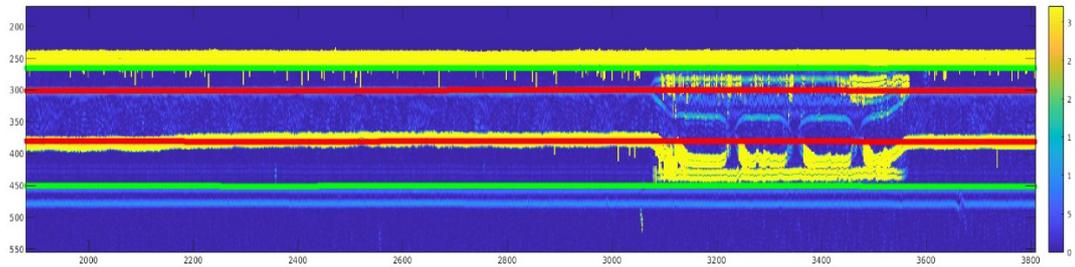


Figura 71. Detalle de aristas interiores (rojas) y exteriores (verdes).

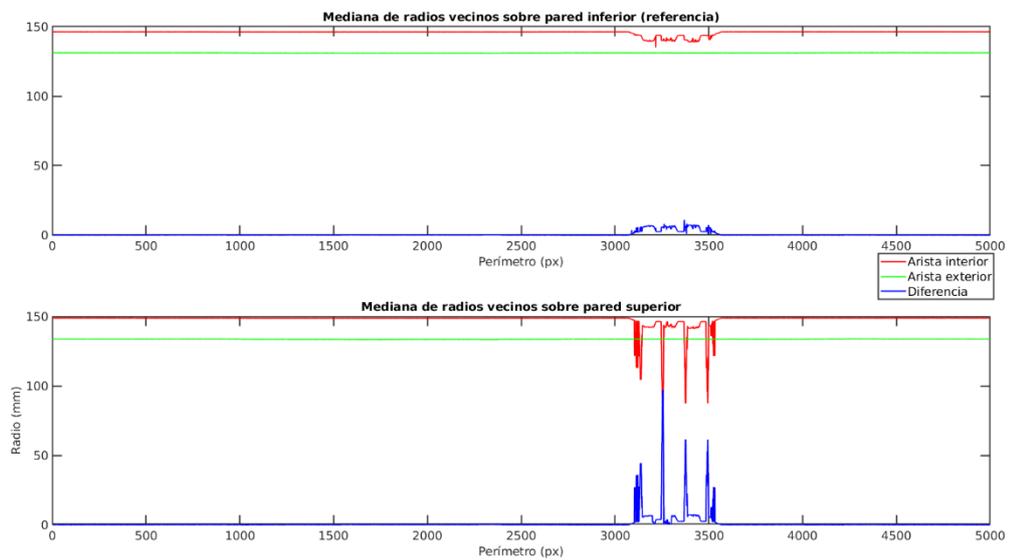
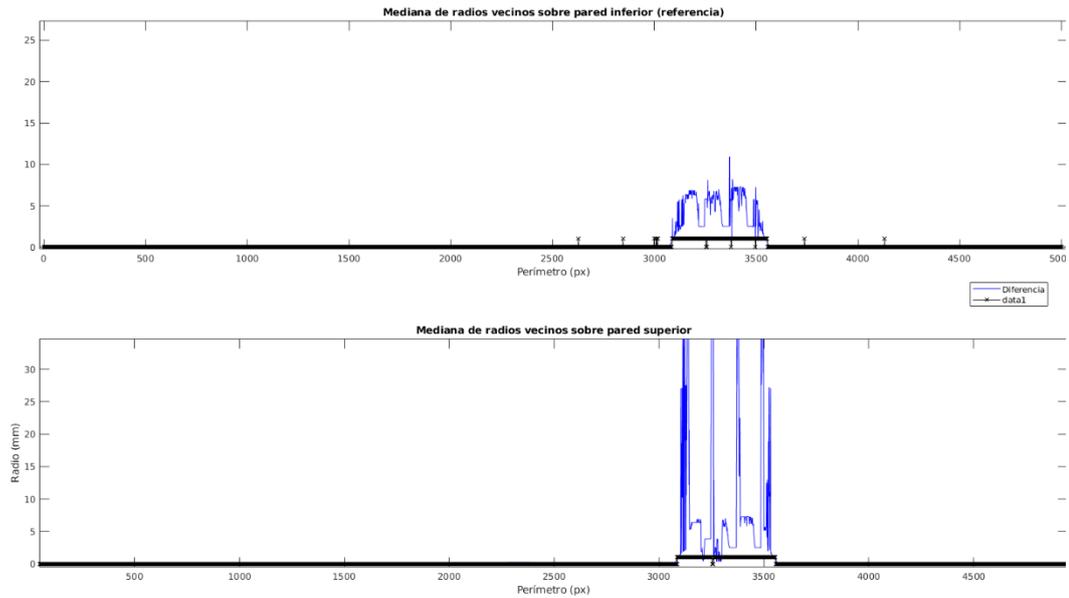


Figura 72. Comparación de radios de las aristas interiores (con equilibrado) y exteriores (sin equilibrado).

En cada pared, se toman como candidatos los valores del vector de diferencias que superan cierto umbral configurable (Figura 73).



*Figura 73. Búsqueda de candidatos a equilibrado.*

Se agrupan los candidatos en grupos. Se forma un grupo entre candidatos cercanos entre sí (no más de 20-30 píxeles de diferencia). Se comparan los grupos y se eliminan aquellos que no aparecen en las dos paredes (Figura 74). Se le da una tolerancia configurable, en este caso 100 píxeles. El inicio y fin del grupo encontrado en la pared de arriba y el encontrado en la pared de abajo deben estar a menor distancia que la tolerancia. Además, se añade un tamaño mínimo y máximo acorde con las especificaciones que ha de cumplir el equilibrado.

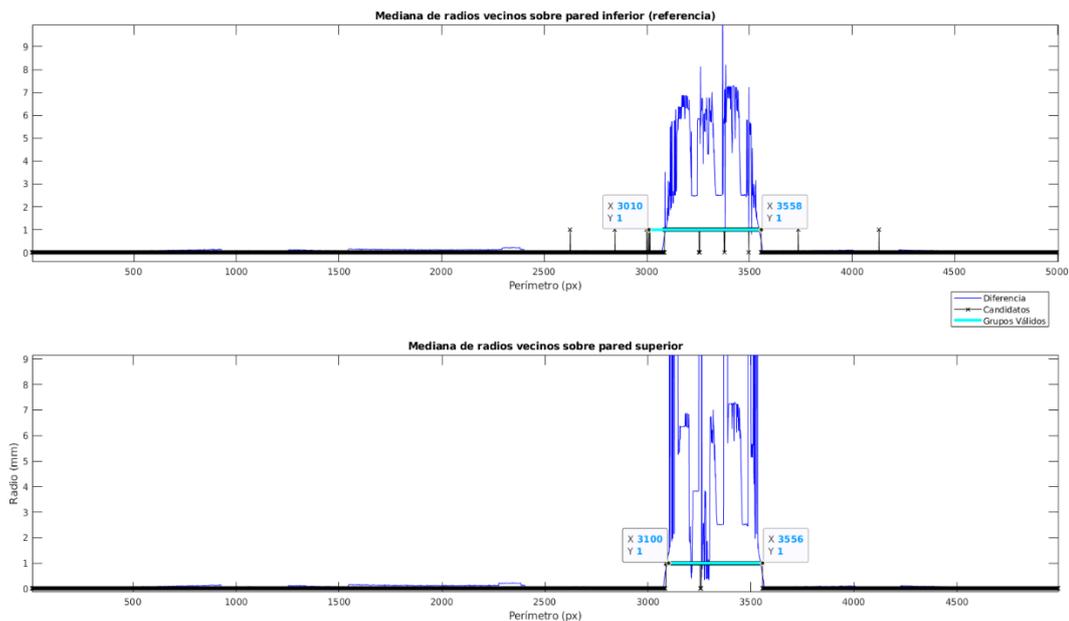


Figura 74. Agrupación de candidatos y selección de grupos válidos. En cian, grupos de candidatos que cumplen condiciones de equilibrado.

Por último, se eliminan los grupos válidos de los candidatos (Figura 75).

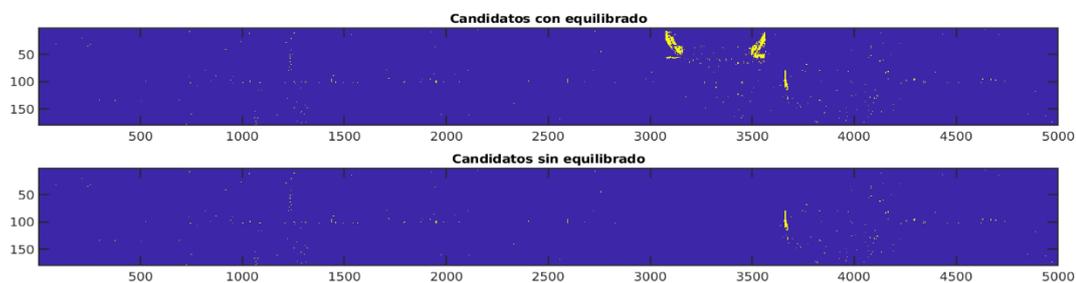


Figura 75. Candidatos con y sin equilibrado en diámetro externo (esquina superior).

### 5.7.2.2 Búsqueda de aristas

Tanto para rectificar los mapas de profundidades y radios como para buscar el equilibrado se utiliza una de las aristas del disco como referencia. Para buscar la arista se ha desarrollado un algoritmo de búsqueda sencillo basado en la búsqueda de bordes con un filtro derivativo en una dimensión.

En primer lugar, se aplica un filtro de derivada de 8x1 al mapa de profundidades en la dirección perpendicular a la arista (Figura 70). Como en este caso el sensor está a 45° de la esquina, el resultado es similar aplicando el filtro sobre los radios.

Se buscan valores máximos de la derivada que estén dentro de los márgenes esperados de la esquina. Es decir, tomando el plano del disco y las tolerancias de fabricación como referencia, se le pasan como parámetro a la búsqueda los radios y profundidades máximas y mínimas donde puede estar la esquina, y si utilizan los máximos de la derivada para situarlos con precisión (Figura 76).

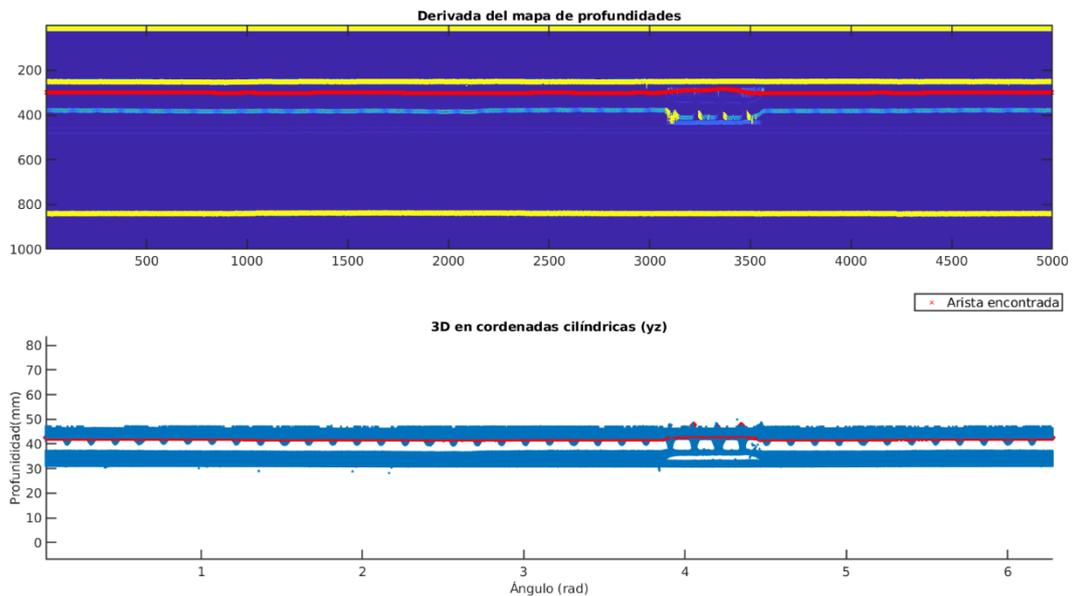


Figura 76. Búsqueda de arista de referencia.

Una vez encontrada la arista, se suaviza con un filtro de Savinsky-Golay [11] para eliminar los puntos sueltos y el equilibrado y se obtiene el resultado de la Figura 70.

## 5.8 Zonas especiales

Las zonas especiales son aquellas en las que no se puede aplicar ninguno de los algoritmos mencionados anteriormente. Estas son las zonas alrededor de agujeros, los poros dentro del equilibrado, la presencia de inquilinos en la franja de ventilación y el canal entre la pared del gorro y la pista.

La inspección de estas zonas no entra en el alcance de esta parte del proyecto.

# 6 Procedimiento experimental

## 6.1 Pruebas sobre el prototipo en equipo de ensayos

Las primeras pruebas se llevan a cabo sobre el equipo de ensayos montado en DSI Plus (Figura 29). Con estos ensayos, se corrobora la viabilidad del proyecto y se toman los primeros datos sobre los discos. Con estos datos se da comienzo al desarrollo de los algoritmos de detección de defectos.

## 6.2 Pruebas sobre máquina offline

En cuanto llega la máquina a la empresa, se llevan a cabo las primeras pruebas del algoritmo desarrollado. Se ajustan los parámetros a las nuevas condiciones de luminosidad, se ajustan las posiciones del sensor, y se comienza a desarrollar el software principal de la máquina.

Para tomar datos, se llevan a cabo adquisiciones con la máquina en modo manual, simulando un ciclo de medición completo en línea de producción. Como los cálculos aún no están integrados sobre el software principal, las pruebas de detección se realizan offline con los datos obtenidos.

Este modo de validación del software se sigue utilizando una vez integrados los cálculos en la máquina, para revisar discos con diagnóstico erróneo en la línea y para probar que los cambios en el software mejorarían la detección sobre los mismos discos antes de integrar esos cambios en producción.

A continuación, se muestra un ejemplo de detección de un defecto en esquina mediante procesamiento offline:

### **Datos en bruto**

De las medidas realizadas por el sensor y tras un tratamiento previo, se obtienen los datos de profundidades de la zona del disco medida (Figura 77 y Figura 78).

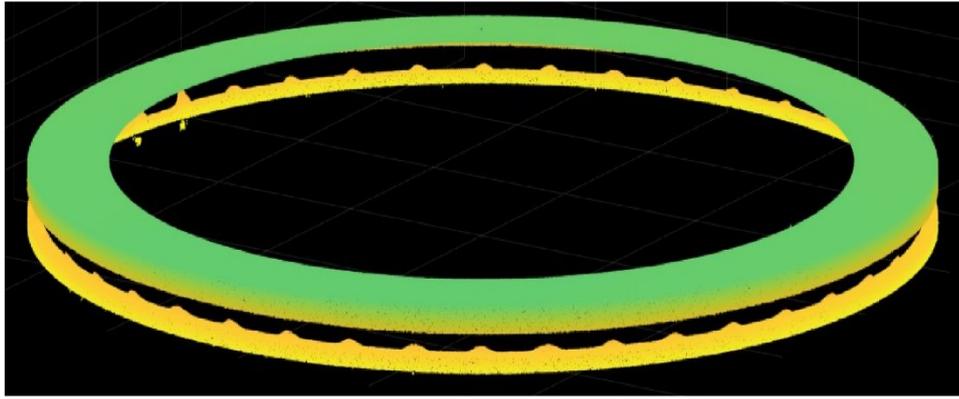


Figura 77. Imagen de la zona exterior del disco en coordenadas cartesianas, reconstruida a partir de los datos obtenidos del sensor de triangulación láser. Se proyectan y se tratan los datos obtenidos.

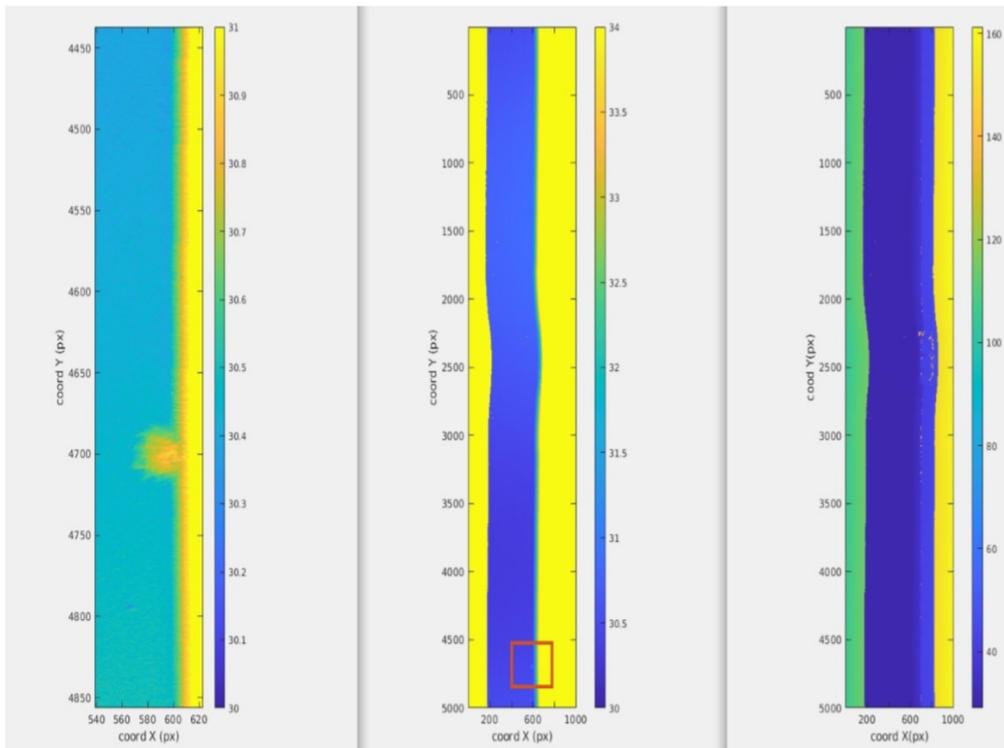


Figura 78. Mapa de profundidades del defecto (mm) en la proyección 2D de la parte exterior del disco.

### Detección del equilibrado

Se detectan los equilibrados del disco para descartarlos como candidatos a defecto (Figura 79 y Figura 80).



Figura 79. Imagen de la parte exterior del disco proyectada en 2D y umbralizada. Imagen de salida del algoritmo.

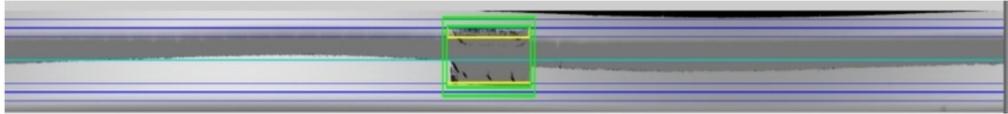


Figura 80. Detección del equilibrado del disco. Imagen de salida del algoritmo.

## Resultados obtenidos

Una vez eliminado el equilibrado de los candidatos, se clasifican por profundidad y diámetro y se visualizan en la interfaz aquellos que cumplen las condiciones de defecto (Figura 81).

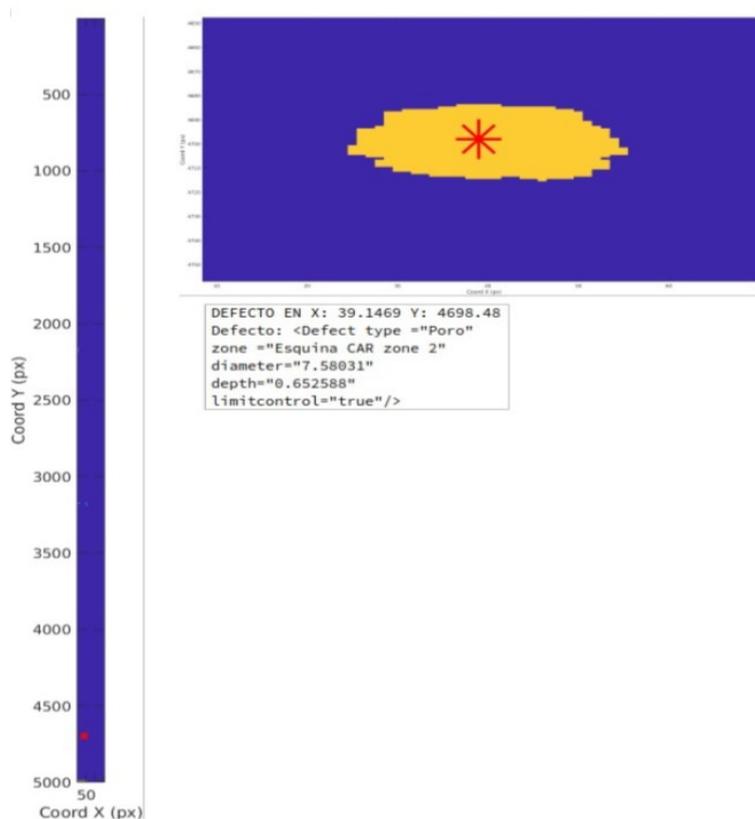


Figura 81. Salida del algoritmo de detección. Izq.: Imagen de salida de depuración. Candidatos y defecto con su centro de masas marcado en rojo. Der. Arriba: ampliación imagen izquierda sobre el defecto. Der. Abajo: resultado que se envía a la interfaz con las medidas del defecto.

## **6.3 Pruebas sobre la máquina online**

Se llevan a cabo varios simulacros de producción con la máquina en modo manual, pero ahora con los cálculos integrados en el software. Se pasan solo discos con defectos y se valida la máquina con respecto a los falsos negativos (discos malos, aceptados por la máquina).

## **6.4 Pruebas sobre máquina en producción**

Se programa la máquina para admita todos los discos, aunque la decisión de la inspección sea rechazo. La inspección visual sigue llevándose a cabo, por lo tanto todos los discos inspeccionados son buenos. De esta forma se valida la máquina respecto a los falsos positivos (discos buenos rechazados por la máquina).

# **7 Resultados**

## **7.1 Resultados obtenidos.**

### **7.1.1 Pruebas de falso negativo**

Se obtiene un ratio de falsos negativos inferior al 10% en las primeras pruebas sobre discos sacados de la línea de producción. Se mejora la detección hasta llegar a un 1% de discos con poro no rechazados. Se rechazan un 100% de los discos con poros con diámetro entre 3 y 1 mm y un 90% de los discos con poros entre 0.5 y 1mm de diámetro (datos proporcionados por la empresa contratante).

El problema de los poros de menos de 1mm de diámetro son las condiciones de inspección. Bajar el umbral de detección por debajo de 1mm eleva el falso positivo por encima del 5% a causa de la suciedad de los discos que llegan a la máquina de inspección.

En nuevos proyectos se ha conseguido detectar un 100% de los defectos de 0.5mm de profundidad y 0.5mm de diámetro. Para ello se ha aumentado la resolución de la medición (10.000 perfiles por vuelta, el doble de lo actual). Además, los discos llegan limpios y secos a la entrada de la máquina de inspección.

## 7.1.2 Pruebas de falso positivo

### Primera prueba de producción

Se reporta un problema en la detección del equilibrado del disco que provoca un falso rechazo elevado (Figura 82).

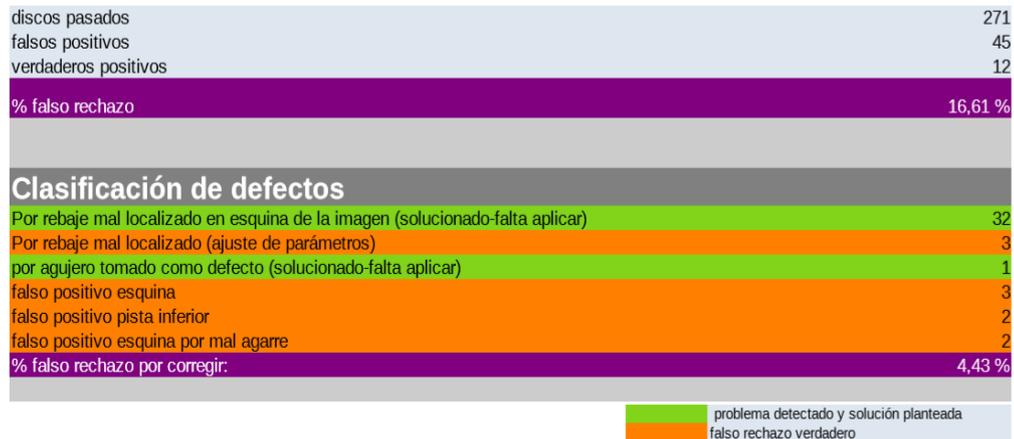


Figura 82. Resultados primera prueba de producción.

### Segunda prueba de producción

Se reportan un mayor número de equilibrados mal detectados. Se reportan discos con características anómalas en el mecanizado (4). Se mantiene el falso rechazo por razones ajenas a la mala detección del equilibrado en torno al 5% (Figura 83).



Figura 83. Resultados segunda prueba de producción.

### Tercera prueba de producción

Se corrige el problema de la mala detección del equilibrado. Se reportan dos nuevos discos con anomalías en el mecanizado. El falso rechazo baja al nivel estimado antes de la corrección. Se sigue trabajando para disminuir el número de falsos positivos y falsos candidatos en esquinas y pistas ( Figura 84).

discos pasados	97
falsos positivos	5
verdaderos positivos	3
<b>% falso rechazo</b>	<b>5,15 %</b>
<b>Clasificación de defectos</b>	
Por rebaje mal localizado en esquina de la imagen (solucionado-falta aplicar)	0
Por rebaje mal localizado (ajuste de parámetros)	0
por agujero tomado como defecto (solucionado-falta aplicar)	0
falso positivo esquina	5
falso positivo pista inferior	2
falso positivo esquina por mal agarre	2
<b>% falso rechazo por corregir:</b>	<b>5,15 %</b>

■ problema detectado y solución planteada  
■ falso rechazo verdadero

Figura 84. Resultados de la tercera prueba de producción.

### Estado final de la máquina de detección de poros

Tras las pruebas de producción, se trabaja en ajustar los parámetros para mejorar el falso rechazo. Se mejora la detección del equilibrado utilizando el método explicado en la sección 5.7.2.1. Además, se mejoran las condiciones mecánicas de la máquina (alabeo y excentricidad por debajo de 0.2mm). Tras la actualización de los parámetros y la mejora de la mecánica se consigue un falso positivo por debajo del 2% y la detección del 100% de los defectos con dimensiones por encima del límite de control.

## 8 Conclusiones y trabajos futuros

Durante este proyecto se ha desarrollado un software capaz de adquirir datos de un sensor de triangulación láser, detectar defectos superficiales y de caracterizar dichos defectos. Por un lado, se ha implementado un software de adquisición capaz de proveer al sistema los datos necesarios para la detección de defectos superficiales. Por otro lado, el algoritmo de detección de defectos se encuentra en este momento en funcionamiento en la empresa contratante, con un falso positivo por debajo del 2% y detectando el 100% de los defectos cuyas dimensiones superan los límites de control impuestos en el cuaderno de cargas.

Además, el carácter modular del software permite que sea utilizado en distintos proyectos. En este momento, el software de detección de defectos está siendo utilizado en cuatro máquinas gemelas a la descrita en este informe, tres de las cuáles ya se encuentran en producción. Por otro lado, la inspección está en funcionamiento para seis referencias de disco de freno diferentes y se prevé su implementación para otras tres referencias a medio plazo.

Para las nuevas máquinas se está trabajando en una mejora en la fidelidad de detección en condiciones de luminosidad desfavorables. También se está trabajando en una detección del equilibrado más robusta.

Como objetivo a corto plazo, se plantea disminuir los tiempos de cálculo y paralelizar los cálculos de cada zona de inspección.

Además, se desarrollarán las partes del software que quedaban fuera del alcance de este proyecto:

- Implementación de la detección en zonas especiales. Se implementará la detección de defectos superficiales cerca de la zona del equilibrado y los agujeros de sujeción, así como la detección de la presencia de inquilinos en la franja de ventilación y la inspección del canal entre la pared del gorro y la banda de frenado.
- Utilización del software implementado para la medición de agujeros de sujeción de los discos. Se pretende comprobar que el posicionamiento de los agujeros es correcto y que su diámetro está dentro de tolerancia.
- Detección de defectos por debajo de 1mm de diámetro y 0.5mm de profundidad. Las condiciones de inspección en la línea de producción descrita imposibilitan la consecución de este objetivo, sin embargo, se están consiguiendo mejores resultados en las nuevas máquinas.

Además, se prevé la adaptación del software para la detección de defectos en otros tipos de piezas.

# 9 Presupuesto

## 9.1 Coste de ejecución material

El coste de ejecución material incluye tres categorías, coste de equipos, coste de software y coste de mano de obra por el tiempo empleado en el proyecto.

### 9.1.1 Costes de equipos

Todos los componentes se compran por duplicado para surtir las dos máquinas de detección de defectos encargadas por el cliente en el momento del presupuestado.

CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	SUBTOTAL
Ordenador de visión	750	2	1500
Monitor de visión	425	2	900
Ratón + teclado	29	2	58
Fuente alimentación	94	2	188
Sensor AT C5-CS	9186	4	36.744
Cables sensor	225	8	1800

**Subtotal:** ..... **41.190 €**

### 9.1.2 Costes de software

Cálculo de licencias por 6 meses de uso durante las pruebas preliminares.

CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	SUBTOTAL
Matlab R2019b	1800/año	6 meses	900

**Subtotal:** ..... **900€**

## 9.2 Costes de mano de obra

Se estima un trabajo de 8 horas al día y 5 días a la semana, con un coste de 40€ la hora de ingeniería.

<b>CONCEPTO</b>	<b>CANTIDAD (Días)</b>	<b>CANTIDAD (HORAS)</b>	<b>SUBTOTAL</b>
Desarrollo de software de adquisición	40	320	12800
Desarrollo Software detección defectos	120	960	38400
Software comunicaciones	5	40	1600
10 viajes a planta	-	350	3500

**Subtotal:** ..... **56.300 €**

## 9.3 Coste total del presupuesto de ejecución material

<b>CONCEPTO</b>	<b>SUBTOTAL</b>
<b>Coste de equipos</b>	<b>41190 €</b>
<b>Coste de software</b>	900 €
<b>Coste de mano de obra</b>	56300 €

**Subtotal:** ..... **98.390 €**

## 9.4 Gastos generales y beneficio industrial

Los gastos generales y beneficio industrial son los gastos obligados que se derivan de la utilización de las instalaciones de trabajo más el beneficio industrial. Se estima un porcentaje del 16 % sobre el coste de ejecución material

<b>CONCEPTO</b>	<b>SUBTOTAL</b>
<b>Gastos generales y beneficio industrial</b>	<b>15742,4 €</b>

## 9.5 Importe total

CONCEPTO	SUBTOTAL
Coste total del presupuesto de ejecución material	98.390 €
Gastos generales y beneficio industrial	15.742,4 €

<b>TOTAL:</b>	.....	<b>114.132,4 €</b>
<b>IVA 21%:</b>	.....	<b>23.967,8 €</b>
<b>TOTAL, IVA INCLUIDO:</b>	.....	<b>138.100,20 €</b>

El Importe Total del proyecto suma la cantidad de:

**Ciento treinta y ocho mil cien euros con veinte céntimos.**



# 11 Bibliografía

- [1] “CVB User Guide for the GenICam Driver”. [https://help.commonvisionblox.com/GenICam-User-Guide/index.html?html\\_english\\_genicam\\_browser\\_english.htm](https://help.commonvisionblox.com/GenICam-User-Guide/index.html?html_english_genicam_browser_english.htm) (accedido sep. 06, 2020).
- [2] P. M. Leronés, J. L. Fernández, J. G. García-Bermejo, y E. Z. Casanova, «SISTEMA AUTOMATIZADO PARA INSPECCIÓN VISUAL DE DISCOS DE FRENO BRUTOS DE FUNDICIÓN CON NUEVO MÉTODO DE CALIBRACIÓN 3D PARA PIEZAS EN ROTACIÓN», p. 8.].
- [3] J. Geng, «Structured-light 3D surface imaging: a tutorial», *Adv. Opt. Photon.*, vol. 3, n.º 2, p. 128, jun. 2011, doi: 10.1364/AOP.3.000128.].
- [4] Voisin, Sophie & Foufou, Sebti & Truchetet, Frederic & Page, David & Abidi, Mongi. (2007). Study of ambient light influence for three-dimensional scanners based on structured light. *Optical Engineering - OPT ENG.* 46. 10.1117/1.2717126.].
- [5] «¿Escáner láser 3D o escáner de luz estructurada?», 3Dnatives, ago. 07, 2019. <https://www.3dnatives.com/es/escaner-laser-3d-escaner-luz-estructurada-mejor-080820192/> (accedido jun. 28, 2021).
- [6] «Reconstrucción de perfiles submicrométricos con Holografía Conoscópica para la medición de rugosidad». <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/37430> (accedido jul. 18, 2021).
- [7] «Optimet Industrial Catalog 2017 - Ophir Optronics - Catálogo PDF | Documentación técnica | Brochure». <https://pdf.directindustry.es/pdf-en/ophir-optronics/optimet-industrial-catalog-2017/12595-722511.html#search-en-optimet> (accedido jun. 30, 2021).].
- [8] “C5-CS\_web-1.pdf”. Accedido: ago. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.automationtechnology.de/cms/wp-content/uploads/2018/11/C5-CS\\_web-1.pdf](https://www.automationtechnology.de/cms/wp-content/uploads/2018/11/C5-CS_web-1.pdf).
- [9] «Handke - C5 Series User Manual Rev. 1.4.pdf». Accedido: ago. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/cameras/at/11/117760-Automation-Technology-User-Manual-C5-Series.pdf>.
- [10] «122195-Automation\_Technology\_AppNote\_FIR\_Filter.pdf». Accedido: ago. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/cameras/12/122195-Automation\\_Technology\\_AppNote\\_FIR\\_Filter.pdf](https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/cameras/12/122195-Automation_Technology_AppNote_FIR_Filter.pdf).
- [11] W. H. Press y S. A. Teukolsky, “Savitzky-Golay Smoothing Filters”, *Comput. Phys.*, vol. 4, n.o 6, p. 669, 1990, doi: 10.1063/1.4822961.
- [12] Liu, Hancong, Sirish Shah, and Wei Jiang. “On-line outlier detection and data cleaning.” *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 28, March 2004, pp 1635 – 1647
- [13] E. R. Dougherty y R. A. Lotufo, *Hands-on Morphological Image Processing*. SPIE Press, 2003. Chapter 1.
- [14] «D.H. Ballard, "Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes", *Pattern Recognition*, Vol.13, No.2, p.111-122, 1981.



