

Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial



**Trabajo Fin de Grado**

Detección de objetos mediante LIDAR 3D para aplicaciones en  
robótica



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

**Autor:** Sergio Grupeli Martínez

**Tutor/es:** Felipe Espinosa Zapata

2017



UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial

**Trabajo Fin de Grado**

DETECCIÓN DE OBJETOS MEDIANTE LIDAR 3D PARA  
APLICACIONES EN ROBÓTICA

Autor: Sergio Grupeli Martínez

Director: Felipe Espinosa Zapata

Tribunal:

Presidente: Enrique Santiso Gómez

Vocal 1º: Fernando Naranjo Vega

Vocal 2º: Felipe Espinosa Zapata

Calificación: .....

Fecha: .....



*Dedicado a mi hermano Guillermo por haber sido y ser  
un gran apoyo en mi vida.*



# Resumen

El objetivo del TFG es evaluar las propiedades de un LIDAR (Light Detection and Ranging) 3D comercial para registrar objetos y analizar su aplicabilidad en robótica.

El dispositivo 3D evaluado es un LIDAR YVT-X002 de Hokuyo. Se describe el principio de funcionamiento, se analizan los modos de funcionamiento y se estudian técnicas de filtrado para localizar objetos en un entorno conocido.

Tras comparar sus prestaciones con respecto al escáner laser 2D URG-04LX también de Hokuyo, se incluyen resultados simulados y experimentales de localización de diferentes objetos en entorno 3D.





# Abstract

The TFG's objective is to evaluate the properties of a 3D commercial LIDAR (Light Detection and Ranging) in order to register objects and analyze its applicability in robotics.

The evaluated 3D device is a Hokuyo LIDAR YVT-X002. We describe the working principle, we also analyze the working methods and finally we study filtering techniques so as to identify objects in a known environment.

After comparing its benefits against the laser scanner 2D URG-04LX, which belongs to Hokuyo too, we include the simulated and experimental location results of different objects in a 3D environment.



# Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>6</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>8</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>19</b>
1.1. ¿Qué es un LIDAR? .....	19
1.2. Aplicaciones .....	19
1.3. Estructura del documento .....	20
<b>2. Fundamentos teóricos.....</b>	<b>21</b>
2.1. LIDAR 3D YVT-X002 .....	21
2.1.1. Principio de funcionamiento, medida de distancia .....	22
2.1.2. Restricciones en la detección de objetos .....	24
2.1.3. Parámetros de barrido .....	25
2.1.4. Modelo matemático para la obtención de spots .....	27
2.1.5. Transformación 3D de coordenadas polares a cartesianas .....	30
2.1.6. Configuración del registro de medidas.....	31
2.1.7. Comandos y parámetros principales.....	32
2.1.8. Conexionado .....	33
2.2. LIDAR URG-04LX.....	34
2.2.1. Resolución de medida.....	35
2.2.2. Codificación de datos .....	36
2.2.3. Lista de comandos.....	36
2.3. Comparación YVT-X002 vs URG-04LX .....	38
<b>3. Objetivo y descripción de los ensayos .....</b>	<b>40</b>
3.1. Objetivos principales.....	40
3.2. Descripción de ensayos.....	42
3.2.1. Objeto a detectar .....	42
3.2.2. Entorno experimental .....	43
3.2.3. Tipos de ensayos elaborados.....	44

3.2.4. Material empleado.....	47
3.2.5. Calculo de las bandas de error .....	48
<b>4. Resultados.....</b>	<b>50</b>
4.1. Simulación.....	50
4.1.1. Contenido.....	50
4.1.2. Resultados teóricos.....	56
4.2. Experimentación.....	61
4.2.1. Procedimiento: Registro y procesamiento de datos.....	61
4.2.2. Resultados experimentales.....	63
<b>5. Filtrado de outliers.....</b>	<b>67</b>
5.1. Objetivos del filtrado .....	67
5.2. Técnicas para la eliminación de outliers.....	67
5.2.1. Filtrado 1: Comparación de las componentes angulares .....	67
5.2.2. Filtrado 2: Descomposición en planos XY .....	74
5.2.3. Filtrado 3: Conformación de planos mediante la agrupación de spots.....	79
5.3. Elección de la técnica de filtrado.....	88
5.4. Resultados obtenidos.....	90
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>94</b>
6.1. Conclusiones finales.....	94
6.2. Líneas futuras.....	96
<b>Bibliografía.....</b>	<b>97</b>
<b>Apéndice A.....</b>	<b>99</b>
<b>Apéndice B.....</b>	<b>103</b>



# Índice de imágenes

IMAGEN 2.1. LIDAR YVT-X002 .....	21
IMAGEN 2.2. ESQUEMA DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN DE LA ONDA ENVIADA PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES CON SISTEMAS DE TIEMPO DE VUELO. ....	22
IMAGEN 2.3. FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSISTORES MOSFET DURANTE LOS 4 PERIODOS DE RECEPCIÓN DEL HAZ DE LUZ. ....	23
IMAGEN 2.4. RANGO ANGULAR VERTICAL PARA LA OBTENCIÓN DE LA COMPONENTE Z O ALTURA DE LOS ÍTEMS. ....	24
IMAGEN 2.5. RANGO ANGULAR HORIZONTAL PERMITIDO PARA LA CAPTACIÓN Y EL MODELADO DIGITAL DEL ENTORNO .....	25
IMAGEN 2.6. MODO DE EJECUCIÓN DE CADA BARRIDO Y CUANTIFICACIONES QUE LO FORMAN. ....	26
IMAGEN 2.7. MODOS DE OBTENCIÓN DE MEDIDAS. ....	27
IMAGEN 2.8. RELACIÓN ENTRE LAS COMPONENTES CARTESIANAS Y ANGULARES. ....	30
IMAGEN 2.9. CONEXIONES FÍSICAS DEL LIDAR 3D YVT-X002. ....	33
IMAGEN 2.10. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL DISPOSITIVO URG-04XL. ....	34
IMAGEN 2.11. EJECUCIÓN DE LAS MEDICIONES REALIZADAS POR EL URG-04LX .....	35
IMAGEN 3.1. ESQUEMA DE LOS ENSAYOS A REALIZAR. ....	41
IMAGEN 3.2. OBJETO UTILIZADO EN LOS ENSAYOS .....	42
IMAGEN 3.3. ENTORNO EXPERIMENTAL .....	43
IMAGEN 3.4. ENSAYOS CON UNA PLANCHA A DISTINTAS DISTANCIAS .....	44
IMAGEN 3.5. ENSAYOS CON CAMBIO DE TAMAÑO DEL OBJETO A DISTINTAS DISTANCIAS .....	45
IMAGEN 3.6. ENSAYOS CON CAMBIO DE TAMAÑO DEL OBJETO A DISTINTAS DISTANCIAS Y ÁNGULO DE 45º .....	46
IMAGEN 3.7. ENSAYOS CON ROTACIÓN A -45 GRADOS .....	46
IMAGEN 3.8. SISTEMA PRINCIPAL. ....	48
IMAGEN 4.1. TEOREMA DEL COSENO .....	54
IMAGEN 4.2. REGISTRO DE LOS DATOS ADQUIRIDOS POR EL LIDAR YVT-X002. ....	61
IMAGEN 4.3. LOCALIZACIÓN DE UN ECO EN LOS RESULTADOS. ....	62
IMAGEN 5.1. ELECCIÓN DE LAS MEDICIONES PARA UN PITCH DETERMINADO .....	74
IMAGEN 5.2. COMPARACIÓN ENTRE DATOS CON OBJETO (COLUMNA 1-2) Y SIN OBJETO (COLUMNAS 3-4). SALTO EN EL VALOR DE YAW. ....	76
IMAGEN 5.3. MATRIZ DE DATOS REUBICADOS SEGÚN SU ORIENTACIÓN .....	80



# Índice de tablas

TABLA 2.1. VALORES ANGULARES DEL SPOT N. ANGULO VERTICAL ( $\Phi$ PITCH) Y HORIZONTAL ( $\theta$ YAW) DE CADA PUNTO DENTRO DE CADA UNA DE LAS 36 LÍNEAS DEL CAMPO. ....	28
TABLA 2.2. INICIO Y FIN DE CADA UNO DE LOS CAMPOS EN MODO ENTRELAZADO. ....	29
TABLA 2.3. INFORMACIÓN SOBRE ERRORES DE MEDIDA APARTADOS POR EL REGISTRO DE CABECERA VSSP COMMON HEADER .....	31
TABLA 2.4. PARÁMETROS INTERNOS CONFIGURABLES DEL YVT-X002.....	32
TABLA 2.5. COMANDOS EMPLEADOS PARA CONFIGURAR EL LIDAR 3D YVT-X002 .....	33
TABLA 2.6. COMPARATIVA DE LOS PARÁMETROS DE MEDICIÓN ENTRE DISTINTOS DISPOSITIVOS. ....	35
TABLA 2.7. COMPARACIÓN DE PARÁMETROS PRINCIPALES. ....	38
TABLA 3.1. CONDICIONES DE LOS ENSAYOS.....	41
TABLA 3.2. VALORES DE LA ALIMENTACIÓN Y LA DIRECCIÓN IP. ....	47
TABLA 3.3. AJUSTES NECESARIOS SOBRE LA IPv4.....	47
TABLA 4.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS CON UNA ÚNICA LAMINA. ....	57
TABLA 4.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS CON DOS PLANCHAS UNIDAS. ....	58
TABLA 4.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS CON ROTACIÓN.....	60
TABLA 4.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS CON UNA ÚNICA LAMINA. ....	64
TABLA 4.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS CON DOS PLANCHAS UNIDAS. ....	65
TABLA 4.6. ENSAYOS CON ROTACIÓN INCLUIDA Y ENTORNO DE LAS PRUEBAS. ....	66
TABLA 5.1. MEDIDAS CALCULADAS VS MEDIDAS REALES, TRAS EL PROCESO DE FILTRADO 1.....	73
TABLA 5.2. COMPARACION ENTRE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS Y LOS REALES. ....	79
TABLA 5.3. COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS OBTENIDOS Y REALES. ....	86
TABLA 5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LAS TRES TÉCNICAS DE FILTRADO. ....	88
TABLA 5.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS CON UNA ÚNICA LAMINA. ....	91
TABLA 5.6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS CON DOBLE LAMINA.....	92
TABLA 5.7. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS CON ROTACIÓN SOBRE EJE Z. ....	93





# Índice de gráficas

GRAFICA 4.1. SIMULACIÓN DEL RANGO DE DETECCIÓN DEL YVT-X002. ....	50
GRAFICA 4.2. OBTENCIÓN DE UNA LÍNEA DE UN ÚNICO BARRIDO EN UN OBJETO. ....	52
GRAFICA 4.3. LIDAR COLOCADO A 0.5 METROS DE ALTURA. ....	52
GRAFICA 4.4. LIDAR COLOCADO A 1 METRO DE ALTURA. ....	53
GRAFICA 4.5. DIMENSIONADO EN MODO ENTRELAZADO. ....	53
GRAFICA 4.6. ENSAYO SIMULADO: (A) CON ROTACIÓN SOBRE EL EJE Z DEL OBJETO, (B) VISTA DESDE EL PLANO XY. ....	55
GRAFICA 4.7. OBJETO SITUADO A 5 M DEL SENSOR, VISTA 3D (IZDA) VISTA DEL PLANO YZ (DCHA). ....	63
GRAFICA 4.8. GRAFICAS CORRESPONDIENTES A LOS PLANOS XY (IZDA) Y XZ (DCHA). ....	63
GRAFICA 5.1. COMPONENTE HORIZONTAL DE LOS CUATRO BARRIDOS. ....	68
GRAFICA 5.2. AMPLIACIÓN DE LA IMAGEN 5.1 PARA VISUALIZACIÓN DE DATOS. ....	68
GRAFICA 5.3. COMPONENTE VERTICAL DE LOS CUATRO BARRIDOS. ....	69
GRAFICA 5.4. AMPLIACIÓN DE LA IMAGEN 5.3 PARA VISUALIZACIÓN DE DATOS. ....	69
GRAFICA 5.5. RESULTADOS ORIGINALES (SIN PROCESAR) OBTENIDOS CON OBJETO (IZDA), SIN OBJETO (DCHA). ....	70
GRAFICA 5.6. SOLAPAMIENTO DE LOS DOS ARCHIVOS CON Y SIN OBJETO. ....	71
GRAFICA 5.7. GRAFICA RESULTANTE DEL PRIMER FILTRADO, RESTA DEL FONDO. ....	71
GRAFICA 5.8. GRAFICA RESULTANTE DE LA SEGUNDA FASE DE FILTRADO. ....	72
GRAFICA 5.9. RESULTADOS FINALES DEL PROCESO DE FILTRADO 1. ....	73
GRAFICA 5.10. SUPERPOSICIÓN DE PLANO X-Y, SIN INFORMACIÓN DEL OBJETO. ....	75
GRAFICA 5.11. VISUALIZACIÓN DEL REGISTRO PARA UN PITCH CONCRETO EN PLANO XY. ....	77
GRAFICA 5.12. FILTRADO REALIZADO EN UN PLANO X-Y. ....	77
GRAFICA 5.13. RUIDO DEL ENTORNO. ....	78
GRAFICA 5.14. RESULTADO FINAL DEL FILTRADO 2 DE UN OBJETO EN ESPACIO 3D. ....	78
GRAFICA 5.15. NÚMERO DE PUNTOS SOBRESCRITOS (EJE Y) EN FUNCIÓN DE LOS BITS CUANTIFICADOS (EJE X). ....	81
GRAFICA 5.16. ERROR MEDIO CALCULADO (EJE Y), EN FUNCIÓN DE LOS BITS CUANTIFICADOS (EJE X). ....	81
GRAFICA 5.17. REUBICACIÓN DE LOS DATOS. ....	82
GRAFICA 5.18. PLANOS RESULTANTES DE LAS PAREDES. ....	83
GRAFICA 5.19. FILTRADO DE LAS PAREDES. ....	83

GRAFICA 5.20. PLANO DEL TECHO. ....	84
GRAFICA 5.21. RESULTADO CON PAREDES Y TECHO FILTRADOS. ....	84
GRAFICA 5.22. PLANO RESULTANTE DEL OBJETO.....	85
GRAFICA 5.23. CONJUNTO DE PLANOS QUE CONSTITUYEN EL ENTORNO A FILTRAR.....	85
GRAFICA 5.24. IMAGEN SÓLIDA DEL OBJETO DETECTADO.....	86

# 1. Introducción

---

## 1.1. ¿Qué es un LIDAR?

La tecnología Light Detection and Ranging, más conocida por su acrónimo LIDAR, permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado, obteniendo una nube de puntos (2D o 3D) reflejados del escenario en el que se encuentre, con una alta velocidad y precisión.

## 1.2. Aplicaciones

El LIDAR se emplea actualmente para un número muy amplio de aplicaciones:

- **Industria y energía:** determinación del estado de una planta industrial, análisis de la posible inclusión de nuevas líneas de producción, inspección de líneas eléctricas, de red ferroviaria, monitorización y automatización de procesos, medida de material a granel, medida de perfiles industriales, detección de obstáculos y evitación de colisiones.
- **Ingeniería civil, infraestructuras y minería:** permite una inspección periódica de diferentes infraestructuras para poder determinar el estado actual y las posibles variaciones existentes.
- **Forense:** de vital importancia es conocer con detalle y de forma precisa los escenarios de crímenes y accidentes de tráfico.
- **Arqueología y patrimonio:** para la representación tridimensional de forma rápida y precisa de elementos culturales.
- **Monitorización y estudios medioambientales:** análisis de densidad arbórea, medida de perfiles de nubes y aerosoles, ganadería profesional.

### 1.3. Estructura del documento

El trabajo fin de grado (TFG) documento se estructura en 5 secciones, las cuales se exponen a continuación, explicando brevemente su contenido:

1. **Fundamentos teóricos:** a lo largo de este capítulo se estudian las distintas características que componen al dispositivo LIDAR YVT-X002, así como los distintos formatos que se pueden configurar para adquirir los resultados.
2. **Objetivo de los ensayos:** se expone el objetivo primordial del TFG, así como los pasos que se seguirán para conseguirlo.
3. **Descripción de ensayos y resultados:** se detalla la metodología seguida para la realización de los ensayos, simulados y experimentales, para la localización de objetos en entornos 3D.
4. **Filtrado de outliers:** tras los registros proporcionados por el LIDAR se aplican técnicas de filtrado para identificar y localizar el objeto bajo estudio.
5. **Conclusiones y líneas futuras:** se evalúan los resultados finales y se plantean líneas de trabajo derivadas del TFG.

## 2. Fundamentos teóricos

---

Entre los objetivos de este proyecto está el comparar las prestaciones del LIDAR 3D YVT-X002 frente al URG-04LX 2D para así poder verificar las ventajas que se consiguen con el primer dispositivo.

Para ello, se han comparado las hojas de características de ambos sensores, destacando las diferencias en aspectos como rango angular, exactitud, resolución, velocidad de barrido y consumo.

### 2.1. LIDAR 3D YVT-X002

Se trata del dispositivo diseñado por Hokuyo al cual va a estar enfocado el TFG. Mediante un haz de luz emitida con una longitud de onda de 905 nm, escanea un campo semiesférico obteniendo información tanto de la distancia al punto de impacto del entorno como de las componentes angulares (pitch o barrido vertical y yaw o barrido horizontal). Estos valores son medidos mediante el principio conocido como TOF (Time-of-Flight).



*Imagen 2.1.LIDAR YVT-X002*

### 2.1.1. Principio de funcionamiento, medida de distancia

Un sistema TOF envía haces de luz infrarroja modulada a una determinada frecuencia hacia la escena seleccionada, en el caso de que el haz de luz se encuentre con algún ítem en su recorrido, y dentro del alcance del LIDAR, rebotará regresando hasta un receptor del propio dispositivo. Dado que el haz de luz se envía modulado con una determinada frecuencia, la diferencia de fase entre el haz enviado y el recibido, proporciona información del “tiempo de vuelo”. Teniendo en cuenta la velocidad del haz en el medio (próxima a 300.000 km/s), el TOF permite calcular la distancia a la que se encuentran los diferentes objetos de la escena respecto de la fuente emisora.

El dispositivo cuenta con dos elementos principales, el emisor y el receptor.

- **Emisor:** En la actualidad el sistema emisor más empleado son los anillos de luz infrarroja. Los haces de luz que envía están modulados a una frecuencia determinada, habitualmente cercana al infrarrojo, por lo que no son perceptibles por el ojo humano. Esta característica es una gran ventaja para nuestro sensor, ya que la situación lumínica del entorno en el que se realicen las distintas pruebas no influye excesivamente en los resultados obtenidos.

La modulación de onda continua es la más empleada. Gracias a la diferencia de fase entre el haz de luz enviado y el recibido se obtiene la distancia, tal y como se muestra en el esquema de la imagen 2.2.

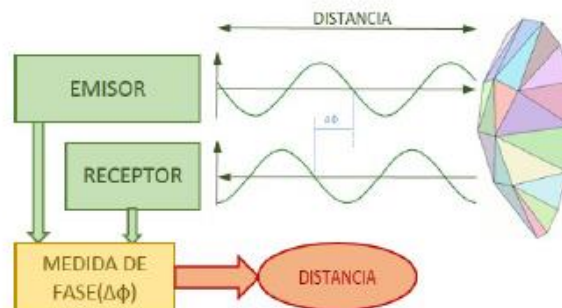


Imagen 2.2. Esquema de emisión y recepción de la onda enviada para la adquisición de imágenes con sistemas de tiempo de vuelo.

- **Receptor:** El haz de luz rebotado tiene una diferencia de fase frente al enviado, gracias a lo cual podemos obtener la distancia a la que se encuentra el objeto. El receptor no solo recibe las componentes de haz rebotados sino también componentes del ambiente que producen ligeros errores en la medida.

Para la obtención de la distancia a la que se encuentra un objeto se emite un haz de luz a una frecuencia conocida ( $f_{mod}$ ). El haz de luz rebota en el ítem, regresando al sensor con un desplazamiento conforme al haz enviado. El análisis del desplazamiento durante un periodo  $T$  permite obtener la distancia a la que se encuentra. Para ello se divide el periodo en 4 desplazamientos en cuadratura, evaluando la diferencia de fase entre los dos haces de luz, emitido y rebotado. El sistema cuenta con receptores formados por transistores MOSFET cuya carga acumulada en cada uno de los 4 periodos indica la diferencia de fase, como se muestra en la imagen 2.3.

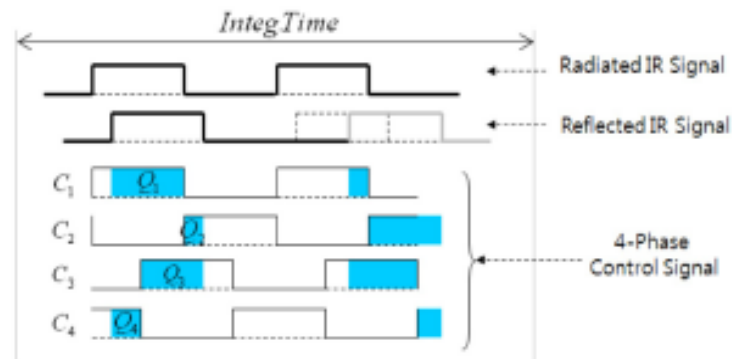


Imagen 2.3. Funcionamiento de los transistores MOSFET durante los 4 periodos de recepción del haz de luz.

En esta imagen se indica el principio de evaluación de la diferencia de fase entre el haz recibido y el enviado, dando lugar a las cargas acumuladas en las 4 señales en cuadratura.

Como indica la ecuación se calcula la diferencia de fase  $\beta$  entre el haz emitido y el reflejado, a partir de las cargas acumuladas  $Q_{1A}$ ,  $Q_{2B}$ ,  $Q_{3C}$ ,  $Q_{4D}$ .

$$\beta = \arctan\left(\frac{Q_{3C} - Q_{4D}}{Q_{1A} - Q_{2B}}\right)$$

Una vez conocida la diferencia de fase se puede obtener la distancia a la que se encuentra el objeto,  $d$ , debida la dependencia que tiene de la velocidad de la luz en el medio, próxima a la del vacío  $C=3 \times 10^8$  m/s y la frecuencia de modulación del rayo emitido  $f_{mod}$ .



$$d = \frac{c}{4\pi f_{mod}} \beta$$

Partiendo de la fórmula anterior se obtiene la distancia máxima a la que se pueden medir objetos,  $d_{MAX}$ . La diferencia de fase entre los haces de luz debe encontrarse entre 0 y  $2\pi$  radianes. Si se intenta obtener la distancia a objetos más lejanos que  $d_{MAX}$ , se obtendrán medidas erróneas. Por tanto:

$$d_{MAX} = \frac{c}{2f_{mod}}$$

De la formula anterior se observa que la distancia máxima medible es inversamente proporcional a la frecuencia moduladora de haz de luz emitido por la fuente de infrarrojos.

A continuación, se expone las principales características que se deben conocer sobre el aparato para un buen uso en las diversas aplicaciones en las que se verá implicado.

### 2.1.2. Restricciones en la detección de objetos

El rango de detección delimita tanto en la altura como la anchura del objeto a detectar, en función de la distancia del sensor.

El LIDAR 3D YVT-X002 permite sensar objetos con un rango angular vertical (pitch) de 40 grados, desde 35 hasta -5 grados respecto al eje de referencia del sensor, tal y como se muestra en la imagen 2.4.

La altura a la que se colocará el emisor-receptor respecto del suelo determina el tamaño del objeto a detectar, para una determinada distancia. Esta es la principal diferencia respecto al LIDAR 2D.

En este proyecto, el LIDAR se ubica a una altura máxima de medio metro.

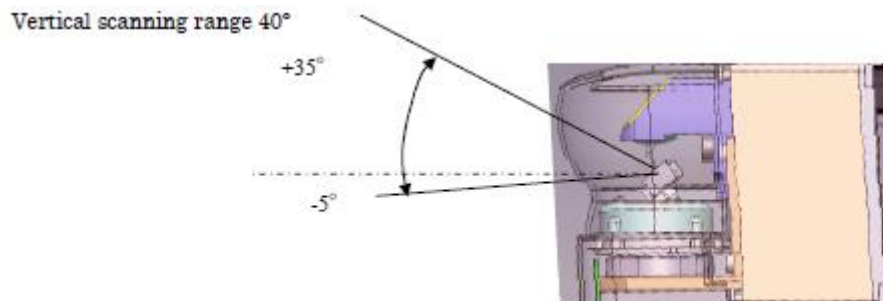


Imagen 2.4. Rango angular vertical para la obtención de la componente z o altura de los ítems.

En cuanto al rango angular horizontal, este dispositivo cuenta con margen angular de 210 grados, como se puede observar en la imagen 2.5, lo cual permite concentrar un alto grado de información sobre el entorno en el que se encuentre.

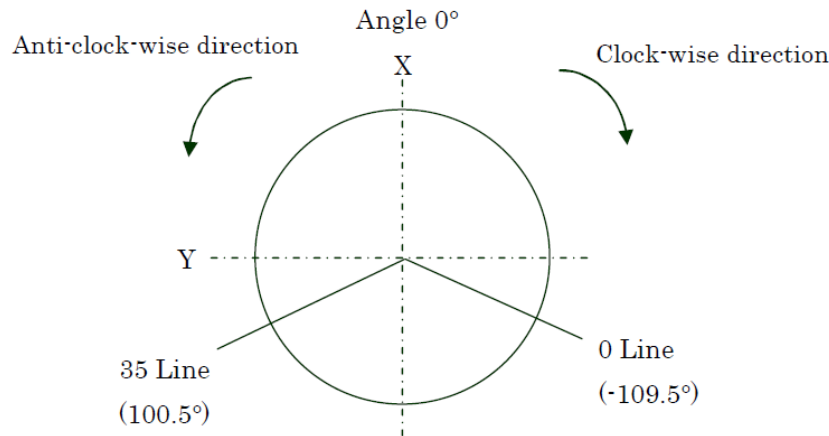


Imagen 2.5. Rango angular horizontal permitido para la captación y el modelado digital del entorno

En la imagen 2.5 se puede observar esta característica estructural, la cual abarca desde los 100.5 grados respecto al eje x, hasta -109.5 grados. Teniendo en cuenta todo ello ya se puede conseguir una idea de todo lo que se puede llegar a englobar en cada una de las pruebas a las que se someta el LIDAR.

### 2.1.3. Parámetros de barrido

Se llama barrido al recorrido que realiza el sensor desde un punto de inicio fijado hasta el punto final definido por las limitaciones angulares explicadas anteriormente, ver imagen 2.6. El fabricante define el barrido realizado como campo (field). El campo resulta de un trayecto que se efectúa de manera sinusoidal. Los posibles puntos de impacto (spot) resultantes del recorrido están caracterizados matemáticamente en función del incremento de pitch y yaw.

Los principales parámetros a considerar en un barrido son:

- **Echo:** Medición única en una dirección específica.
- **Spot:** Se define como un conjunto de ecos en una dirección específica, resultantes de una ejecución dinámica.
- **Line:** Se trata de cada uno de los periodos (trayecto sinusoidal) que forman un campo específico. Cada línea incluye 90 puntos, de los cuales 16 no proporcionarían información, por lo que se dispone de 74 puntos útiles por línea.
- **Field:** El campo definido por el trayecto sinusoidal completo cubriendo todo el rango permitido por la estructura del LIDAR. Cada campo se encuentra formado por 36 líneas, por lo que un único barrido podría contener 2664 puntos, con su información de distancia y ángulo. Sin embargo, el fabricante indica, en un

documento en el que compara los *Parámetros característicos YVT-X002 vs URG 04XL*, que en la práctica se dispone de 2590 puntos.

- **Frame:** Colección de hasta 4 campos dependiendo del modo en el que se configure el dispositivo, como ocurre en el caso de entrelazado.

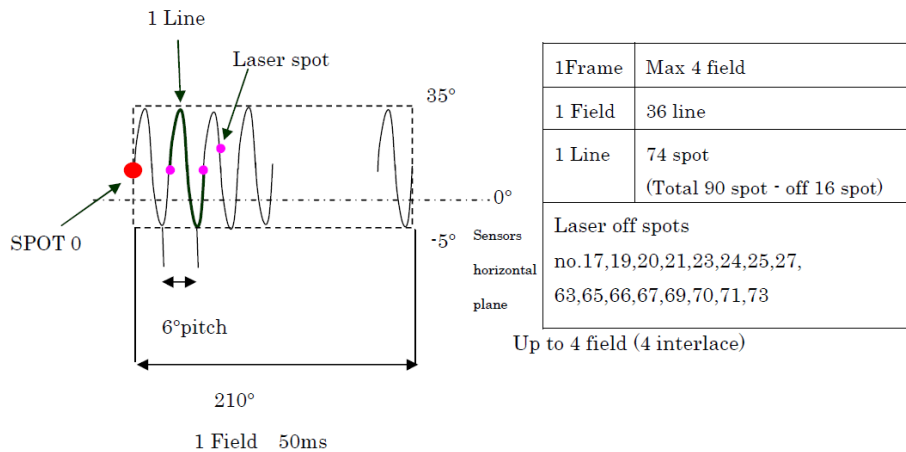


Imagen 2.6. Modo de ejecución de cada barrido y cuantificaciones que lo forman

En la imagen 2.6 se puede observar una tabla de cada uno de los parámetros descritos, los puntos hábiles de cada línea o periodo, así como otros detalles a tener en cuenta, como que cada periodo equivale a 6 grados respecto al movimiento horizontal o que un barrido se realiza a una velocidad de 50 milisegundos (20 barridos/segundo), de manera que se tendrá en cuenta este dato para aquellas aplicaciones donde las mediciones deban realizarse en condiciones dinámicas.

El LIDAR 3D permite dos modos de medida.

- **Non-interlace mode:** Se ejecuta un único barrido. La principal ventaja de este modo es la velocidad a la que se realiza, aunque por inconveniente se tiene la obtención de un número menor de medidas y, por lo tanto, menor conocimiento digital del espacio.
- **Interlace mode:** Se ejecutan cuatro barridos o campos desfasados entre sí, ver imagen 2.7. El desfase entre cada uno de los campos se denomina *interlace pitch*, cuyo valor es de 1.494 grados. Este parámetro conformará el rango de cada uno de los cuatro campos en los que se dividirá el proceso de medición en sí. De esta forma se consigue un mayor número de muestras y más información espacial, pero se requiere un mayor tiempo de ejecución. Se ha de valorar para cada aplicación la conveniencia o no del modo entrelazado de operación.

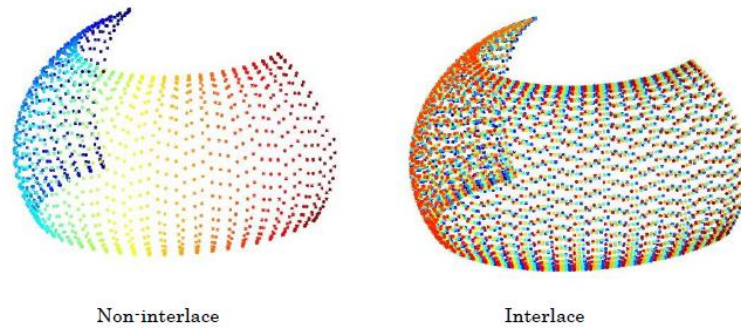


Imagen 2.7. Modos de obtención de medidas

#### 2.1.4. Modelo matemático para la obtención de spots

Para definir la orientación de cada uno de los puntos de los cuales es posible recibir información de distancia, el fabricante proporciona las correspondientes ecuaciones. Este modelo matemático ha permitido diseñar un simulador que proporciona información de la ubicación y tamaño de un objeto. Información que posteriormente se contrasta con ensayos experimentales.

El modelo teórico consta de dos ecuaciones. Una permite calcular la componente angular horizontal  $\theta$  (yaw) de cada spot  $n$ , en modo no entrelazado. La ecuación (1) muestra la variación de esta componente  $\theta$  lineal con el número de spot ( $0 \leq n \leq 89$ ) y con el número de línea ( $0 \leq m \leq 35$ ).

$$\theta = (0.067 * n) + \text{line no}(m) * 6 - 109.5 \quad (1)$$

Para calcular el punto de inicio de cada línea únicamente se requiere la siguiente igualdad.

$$\theta = -109.5 + m * 6, \quad 0 \leq m \leq 35 \quad (2)$$

En cuanto a la componente vertical  $\Phi$  (pitch), esta viene definida por la ecuación (3), con una relación no lineal con el número de spot  $n$ , debido al trazado sinusoidal del haz. Además, el ángulo  $\Phi$  no depende del número de líneas, pues los valores se repiten cada periodo.

$$\Phi = 15 + 20 * \sin(360 * n/90) \quad (3)$$

Los valores concretos de  $\theta$  y  $\Phi$  se indican en la tabla 2.1.

Como ya se comentó, de los 90 spots por línea, algunos de ellos no están hábiles, concretamente los que ocupan las posiciones 17, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 27, 63, 65, 66, 67, 69, 70, 71 y 73.

La componente senoidal del pitch hace que, en la parte superior e inferior, la resolución sea mejor que en la parte central del recorrido.

Con el valor del yaw del último punto, se puede confirmar que un único periodo (línea) tiene un recorrido angular horizontal de 5.936 grados.

Spot no	$\phi$ (degree)	$\theta$ (degree)
0	15	0-109.5
1	16.40	0.067-109.5
2	17.78	0.133-109.5
3	19.16	0.200-109.5
4	20.51	0.268-109.5
...		
16	32.98	1.067-109.5
18	34.02	1.201-109.5
22	34.99	1.467-109.6
26	34.41	1.734-109.5
28	33.54	1.868-109.5
...		
87	10.84	5.829-109.5
88	12.22	5.896-109.5
89	13.60	5.936-109.5

Tabla 2.1. Valores angulares del spot n. Angulo vertical ( $\phi$  pitch) y horizontal ( $\theta$  yaw) de cada punto dentro de cada una de las 36 líneas del campo.

Como se ha comentado anteriormente, las ecuaciones (1-3) para calcular el ángulo de cada punto únicamente es válida para la configuración del dispositivo en modo no entrelazado (un único barrido), pues no se tiene en cuenta el desfase que introduce el modo entrelazado. En la tabla 2.2 se describe cada uno de los rangos angulares en la componente horizontal para los cuatro campos del modo entrelazado.

Para poder añadir este incentivo a las ecuaciones teóricas proporcionadas por el fabricante únicamente hay que cambiar de la ecuación correspondiente al ángulo vertical el desfase de 1,5 grados por cada barrido.

Frame	Field	Line	Start direction
1 Frame	1 Field	0	-109.973
		35	+99.16
	2 Field	0	-105.49
		35	+103.64
	3 Field	0	-106.98
		35	+102.14
	4 Field	0	-108.48
		35	+100.65

Tabla 2.2. Inicio y fin de cada uno de los campos en modo entrelazado.

### 2.1.5. Transformación 3D de coordenadas polares a cartesianas

Una vez comprendida la orientación de cada uno de los puntos obtenidos en la medición, se deberá tratar la información recibida, la cual nos proporciona las distintas distancias a los ítems que forman parte del entorno a analizar. Sabiendo cada uno de estos tres parámetros ( $\theta$ ,  $\Phi$ ,  $d$ ) en coordenadas polares, se puede obtener la correspondiente traslación a coordenadas cartesianas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). La transformación de coordenadas polares a cartesianas en 3D se ejecutará de la siguiente manera:

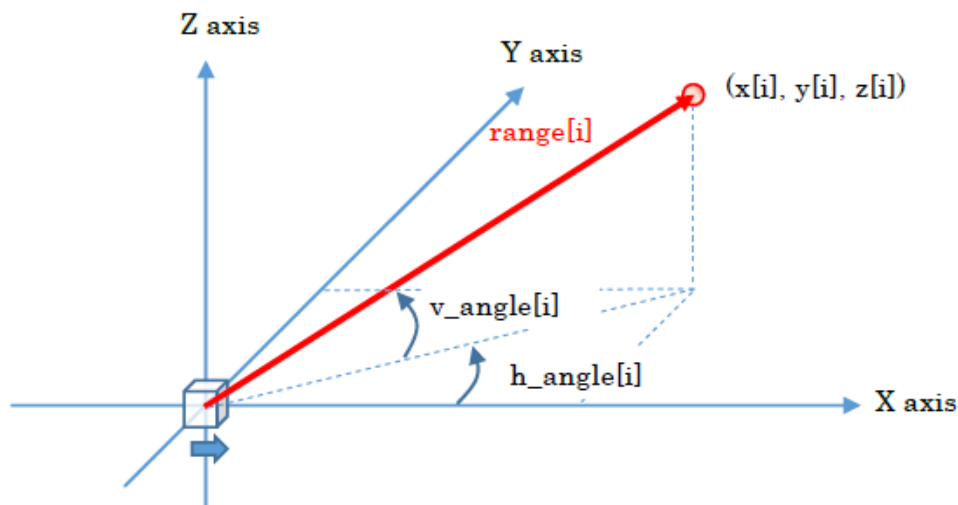


Imagen 2.8. Relación entre las componentes cartesianas y angulares

Siendo  $v\_angle$  la componente angular vertical,  $h\_angle$  la componente horizontal  $\theta$ , y  $range$  la distancia  $d$  del punto  $[i]$  detectado, las componentes cartesianas resultan:

$$x[i] = range[i] * \cos(v\_angle[i]) * \cos(h\_angle[i])$$

$$y[i] = range[i] * \cos(v\_angle[i]) * \sin(h\_angle[i])$$

$$z[i] = range[i] * \sin(v\_angle[i])$$

## 2.1.6. Configuración del registro de medidas

De acuerdo al manual del fabricante, la configuración de medidas se ha de hacer según el protocolo VSSP (*Volumetric Scanning Sensor Protocol*). Este contempla tres tipos de respuesta para cada medida.

- **Ro\_data:** Proporciona únicamente la distancia a la que se encuentran los ítems impactados por el haz láser.
- **Ri\_data:** Además de la distancia proporciona la intensidad del haz recibido. Esto permite discriminar entre distintos objetos ubicados a la misma distancia, en función de su reflectividad o fracción de radiación incidente que es reflejada por el objeto.
- **Ax\_data:** Se trata de una configuración complementaria a las anteriores. En esta se logra obtener datos complementarios sobre sensores auxiliares del dispositivo que proporcionan información sobre el campo magnético, temperatura y aceleración angular.

Además, el protocolo *VSSP Common Header Format* permite identificar si la medida es válida o si se ha producido un error: timeout, overload, system fault, etc Ver tabla 2.3

[VSSP Common Header format]

'V'	'S'	'S'	'P'	C(3) #1	':'	C(3) #2	LF
U16 #3		U16 #4	U32 #5			U32 #6	

#1 Packets type

#2 Status (3 Characters)

Type	Number	Meaning
Normal	" 000 "	Working well
	" 021 "	Internal process overload timeout
	" 022 "	Transmission timeout
	" 099 "	Initializing...
Request command error	" 101 "	Unknown command
	" 102 "	Command structure is mismatch
	" 103 "	Command parameter is mismatch
	" 104 "	Command parameter is out of range
System error	" 201 "	System boot failed
	" 202 "	System fault

#3 Header bytes count = 24

#4 Response message total bytes count (The last byte's position can be inferred from this value)

#5 Time stamp of the request reception

#6 Time stamp of the response

Tabla 2.3. Información sobre errores de medida apartados por el registro de cabecera VSSP Common Header



## 2.1.7. Comandos y parámetros principales

Para poder obtener un mayor grado de información en cada una de las pruebas realizadas, el manual software del YVT-X002 otorga al usuario una lista de parámetros, los cuales se pueden emplear según este crea conveniente para lograr el objetivo propuesto en la aplicación, ver tabla 2.4. Todos ellos se pueden configurar y recibir con las sentencias GET y SET definidas en la tabla 2.5.

PARAMETROS	TIPO	CONTENIDO	
"vend"	RO	Información del vendedor	
"prod"	RO	Información del producto	
"firm"	RO	Versión firmware	
"prot"	RO	Versión del protocolo empleado	
"seri"	RO	Número de serie	
"tblh"	RO	<b>USO</b>	Empleado para calcular el ángulo horizontal de cada punto
		<b>VALOR</b>	El valor de la posición en el intervalo 0 – 65535 corresponde al punto encontrado en el rango de medición
		<b>DATOS</b>	Valor: Caracteres hexadecimales Delimitación realizada por coma. Cuenta: número de puntos en una línea
"tblv"	RO	<b>USO</b>	Usado para calcular el ángulo vertical de cada punto en una línea de datos
		<b>VALOR</b>	Expresado en 16 bits.
		<b>DATOS</b>	Valor: Caracteres hexadecimales. Delimitación realizada por coma. Cuenta: número de puntos en una línea
"data"	RO	Fija el estado encendido/reposo en función de su valor	
"stat"	RO	Estado de los datos a recibir	
"_itl"	RW	<b>ESTADO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
		"0.01"	1 Field/Frame
		"0.02"	2 Field/Frame
		"0.03"	3 Field/Frame
		"0.04"	4 Field/Frame

Tabla 2.4. Parámetros internos configurables del YVT-X002.

COMANDOS	USO
GET	Permite al usuario obtener los parámetros de respuesta establecidos por este.
SET	Fija los valores de los parámetros internos del dispositivo para emplearlos al realizar las mediciones.
DATA	Permite manipular la ejecución de la propia aplicación. Este fijará, no solo el estado del dispositivo ( <i>Start ("1") /Stop ("0")</i> ), también permite configurar el tipo de datos que se quiere obtener en la respuesta.
ERR	Cuando se recibe este comando significa que se ha producido un error durante el lance de la prueba de mediciones.
PNG	Este comando proporciona información sobre el modo en el que se ha conseguido confirmar la respuesta pertinente.

Tabla 2.5. Comandos empleados para configurar el LIDAR 3D YVT-X002

### 2.1.8. Conexionado

En la siguiente imagen se muestran las conexiones del LIDAR 3D YVT-X002 necesarias para ejecutar las distintas aplicaciones. Recuérdese, que el protocolo de comunicación Ethernet es TCP/IP.

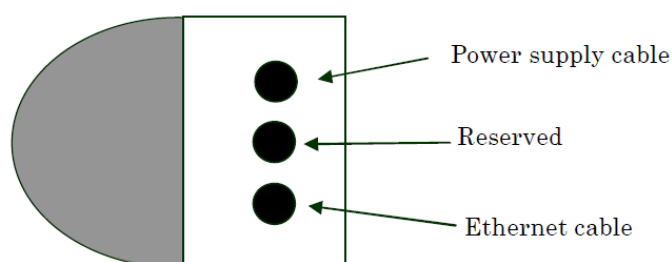


Imagen 2.9. Conexiones físicas del LIDAR 3D YVT-X002

Un apunte de interés es el relativo a la alimentación:

**V+**, cable marrón y conectado a una tensión entre +10 y +30 V.

**V-**, cable azul conectado directamente a masa.

## 2.2. LIDAR URG-04LX

El dispositivo URG-04LX es un sensor láser 2D empleado principalmente para el escaneo y digitalización de áreas limitadas para su posterior análisis.

Entre las muchas características de este aparato, en el manual proporcionado por el fabricante se describen las siguientes:

- La fuente de luz del sensor es el láser infrarrojo cuya longitud de onda es próxima a los 785 nm.
- El área de escaneo, es decir, el recorrido que realiza durante la ejecución de la actividad para la obtención de las distintas mediciones, es un semicírculo de 240 grados con un radio máximo de 4000 mm.
- El ángulo de pitch es fijo de valor 0.36 grados.
- Los resultados vienen definidos por puntos con una resolución determinada. En total se encuentran 683 puntos que conforman un único barrido.
- El principio de medición de la distancia se basa en el TOF, asentado en el cálculo de la diferencia de fase.
- Es posible obtener una medición estable con una influencia mínima del color del objeto y reflectancia.

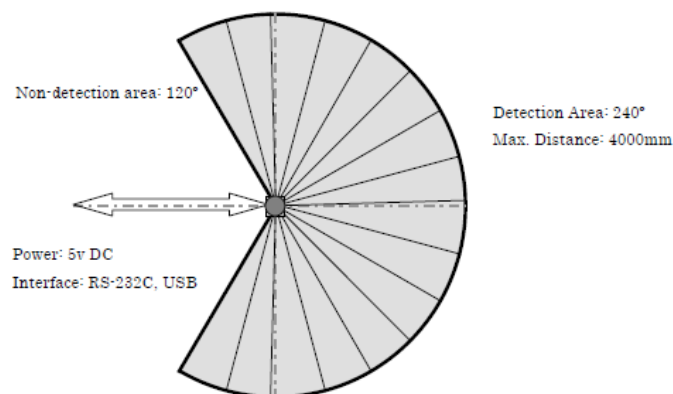


Imagen 2.10. Características principales del dispositivo URG-04XL

### 2.2.1. Resolución de medida

En la imagen 2.11 se muestra la actuación y obtención de los resultados pertinentes. El escáner gira en sentido antihorario para hallar las muestras. El rango de detección (E) es el ángulo máximo de escaneo del sensor. Los puntos de medición se denominan pasos. El paso 0 se sitúa en el primer punto de medición mientras que el paso A es la medición inicial en el rango semicircular. El paso B se encuentra dirigido hacia el frontal del sensor, el cual definirá la mitad del trayecto ejecutado. El paso C sitúa el final del rango de detección. Por último, en el paso D se encuentra el último punto de medición. La resolución angular se define respecto al llamado Slit Division (F).

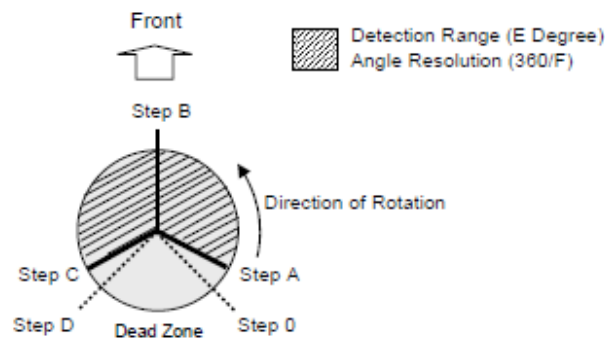


Imagen 2.11. Ejecución de las mediciones realizadas por el URG-04LX

En la tabla 2.6, se muestran algunos de estos parámetros de medición para distintos modelos de sensores:

	URG-04XL	URG-05LX-F01	URG-08LX	UTM.30LX
Step 0	0	0	0	0
Step A	44	44	0	0
Step B	384	384	384	540
Step C	725	725	768	1080
Step D	768	768	768	1080
E	239.77	239.77	270.35	270.35
F	1024	1024	1024	1440

Tabla 2.6. Comparativa de los parámetros de medición entre distintos dispositivos.

### 2.2.2. Codificación de datos

Los datos del sensor están codificados para reducir el tiempo de transmisión entre el host y el propio dispositivo, los cuales son decodificados por este antes de procesarlos. Hay tres tipos de técnicas de codificación dependiendo del tamaño de los datos empleados.

- **Two-Character Encoding:** Se aplica básicamente a datos de menor tamaño, es decir, aquellos que contengan un máximo de 12 bits. La codificación se realiza mediante la separación de datos en 6 bits para posteriormente realizar la conversión a caracteres ASCII.
- **Three-Character Encoding:** Se usa para datos cuya longitud no exceda los 18 bits, siguiendo la base sobre la descomposición en bloques de 6 bits.
- **Four-Character Encoding:** Destinada a codificar los datos que contengan un máximo de 24 bits.

### 2.2.3. Lista de comandos

El manual proporcionado por el fabricante (*Especificaciones del protocolo de comunicación estándar SCIP2.0*), al igual que en el del YVT-X002, incluye una lista principal de comandos con los cuales se permite controlar las distintas opciones para la configuración y ejecución de las aplicaciones del propio URG-04LX. A continuación, se muestran todos ellos:

- **Comando MDMS:** Se trata del comando principal para la adquisición de datos. El láser se enciende antes de la medición y se apaga después de completar el número de exploraciones.
- **Comando GDGS:** Siempre que el sensor recibe este comando, se suministran los últimos datos de medición al host.
- **Comando BM:** Se encarga de encender el láser del sensor permitiendo la medición. Cuando el sensor esta encendido o cambiado a SCIP2.0 por comando, el láser esta inicialmente desactivado por defecto. En este estado el sensor no puede realizar la medición.
- **Comando QT:** Este comando permite la desactivación del láser después de que se hayan realizado las mediciones pertinentes.
- **Comando RS:** Se emplea para restablecer todos los ajustes que fueron cambiados después de que el sensor fuese encendido. Este proceso apaga el láser, establece la velocidad del motor y la tasa de bits de nuevo al valor predeterminado, así como el temporizador interno del sensor.
- **Comando TM:** Este comando se utilizar para ajustar el host y el tiempo del sensor. El sensor debe cambiarse al modo de ajuste antes de solicitar su tiempo. El envío de comandos múltiples TM con diferentes longitudes de cadenas y la comparación del tiempo permiten estimar el promedio del tiempo de transición de datos entre el sensor y el host.

- **Comando SS:** Este comando cambiará la velocidad binaria de comunicación del sensor cuando se conecte con RS232C.
- **Comando CR:** Empleado para ajustar la velocidad del motor del dispositivo. Si en una única aplicación se utilizan varios sensores en un mismo entorno, se puede hacer que sus motores funcionen de manera simultánea evitando así interferencias de luz.
- **Comando HS:** Este comando cambia entre los modos de alta sensibilidad y sensibilidad normal, es decir, la capacidad de detección del sensor aumenta aproximadamente un 20% en el modo de alta sensibilidad. Sin embargo, esto puede dar lugar a errores de medición.
- **Comando DB:** Este parámetro simula un mal funcionamiento del sensor.
- **Comando VV:** Si se emplea este comando, el sensor transmite detalles de la versión tales como el número de serie, versión de firmware, etc.
- **Comando PP:** Comando que transmite cada una de las especificaciones del sensor.
- **Comando II:** El sensor envía su estado de funcionamiento.

## 2.3. Comparación YVT-X002 vs URG-04LX

En este apartado se resume la comparación entre las características de los dos dispositivos anteriormente descritos, a fin de evaluar los pros y los contras del nuevo sensor 3D adquirido por el grupo Geintra.

	LIDAR 3D YVT-X002	LIDAR 2D URG-04LX
Haz de luz (Longitud de onda del diodo laser)	905 nm	785 nm
Tensión de alimentación	10-30 V	5 V DC
Consumo	700 mA para 12 V 350 mA para 24 V	500 mA
Resolución	2590 puntos (modo no entrelazado) 10360 puntos (modo entrelazado)	0.36 grados
Rango de detección	0.3 – 8 m (papel negro) 0.3 – 25 m (papel blanco) 0.3 – 50 m (retro reflector)	60 mm – 4.095 m
Exactitud	50 mm (papel blanco hasta 8 m) 100 mm (papel blanco hasta 20 m)	20 – 1000 mm: 10 mm 1000 – 4000 mm: 1% de la medida
Rango angular horizontal	210 grados	240 grados
Rango angular vertical	40 grados	-
Interfaz	Ethernet (TCP/IP)	RS-232C, USB
Velocidad horizontal	50 msec/scan (20Hz)	100 msec/scan (10Hz)
Velocidad vertical	1200 Hz	-
Peso	750 gr	160 gr
Dimensiones	70mm x 106mm x 95mm	50mm x 50mm x 70 mm
Nivel de ruido	59 dB	25 dB

Tabla 2.7. Comparación de parámetros principales.

Como se muestra en la tabla 2.7 son importantes las diferencias entre ambos sensores. La principal ventaja del YVT-X002 es la de proporcionar información en 3 dimensiones.

De los demás parámetros se percibe la diferencia en la longitud de onda, aunque se ha de decir que dichos valores no influyen mucho, ya que, si esta característica se mueve en esos rangos, el haz seguirá siendo indetectable para el ojo humano.

La **resolución** de un sensor es el menor cambio en la magnitud de entrada que se aprecia en la magnitud de salida. Este parámetro también viene preestablecido por los fabricantes para cada uno de los dispositivos. En el caso del YVT-X002 dicha resolución nos la dan en puntos obtenidos (2590) por cada barrido ejecutado, y al ser lineal el incremento angular de la componente horizontal resulta una resolución de 0.067 grados. En cambio, en el URG-04XL, la resolución angular es de 0.36 grados y la lineal de 1 mm.

Otro aspecto clave, especialmente en aplicaciones dinámicas, es la **velocidad de barrido**, y el YVT-X002 duplica al URG-04XL.

El rango de alimentaciones es mayor en el LIDAR 3D lo que proporciona un mayor rango de distancia de detección (relación 25:4 aproximadamente); pero también un mayor consumo lo que puede suponer un problema para aplicaciones en las que vaya embarcado.

En cuanto a la interfaz de conexión, el LIDAR 3D emplea Ethernet con protocolo de comunicación TCP/IP, definido por una descomposición en capas, cuyos servicios y funciones son variables con cada tipo de red, mientras que el sensor URG-04LX trabaja con la interfaz denominada como RS-232.

Por último, hay que tener en cuenta que la opción 3D es más voluminosa, pesada y ruidosa.



## 3. Objetivo y descripción de los ensayos

---

### 3.1. Objetivos principales

Una vez comprendidas las características principales del sensor, los siguientes capítulos se centran en su aplicación. El objetivo principal de los ensayos realizados es determinar la distancia y el área de un objeto conocido plano dispuesto verticalmente y ubicado dentro del rango de detección del LIDAR. Es importante tener en cuenta una de las restricciones propuestas para su logro:

La aplicación diseñada realiza todo el análisis requerido a partir de los datos recibidos por el LIDAR.

Para ello se dispone de los resultados tomados, del entorno sin objeto y con objeto. Realizando un análisis previo sobre este archivo, se observa que es imposible calcular los parámetros objetivo sin efectuar antes un filtrado. Dicho filtrado será descrito por cualquiera de las opciones que se muestran más adelante (ver capítulo 5). Es necesario, una vez conseguido, calcular también el número de puntos pertenecientes al ítem, para así, poder realizar una comparación entre lo hallado de manera experimental y los resultados de las simulaciones.

A continuación, la imagen 3.1 y la tabla 3.1 describen todos los ensayos realizados con el fin de comprobar el funcionamiento del sensor comparando los resultados con los parámetros obtenidos en las simulaciones.

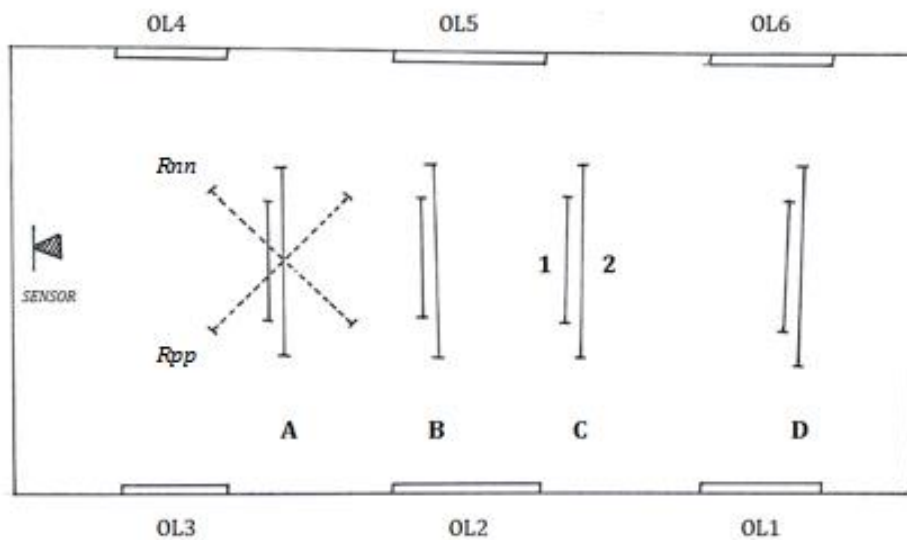


Imagen 3.1. Esquema de los ensayos a realizar

ENSAYOS REALIZADOS EN FUNCION DE LA DISTANCIA	
A	Ensayos realizados a 5 metros
B	Ensayos realizados a 7,5 metros
C	Ensayos realizados a 10 metros
D	Ensayos realizados a 15 metros
OBJETO ESCOGIDO	
1	1 plancha blanca (1x0.6 m)
2	2 planchas blancas unidas (1x1.2 m)
ENSAYOS CON ROTACION INCLUIDA	
Rpp	Rotación a +45 grados
Rnn	Rotación a -45 grados

Tabla 3.1. Condiciones de los ensayos.

## 3.2. Descripción de ensayos

### 3.2.1. Objeto a detectar

Los objetos escogidos para el estudio práctico han sido unas planchas fabricadas de poliestireno expandido (poliespán) cuyas dimensiones son 1 metro de alto por 0.6 metros de ancho. Este tipo de elemento permite realizar su análisis y captación mediante la definición de planos en el entorno (paredes, techo y suelo) obteniendo un vector normal y las ecuaciones de dicho plano, para así, poder tenerlo definido en el espacio.

Este procedimiento debería cambiar si se emplea ítems cilíndricos o esféricos, aunque la obtención de los planos de las diferentes paredes siempre será útil para su posterior eliminación, reduciendo el análisis a un número menor de puntos.



*Imagen 3.2. Objeto utilizado en los ensayos*

### 3.2.2. Entorno experimental

El espacio donde se han desempeñado las distintas pruebas se encuentra en el pasillo del laboratorio OL1-OL6 de la EPS. Este cuenta con una profundidad de 20 metros, por lo que cubre el alcance previsto de 10 metros para el área de trabajo.

Esta necesidad es producto de los cálculos teóricos y las simulaciones ejecutadas. Un objeto puede ser definido de forma correcta por el LIDAR con un mínimo de 30 puntos, asumiendo una lámina cuadrada de 1 metro de lado, situada a 10 metros, se alcanzarían 46 puntos debido a la resolución angular del sensor, mientras que, si se encuentra a 15 metros, se contemplan únicamente 23 puntos, lo que reduce significativamente la certeza en su identificación.

Aun teniendo en cuenta lo expuesto también se han ejecutado pruebas a 15 metros de distancia, con la finalidad de exponer mediante resultados dicho problema sobre la resolución angular del dispositivo.

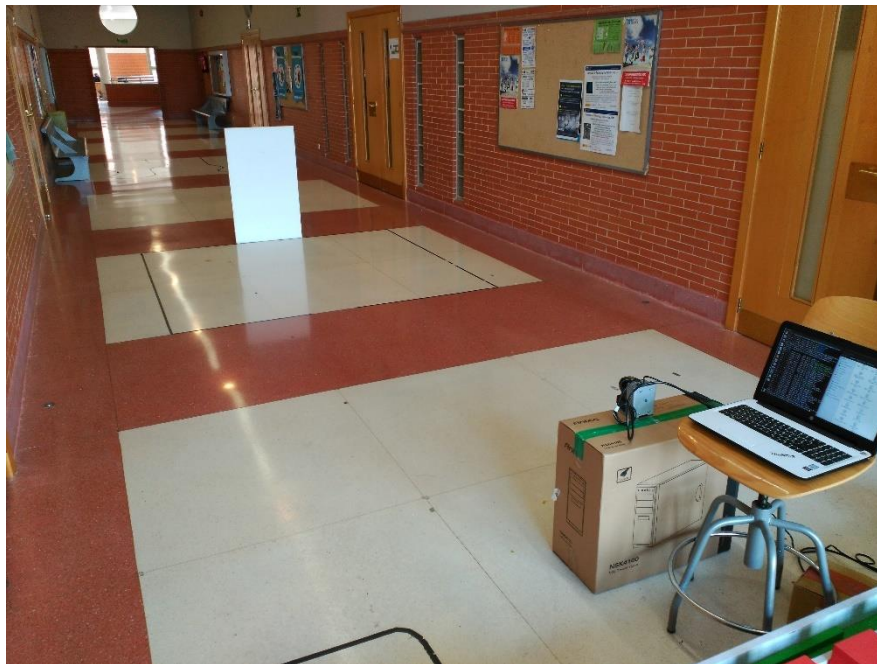


*Imagen 3.3. Entorno experimental*

### 3.2.3. Tipos de ensayos elaborados

Para abordar el estudio y manejo del LIDAR YVT-X002 se han analizado todos sus rasgos y parámetros internos. Se han realizado diferentes ensayos con dicho fin y, por ello, se tendrá que tener en cuenta diferentes factores, entre los que destacan la distancia a la que se sitúe el objeto conocido, su tamaño junto con su forma geométrica, el material del que se compone, del cual es dependiente la intensidad captada del haz de luz rebotado, al igual que las condiciones del entorno escogido, iluminación, temperatura... (aunque estas serán irrelevantes para la aplicación propuesta).

El trabajo experimental realizado se divide en dos grupos principales de tres ensayos cada uno, según el tamaño del material a captar. El primer grupo consta de una única lamina de poliespán cuyas dimensiones han sido definidas anteriormente, siendo ubicada a cuatro distancias diferentes (5, 7.5, 10 y 15 metros). El segundo grupo emplea dos de estas planchas colocadas verticalmente, de modo que se dispone de un área mucho mayor (el doble), pudiendo abarcar una mayor distancia para su correcta detección. De igual manera, estas se emplazarán a las mismas distancias que los tres ensayos del grupo anterior.



*Imagen 3.4. Ensayos con una plancha a distintas distancias*



*Imagen 3.5. Ensayos con cambio de tamaño del objeto a distintas distancias*

En todas las pruebas descritas el objeto empleado se ubica de frente al dispositivo, por lo que no se encuentra ningún problema a la hora de calcular sus dimensiones. Ahora bien, si el objeto se ubica con una cierta rotación sobre su eje vertical, es decir, el eje Z, al visualizar el ensayo respecto al plano YZ (plano frontal) se observa que el cálculo de la altura sería correcto, pero se estaría cometiendo un error en la obtención de la anchura, por lo que se debe realizar una cierta corrección rotando el elemento hasta que se sitúe perpendicular al haz de luz del LIDAR.

Debido a que este contexto podría darse en diversos casos, se han ideado 2 ensayos más, en los cuales se sitúa dos planchas unidas a 5 metros desde su centro hasta el sensor con un cierto giro. En la primera de las pruebas se rotan las láminas sobre el eje vertical 45 grados, a diferencia de la segunda, en la cual se realiza una rotación de 315, es decir, -45 grados.

Posteriormente se explicará la manera de obtener el valor de dicho giro para calcular correctamente la altura y anchura del objeto. En las imágenes 4.5 y 4.6 se observan las condiciones en las que se han realizado dichas pruebas con el fin de comprobar la influencia de las rotaciones en los análisis y los resultados conseguidos.





*Imagen 3.6. Ensayos con cambio de tamaño del objeto a distintas distancias y ángulo de 45°*



*Imagen 3.7. Ensayos con rotación a -45 grados*

### 3.2.4. Material empleado

El equipo destinado para las actividades asignadas lo componen los siguientes elementos:

- Dispositivo LIDAR 3D YVT-X002.
- Fuente de alimentación y prolongador.
- Ordenador portátil HP DESKTOP-HJTT6T6 empleado para lanzar y controlar los procesos informáticos.
- Dos planchas de poliespán, cuyas dimensiones son 1x0.6 m, destinadas a ser el objeto principal.
- Metro y soporte del sistema.

Para poder realizar los ensayos es necesario seguir ciertas instrucciones con el fin de alimentar correctamente el dispositivo y adecuar la comunicación configurando los parámetros principales de la conexión.

Como se ha comentado en el capítulo 2 sobre los fundamentos teóricos del LIDAR, este debe ser alimentado entre 10 y 30 voltios, por lo que se ha escogido una alimentación para las pruebas de 24 voltios. De la misma forma, la dirección IP del aparato viene especificada en el manual.

Alimentación	24 V
Dirección IP	192.168.0.10

Tabla 3.2. Valores de la alimentación y la dirección IP.

Para la configuración de la conexión cableada, únicamente hay que seguir la tabla 4.2 sobre como editar dicho vínculo.

Ajustes de IPv4		
Dirección	Macara de red	Puerta de enlace
192.168.0.11	24	192.168.0.1

Tabla 3.3. Ajustes necesarios sobre la IPv4.



Seguidamente, en la imagen 3.8, se muestra el montaje del sistema, así como el equipo que se ha empleado en las distintas pruebas.

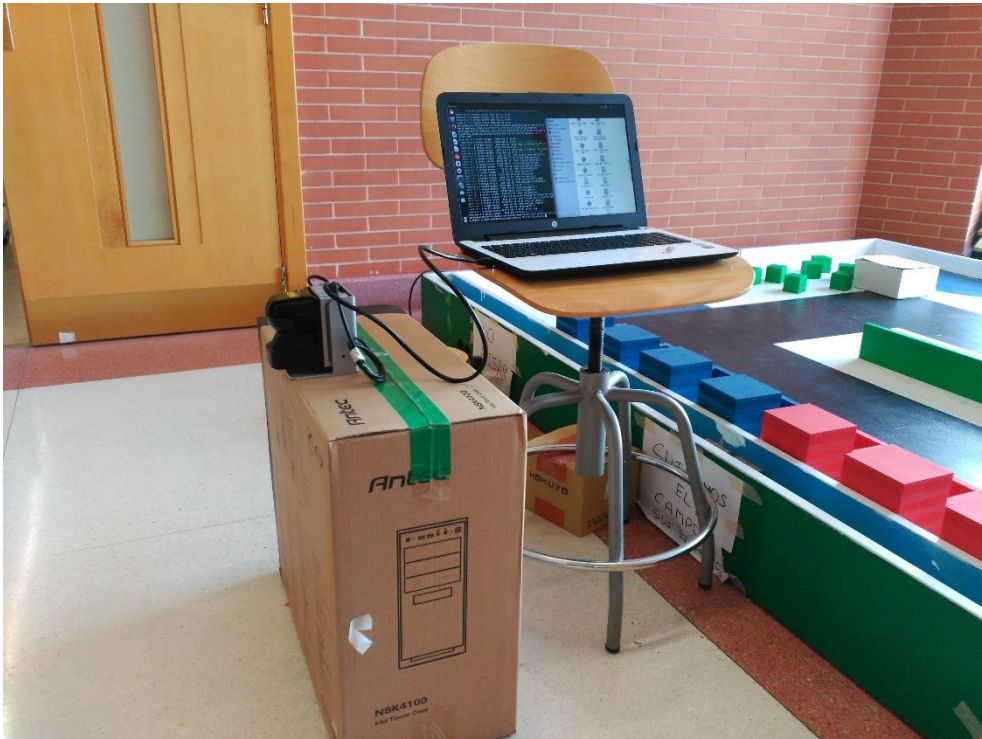


Imagen 3.8. Sistema principal

### 3.2.5. Cálculo de las bandas de error

Todos los cálculos realizados sobre las dimensiones del objeto que se muestran a lo largo de la memoria se encuentran dentro de un margen de error definido por las resoluciones angulares, obtenidas con ayuda de las ecuaciones del apartado 2.1.4, para un valor de  $n=1$  y  $m=0$ .

Resolución angular horizontal  $\Delta\theta = 0.067 \text{ grados}$

Resolución angular vertical  $\Delta\phi = 1.395 \text{ grados}$

A continuación, se muestra el procedimiento de cálculo de cada una de las bandas de error, sabiendo a que distancia se encuentra el objeto,  $d_{objeto}$ . Hay que tener en cuenta que, para el cálculo de la desviación respecto de la altura se emplea la resolución vertical, y para la obtención de la desviación de la anchura, la resolución horizontal.

$$\sigma_{anchura} = d_{objeto} * \frac{\Delta\theta * \pi}{180} \qquad \sigma_{altura} = d_{objeto} * \frac{\Delta\phi * \pi}{180}$$

Este procedimiento sirve para hallar las desviaciones correspondientes a altura y anchura. Una vez se quiera obtener la desviación estándar del área del objeto, se acude a la ley de propagación de incertidumbres, método que permite calcular la desviación estándar del resultado de una medida mediante la combinación de las diferentes fuentes de incertidumbre.

$$\begin{array}{lll} \text{Anchura y altura} & m1 = r1 \pm \sigma1 & m2 = r2 \pm \sigma2 \\ \text{Área a calcular} & m3 = r3 \pm \sigma3 & \end{array}$$

$$r3 = r1 * r2$$

$$\sigma3 = \sqrt{\left(\frac{dr3}{dr1} * \sigma1\right)^2 + \left(\frac{dr3}{dr2} * \sigma2\right)^2}$$

Otros factores importantes a tener en cuenta, los cuales ayudan a realizar una correcta comparación entre valores experimentales y teóricos son el error absoluto y el error relativo.

El error absoluto,  $\epsilon_a$ , es un indicador de la imprecisión que tiene una determinada medida. Este es la diferencia entre el valor real característico y el valor que se ha obtenido en la medición, cuyas unidades son las mismas que las de la medida.

$$\epsilon_a = X_{real} - X_{medido}$$

El error relativo,  $\epsilon_r$ , es el cociente entre el error absoluto y el valor real, obteniendo como resultado un porcentaje del error.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_a}{X_{real}} * 100 \quad (\%)$$

## 4. Resultados

---

A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación y experimentación con el LIDAR 3D.

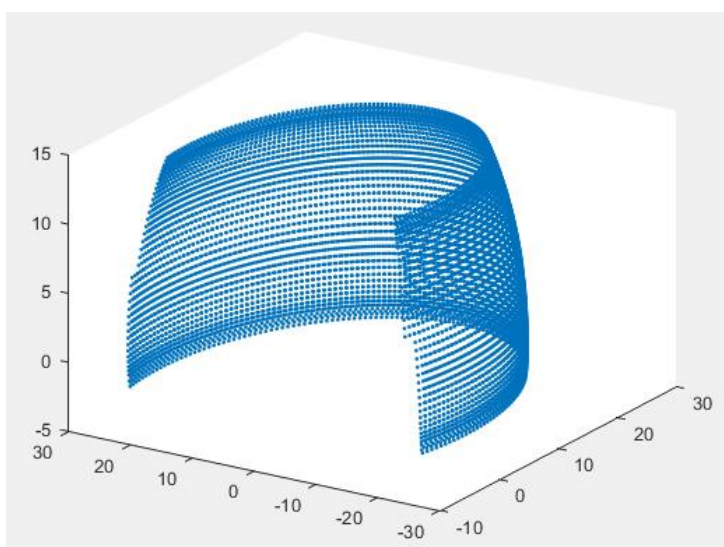
### 4.1. Simulación

Para validar el comportamiento del LIDAR 3D antes de su implementación en un escenario real, se ha realizado una aplicación software que simule cada una de las pruebas, consiguiendo obtener de esta forma los resultados teóricos que deberían darse en la experimentación.

#### 4.1.1. Contenido

El simulador YVT\_X002 ha sido implementado manejando algunas de las funcionalidades de Matlab, una herramienta software que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas que van a ser empleadas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Este simulador está basado principalmente en las ecuaciones (1-3) de la sección 2.1.4 y descritas en el manual del fabricante. El objetivo principal es calcular tanto las dimensiones del ítem como el número de puntos que lo componen. Si se define al programa la distancia límite que alcanza el dispositivo, es posible visualizar el rango que se cubre según la trayectoria y los parámetros comentados en el capítulo 2 sobre los fundamentos teóricos del LIDAR.



*Grafica 4.1. Simulación del rango de detección del YVT-X002.*

Esta aplicación tiene múltiples opciones a la hora de concretar el ensayo que se va a ejecutar. Primero se elige el modo de ejecución de barridos (no entrelazado o entrelazado) y el propio simulador emplea los límites indicados en la tabla 2.2 si la elección ha sido la segunda opción. En el primer modo no es necesario realizar 4 barridos ya que la información se repetiría debido a que los distintos recorridos se encuentran en fase.

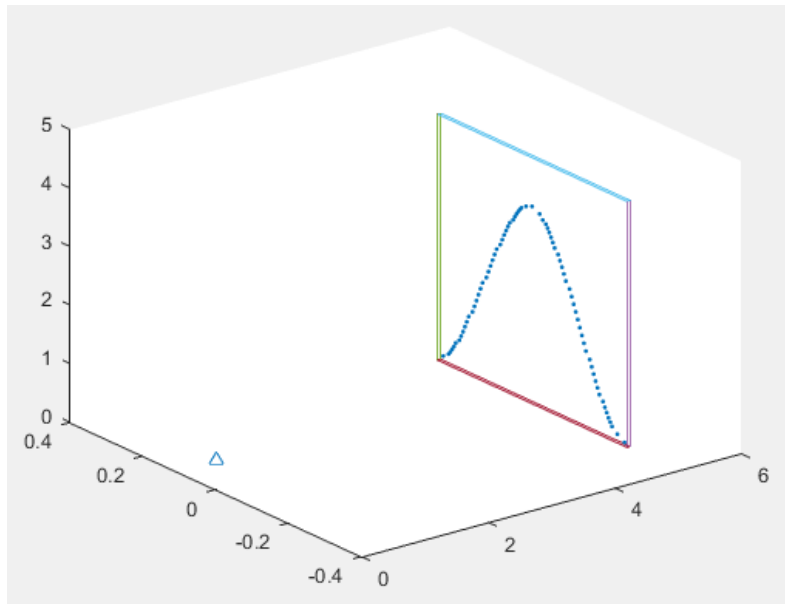
Para poder realizar la simulación, es necesario introducir por teclado varios parámetros imprescindibles. Será definida la distancia a la que se encuentra el objeto, el cual para la aplicación de este TFG siempre es planar, así como sus dimensiones, la anchura y la altura de este, todo ello en metros. El propio programa te dará la altura máxima que puede tener para ser detectado a esa distancia.

Un ejemplo de ello sería si el objeto se situase a 5 metros. Una vez introducida dicha distancia el mensaje por pantalla comunica que la lámina no puede tener más de 3.3 metros de altura. Si el objetivo es ver un único periodo, es decir, una línea, el tamaño correspondiente a este serían 4.2 metros de altura (a partir de la altura límite descrita anteriormente su valor es indiferente) y 0.52 metros de anchura configurando la simulación en modo no entrelazado, tal y como muestra la gráfica 4.2.

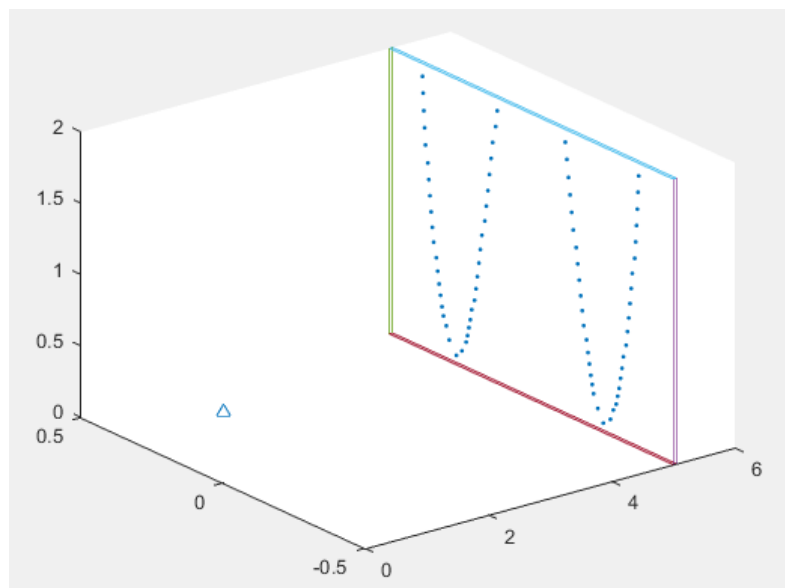
Otra de las características principales del ensayo a introducir en la simulación es la altura a la que se situó el sensor respecto del suelo. Este dato ligado al rango de detección vertical fijado entre 35 grados y -5 grados permite obtener más información del objeto según a la distancia definida. Si se toma como ejemplo una plancha de 2 metros de alto y 1 metro de ancho a una distancia de 5 metros, los resultados cuando se ubica el dispositivo tanto a 0.5 metros como a 1 metro se muestran a en las gráficas 4.3 y 4.4.

Las dimensiones alcanzadas en el primer caso son 1.845 metros de altura y 0.7619 metros de anchura con un total de 80 puntos impactados, mientras que en el segundo ejemplo las características de la plancha calculadas son 1.3738 metros de altura y 0.74 metros de anchura, el número de puntos alcanzados es igual a 64. La diferencia obtenida en el caso de la altura de la plancha es notable mientras que para la anchura los datos son similares. Todo ello es debido a que el rango del sensor debe cubrir la totalidad del objeto para así conseguir definir el área del ítem correctamente. En la simulación de la figura 4.5 se observa que ocurre si el sensor se encuentra a 0.5 metros sobre el suelo y su configuración es en modo entrelazado para un objeto con dimensiones de 1x0.5 metros.

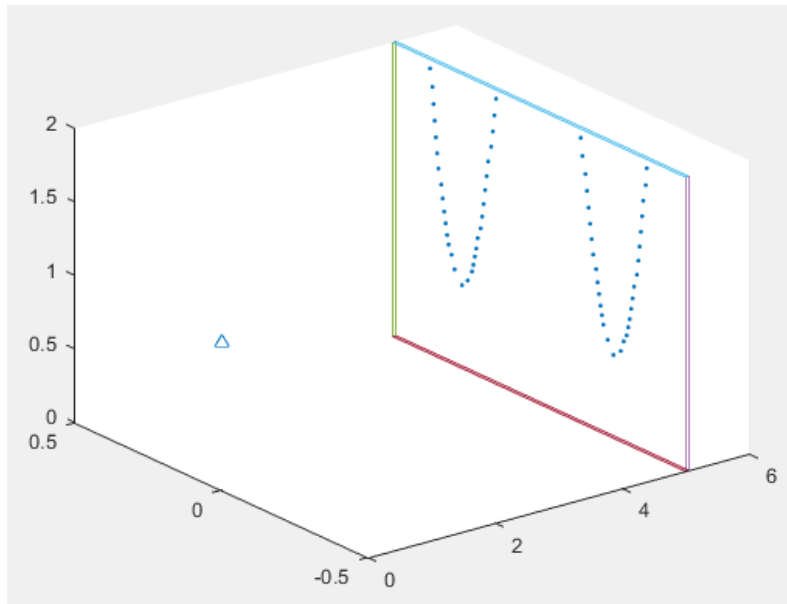
Los resultados logrados son 0.923 metros de altura y 0.469 metros de anchura, y aunque se sigue produciendo un error, es cierto que las dimensiones teóricas se asemejan más a las reales, pudiendo diferenciar dicho ítem en el entorno para, posteriormente, filtrarlo e incluso, para proyectos futuros, llegar a hacer un seguimiento dinámico.



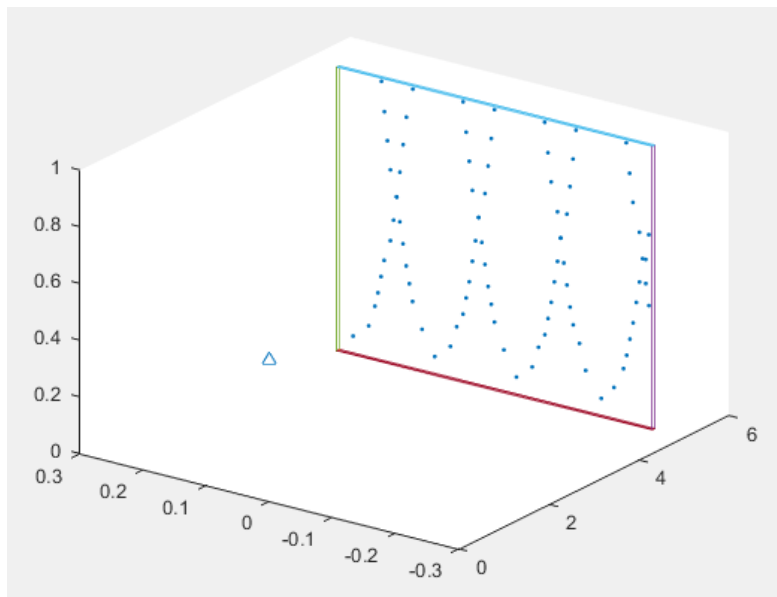
Grafica 4.2. Obtención de una línea de un único barrido en un objeto.



Grafica 4.3. LIDAR colocado a 0.5 metros de altura.



Grafica 4.4. LIDAR colocado a 1 metro de altura.

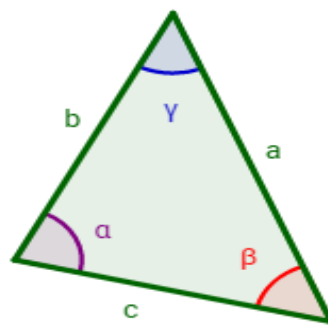


Grafica 4.5. Dimensionado en modo entrelazado.

Por otra parte, el simulador cuenta con la opción de realizar ensayos teóricos ubicando el objeto escogido a una cierta distancia y rotándolo respecto a su eje vertical Z. Si se escoge esta opción, es preciso definir únicamente la distancia al extremo más cercano del objeto. Hay que tener en cuenta que no debe tomar un valor cualquiera, sino que se encontrará dentro de un rango concreto respecto a la distancia al punto central de la plancha, es decir, si una plancha de 1x0.6 metros (dimensiones del objeto del ensayo real) se encuentra a una distancia de 5 metros, el extremo más cercano debe situarse a un mínimo de 4.7 metros, por lo que el rango permitido estaría entre 4.7:5.3 metros.

Todos los cálculos empleados para efectuar estos procesos se basan en las relaciones trigonométricas básicas y en el teorema del coseno, ver imagen 4.1. Si se sitúa la vista del ensayo en el plano XY (visto desde arriba), trazando la distancia al punto más alejado del objeto (vértice  $\beta$ ), al punto más cercano (vértice  $\alpha$ ) y con ayuda del valor de la anchura del ítem se puede determinar con facilidad cada uno de los ángulos.

Trazando una línea perpendicular al eje X, correspondiente a la profundidad del pasillo, que pase por el vértice  $\alpha$ , formando a su vez un triángulo rectángulo junto con el vértice  $\beta$ , se obtiene el ángulo de rotación de la plancha  $\theta$  respecto del ángulo  $\alpha$ .



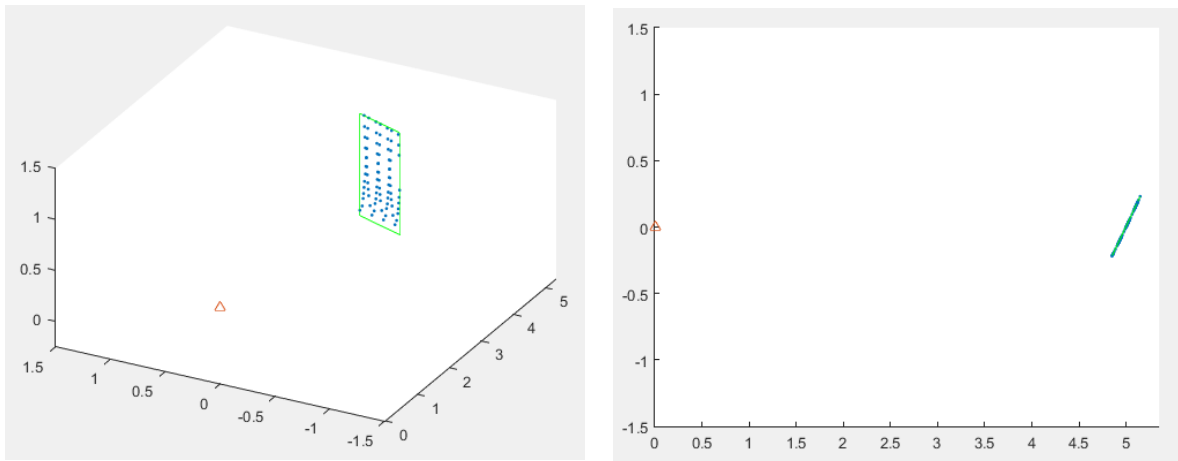
$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos(\alpha)$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2 \cdot a \cdot c \cdot \cos(\beta)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(\gamma)$$

Imagen 4.1. Teorema del coseno

A continuación, se observa en la gráfica 4.6 la ejecución de una simulación con una lámina situada a 5 metros cuyas dimensiones son las del objeto real del ensayo experimental, configurando el LIDAR en modo entrelazado y colocándolo a 0.5 metros de altura sobre el suelo. El rango de rotación teórico calculado se halla entre 4.7 y 5.3 metros, los cuales son los mismos valores del ejemplo anterior lógicamente, por lo que la elección será de 4.8 metros, por ejemplo.



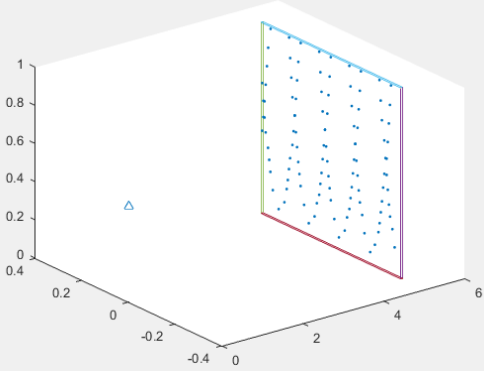
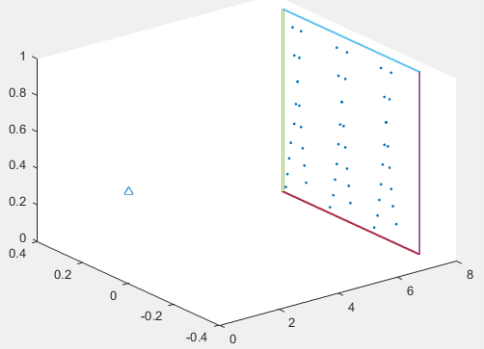
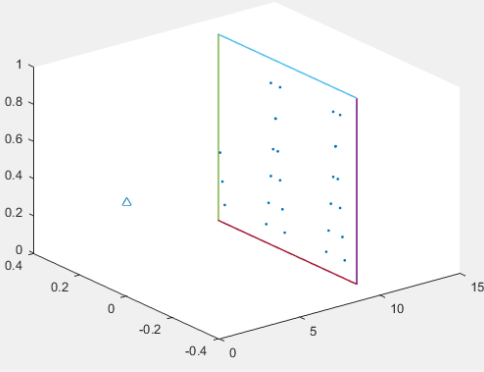
*Grafica 4.6. Ensayo simulado: (a) con rotación sobre el eje Z del objeto, (b) vista desde el plano XY*

Los resultados conseguidos son los siguientes: se han adquirido 82 puntos del ítem, el cual tiene unas dimensiones calculadas de 0.9483 metros de altura y 0.5925 metros de anchura. El ángulo de rotación es igual a 41.82 grados.



### 4.1.2. Resultados teóricos

En este apartado se contempla cada una de las simulaciones realizadas para los distintos ensayos propuestos. Como se ha explicado anteriormente, en el TFG se plantean 6 ensayos diferentes, agrupados en dos bloques de tres pruebas cada uno según el tamaño del material empleado. En la tabla 4.1 se muestra cada una de las simulaciones de los ensayos definidos para la localización y modelado digital de una única plancha de 1mx0.6m, junto con los parámetros calculados, la vista del objeto y los puntos que lo componen a una distancia determinada. La altura del dispositivo se encuentra determinada a 0.5 metros.

Distancia del objeto	Parámetros resultantes	Gráfica
5 metros	<p><b>Altura:</b> <math>0.9237 \pm 0.1217</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.0763 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 7.63 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>0.5690 \pm 5.85 \times 10^{-3}</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.031 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 5.16 %</p> <p><b>Número de puntos:</b> 111</p>	
7.5 metros	<p><b>Altura:</b> <math>0.892 \pm 0.18</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.108 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 10.8 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>0.4866 \pm 8.77 \times 10^{-3}</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.1134 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 18.9 %</p> <p><b>Número de puntos:</b> 51</p>	
10 metros	<p><b>Altura:</b> <math>0.7698 \pm 0.24</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.23 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 23 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>0.5397 \pm 0.012</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.0603 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 10.05 %</p> <p><b>Número de puntos:</b> 27</p>	

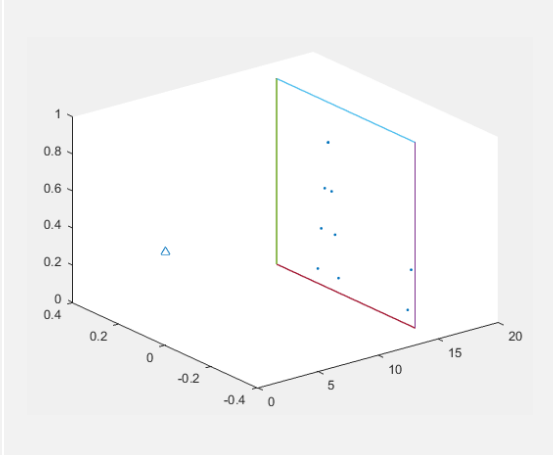
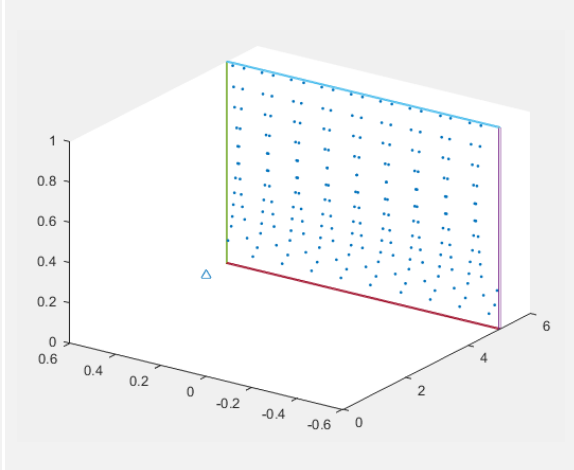
<b>15 metros</b>	<b>Altura:</b> $0.7049 \pm 0.365$ m	
	<b>Error absoluto:</b> 0.2951 m	
	<b>Error relativo:</b> 29.51 %	
	<b>Anchura:</b> $0.4049 \pm 0.0175$ m	
	<b>Error absoluto:</b> 0.1951 m	
	<b>Error relativo:</b> 32.51 %	
<b>Número de puntos:</b> 10		

Tabla 4.1. Resultados de la simulación de los ensayos con una única lamina.

En la tabla 4.2 se muestran las simulaciones de los ensayos realizados cambiando las dimensiones del objeto. En este tipo de pruebas experimentales se ha recurrido a dos planchas de 1m x 0.6m, formando un objeto de 1m x 1.2m.

Distancia del objeto	Parámetros resultantes	Gráfica
<b>5 metros</b>	<b>Altura:</b> $0.9237 \pm 0.1217$ metros	
	<b>Error absoluto:</b> 0.0763 m	
	<b>Error relativo:</b> 7.63 %	
	<b>Anchura:</b> $1.1843 \pm 5.85 \times 10^{-3}$ m	
	<b>Error absoluto:</b> 0.0157 m	
	<b>Error relativo:</b> 1.31 %	
<b>Número de puntos:</b> 218		

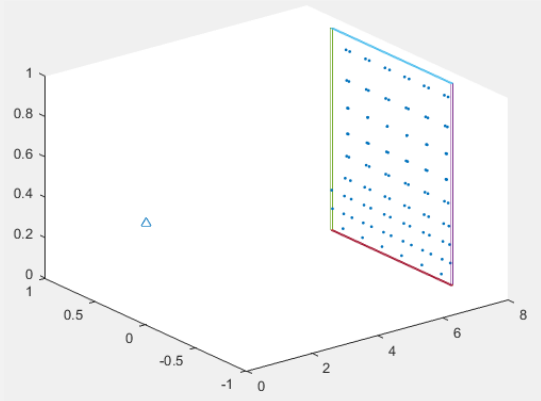
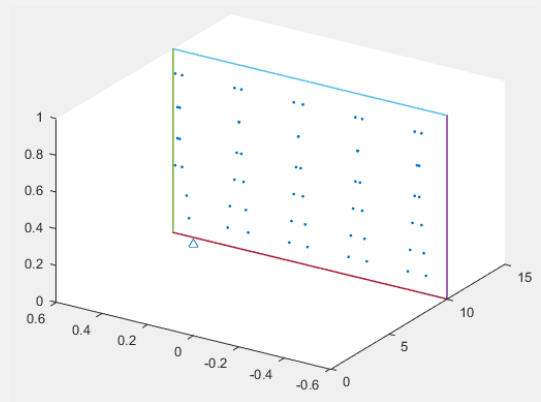
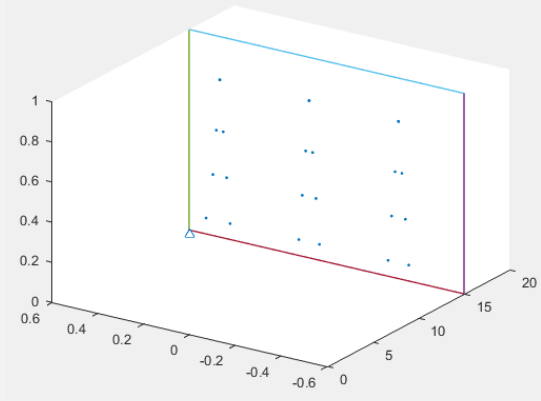
7.5 metros	<p><b>Altura:</b> <math>0.8920 \pm 0.18</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.108m</p> <p><b>Error relativo:</b> 10.8 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>1.1825 \pm 8.77 \times 10^{-3}</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.0175 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 1.458 %</p> <p><b>Número de puntos:</b> 104</p>	
10 metros	<p><b>Altura:</b> <math>0.7698 \pm 0.24</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.23 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 23 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>1.099 \pm 0.012</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.101 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 8.42 %</p> <p><b>Número de puntos:</b> 58</p>	
15 metros	<p><b>Altura:</b> <math>0.7049 \pm 0.3652</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.2951 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 29.51 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>0.8845 \pm 0.0175</math> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.3155 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 26.29 %</p> <p><b>Número de puntos:</b> 24</p>	

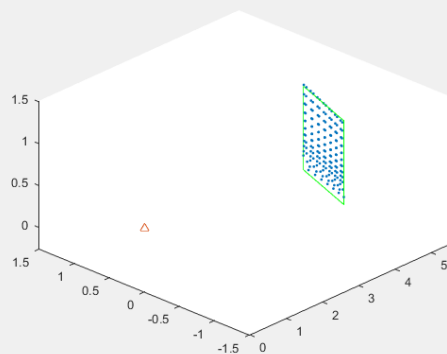
Tabla 4.2. Resultados de la simulación de los ensayos con dos planchas unidas.

Tras haber adquirido los resultados expuestos en las tablas se llegan a unas conclusiones bien definidas. Los análisis realizados a partir de 5 metros contienen errores en el cálculo de las dimensiones del objeto que no se pueden obviar y, aun tomando como bueno un ensayo realizado a 10 metros de distancia según el tamaño de dicho ítem, para los ensayos a una mayor distancia, como es el ejemplo del realizado a 15 metros, el número de

puntos que conforman la plancha es muy inferior a lo aconsejable, tanto que podría confundirse dicho objetivo con cualquier otro elemento del entorno. La mejor definición, como es lógico, se halla en el ensayo que proporciona mayor número de spots, es decir ubicando el objeto de mayor tamaño posible a la menor distancia (primera prueba del segundo grupo).

Otro de los aspectos a destacar de los valores mostrados se encuentra en los ensayos a 5, 7.5 y 10 metros con una única lámina como objeto a detectar. Se puede observar como el número de puntos va disminuyendo conforme aumenta la distancia, pero, en cambio, obtenemos un valor de la anchura del elemento más cercano al real en la prueba a 10 metros que en la de 7.5 metros. Este hecho se debe a que no solo depende del número de puntos recibidos, sino también de la posición en la que se encuentran. Por tanto, si los puntos registrados no están próximos al borde del objeto proporcionan un error mayor en el análisis de resultados, de ahí el interés de tener en cuenta la incertidumbre con la que se trabaja a la distancia que se elija en el ensayo a ejecutar.

En la tabla 4.3 se describen los ensayos en los cuales se ha ejercido una rotación sobre el objeto a detectar. El elemento principal consta de dos laminas, las cuales forman entre si una superficie de 1 metro de altura por 1.2 metros de anchura. La diferencia principal entre las dos pruebas ejecutadas es el ángulo de giro, siendo uno positivo y el otro negativo. Para poder realizar una comparación adecuada con los estudios, se ha obtenido la distancia experimental al punto más cercano de las planchas, calculado posteriormente los parámetros restantes. La anchura teórica es la correspondiente a la medida directamente desde el plano XY. Con las relaciones trigonométricas pertinentes se puede realizar un desplazamiento de esta, obteniendo la anchura que realmente mide el objeto.

Distancia al punto más cercano	Parámetros resultantes	Gráfica
4.6 metros (rotación positiva)	<p><b>Orientación detectada:</b> 41.826 grados</p> <p><b>Altura:</b> 0.9730 ± 0.121 m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.027 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 2.7 %</p> <p><b>Anchura capturada:</b> 0.8788 m</p> <p><b>Número de puntos:</b> 167</p> <p><b>Anchura estimada:</b> 1.1793±5.85x10<sup>-3</sup> m</p> <p><b>Error absoluto:</b> 0.0207 m</p> <p><b>Error relativo:</b> 1.725 %</p>	

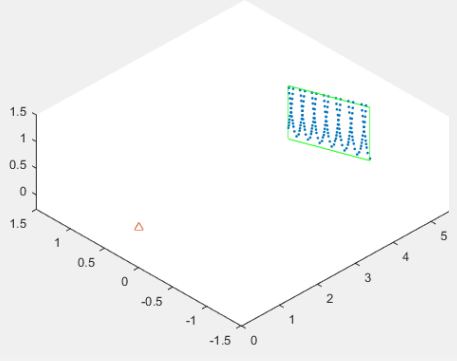
4.54 metros (rotación negativa)	<b>Orientación detectada:</b> -44.404 grados	
	<b>Altura:</b> 0.9763 ± 0.121 metros	
	<b>Error absoluto:</b> 0.0237 m	
	<b>Error relativo:</b> 2.37 %	
	<b>Anchura capturada:</b> 0.8571 m	
	<b>Número de puntos:</b> 161	
	<b>Anchura estimada:</b> 1.1997±5.85x10 <sup>-3</sup> m	
	<b>Error absoluto:</b> 3x10 <sup>-4</sup> m	
<b>Error relativo:</b> 0.025 %		

Tabla 4.3. Resultados de la simulación de los ensayos con rotación.

Sobre los resultados incluidos en la tabla 4.3 se ha de comentar la precisión con la que se han calculado las dimensiones del objeto, ya que, dentro del margen de error cometido, estas se acercan notablemente a su valor real. También se puede advertir el decremento del número de puntos adquiridos correspondientemente cuando el ángulo de giro sobre el eje vertical del ítem es mayor, lo cual no afecta al valor de los parámetros restantes hasta un cierto valor, pasados los 80 grados de rotación.

## 4.2. Experimentación

### 4.2.1. Procedimiento: Registro y procesamiento de datos

Como ya se ha comentado en el apartado 2.2.7, una vez lanzada la aplicación, el dispositivo devuelve los parámetros configurados previamente según el formato que se quiera conseguir, *ro\_data* para recibir únicamente la distancia, *ri\_data* para adquirir a parte de la posición de cada punto, la intensidad de rebote del propio haz de luz y *ax\_data* para valores de sensores auxiliares sobre magnetismo, aceleración angular, etc...

Se ha programado dicha recepción para que todos los valores que constituyen cada punto sean almacenados en un archivo .csv y poder realizar el análisis en Matlab. Como se muestra en la imagen 4.2, este fichero constituido por un array bidimensional engloba los siguientes parámetros devueltos: coordenadas cartesianas del punto ( *columna A* [x], *columna B* [y], *columna C* [z]), distancia a este junto (*columna D*) con los ángulos correspondientes que describen su orientación (*columna E* [horizontal] y *columna F* [vertical]), la intensidad (*columna G*, obtención de los datos en formato ri, ya que así se obtiene más información) la posición de cada punto en una línea o periodo determinado (*columna H*), la existencia de eco o no (*columna I*, repetición de un punto en una orientación determinada) y el número de barridos y líneas en el que se encuentran los valores dispuestos (*columna J*).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	VarName1	VarName2	VarName3	VarName4	VarName5	VarName6	VarName7	VarName8	VarName9	VarName10	VarName11
	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	NUMBER	TEXT	TEXT
1	#x_m	#y_m	#z_m	#range_m	#vertical_rad	#horizontal...	#intensity	#spot(0-73)	#echo(0-m...	#->framefield:line->	209
2	-0.514	-1.908	0.529	2.046	0.262	-1.834	383	0	0		
3	-0.510	-1.901	0.579	2.052	0.286	-1.833	383	1	0		
4	-0.509	-1.905	0.632	2.071	0.310	-1.832	383	2	0		
5	-0.505	-1.900	0.683	2.081	0.334	-1.831	389	3	0		
6	-0.502	-1.899	0.735	2.097	0.358	-1.829	395	4	0		
7	-0.504	-1.917	0.794	2.135	0.381	-1.828	403	5	0		
8	-0.500	-1.910	0.843	2.147	0.404	-1.827	421	6	0		
9	-0.499	-1.913	0.896	2.171	0.426	-1.826	401	7	0		
10	-0.496	-1.912	0.946	2.190	0.447	-1.825	379	8	0		
11	-0.491	-1.902	0.990	2.200	0.467	-1.824	363	9	0		
12	-0.491	-1.910	1.042	2.230	0.486	-1.822	333	10	0		
13	-0.491	-1.919	1.093	2.262	0.504	-1.821	333	11	0		
14	-0.491	-1.928	1.142	2.294	0.521	-1.820	329	12	0		
15	-0.484	-1.910	1.172	2.293	0.537	-1.819	325	13	0		
16	-0.481	-1.907	1.209	2.308	0.551	-1.818	335	14	0		
17	-0.483	-1.924	1.255	2.347	0.564	-1.817	293	15	0		
18	-0.469	-1.880	1.257	2.310	0.575	-1.815	301	16	0		
19	-0.470	-1.903	1.323	2.365	0.594	-1.813	297	17	0		
20	-0.458	-1.890	1.360	2.373	0.611	-1.808	315	18	0		
21	-0.447	-1.885	1.326	2.348	0.600	-1.804	291	19	0		
22	-0.437	-1.861	1.267	2.294	0.585	-1.801	293	20	0		
23	-0.435	-1.863	1.241	2.280	0.575	-1.800	273	21	0		
24	-0.442	-1.900	1.234	2.308	0.564	-1.799	327	22	0		

Imagen 4.2. Registro de los datos adquiridos por el LIDAR YVT-X002

Para elaborar el procesamiento de los datos almacenados se ha programado la función *captura\_datos*. El objetivo principal de este programa es leer correctamente el archivo csv e ir almacenando cada uno de los parámetros en matrices, de tal forma que todos ellos se puedan tratar por separado con el fin de distinguir entre coordenadas polares y cartesianas, dependiendo de la técnica de filtrado escogida. En dicha función, aparte de ejecutar lo ya comentado, se lleva a cabo también dos procesos importantes.

Con el fin de obtener una mayor eficiencia en la ejecución del filtrado sobre el entorno, se eliminan aquellos puntos a una distancia mayor de 20 metros ya que van a ser inútiles para el objetivo principal, así como todos los puntos situados a menos de 0.5 metros del sensor. Este procedimiento se realiza debido a dos factores:

El rango de detección del dispositivo es de 210 grados y el control del ensayo no es remoto, lo que puede llegar a causar nuevos puntos haciendo que las mediciones cercanas al origen, aparte de definirse de manera estocástica, no puedan llegar a filtrarse correctamente.

Aquellos puntos repetidos que ocupan la misma orientación que otra medición realizada. Se pueden deber a factores externos como el material en el que se impacta, aunque no son abundantes en los archivos analizados. En la imagen 4.3, última columna, se muestra un ejemplo.

	#x_m	#y_m	#z_m	#range_m	#vertical_rad	#horizontal...	#intensity	#spot(0-73)	#echo(0-m...
3961	8.461	0.115	2.714	8.886	0.310	0.014	408	35	0
3962	9.202	0.136	2.707	9.593	0.286	0.015	406	36	0
3963	9.432	0.150	2.527	9.766	0.262	0.016	418	37	0
3964	9.393	0.160	2.273	9.665	0.237	0.017	284	38	0
3965	11.130	0.190	2.693	11.453	0.237	0.017	178	38	1
3966	12.377	0.226	2.679	12.666	0.213	0.018	332	39	0
3967	13.949	0.271	2.671	14.205	0.189	0.019	298	40	0
3968	15.797	0.325	2.640	16.019	0.166	0.021	152	41	0
3969	22.487	0.514	2.706	22.655	0.120	0.023	262	43	0
3970	22.449	0.540	2.205	22.564	0.098	0.024	222	44	0
3971	22.484	0.567	1.731	22.558	0.077	0.025	238	45	0
3972	22.492	0.593	1.274	22.536	0.057	0.026	232	46	0

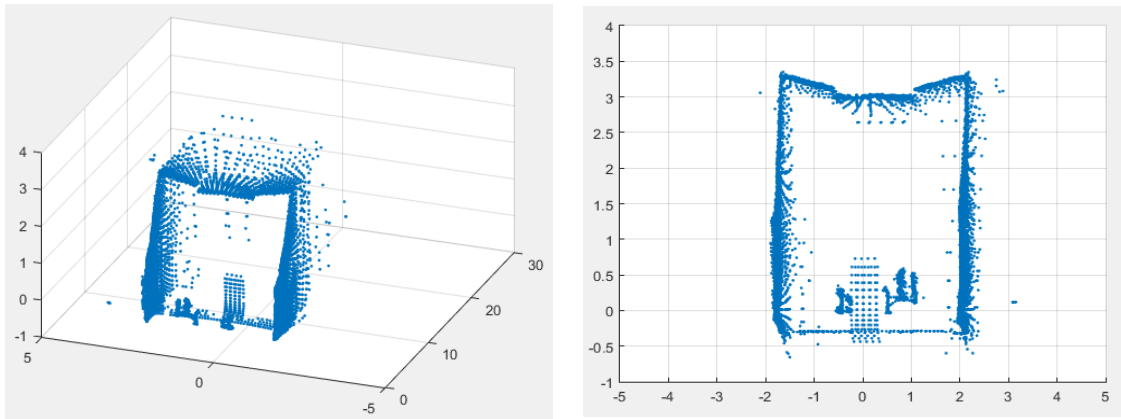
Imagen 4.3. Localización de un eco en los resultados

Como se ve, las intensidades de reflexión no son concluyentes para eliminar uno u otro eco, por lo que se ha decidido tomar la primera medida, eliminando la influencia de la otra.

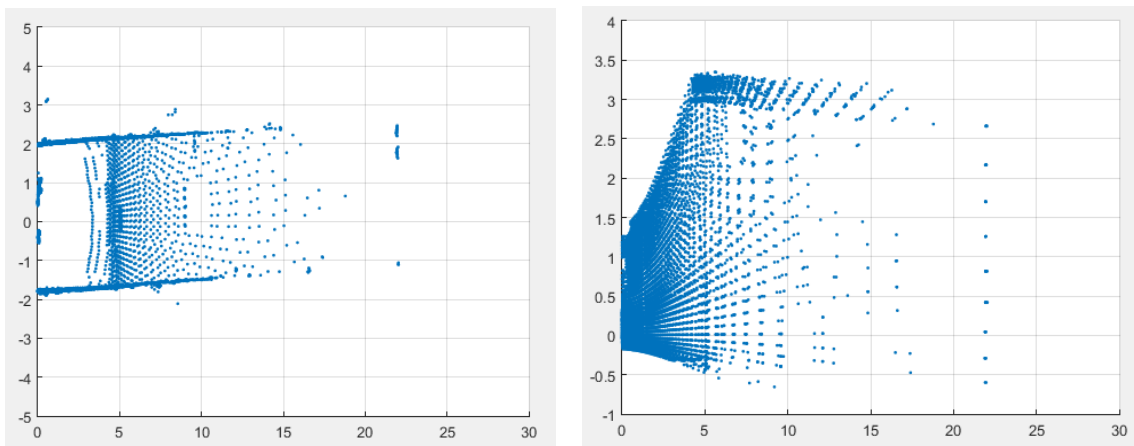
## 4.2.2. Resultados experimentales

En este apartado se muestran los resultados de los distintos ensayos realizados con las condiciones predefinidas en el apartado 3.2.2. Hay que tener en cuenta que todo lo expuesto en esta sección son datos originales percibidos por el sistema.

Las gráficas 4.7 y 4.8 detallan los resultados del ensayo en el cual se ha empleado una única plancha de 1 metro de alto por 0.6 metros de ancho, situada a 5 metros de distancia.



*Gráfica 4.7. Objeto situado a 5 m del sensor, vista 3D (izda) vista del plano YZ (dcha).*



*Gráfica 4.8. Gráficas correspondientes a los planos XY (izda) y XZ (dcha).*

A continuación, se despliegan en la tabla 4.6 todos los ensayos en los que solo se quiera detectar una lámina de poliespán y en la tabla 4.7 los resultados de aquellas pruebas realizadas con dos planchas con el fin de poder observar la influencia del tamaño del objeto a detectar a la hora de calcular las medidas ya concretadas para alcanzar el objetivo final.



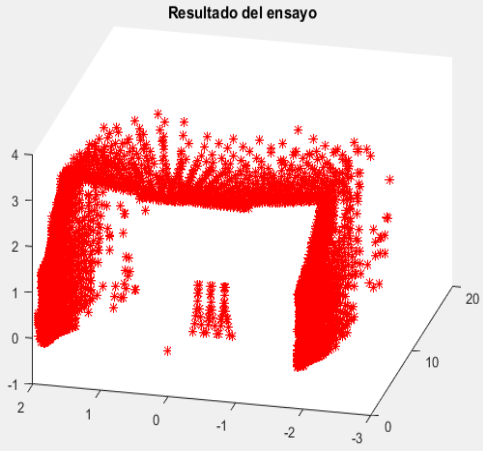
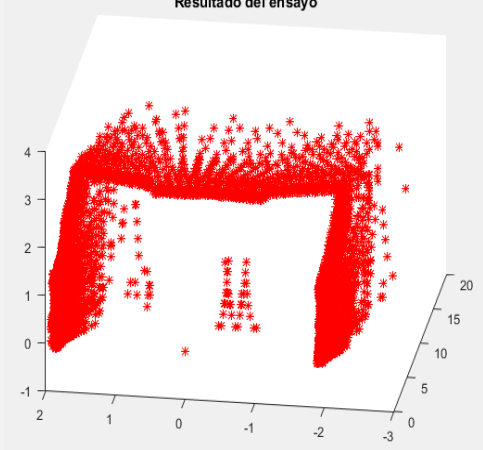

Distancia del objeto	Gráfica
7.5 metros	 <p>Resultado del ensayo</p>
10 metros	 <p>Resultado del ensayo</p>
15 metros	 <p>Resultado del ensayo</p>

Tabla 4.4. Resultados de la simulación de los ensayos con una única lamina.

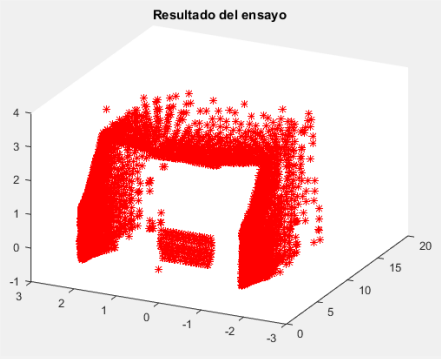
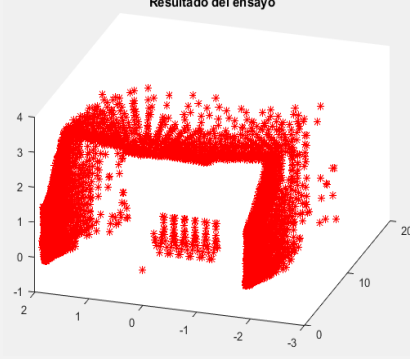
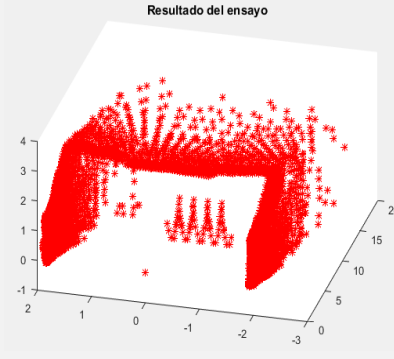
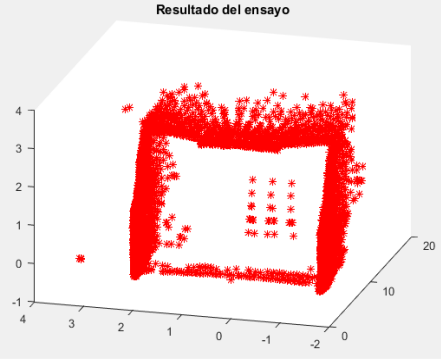
Distancia del objeto	Gráfica
5 metros	
7.5 metros	
10 metros	
15 metros	

Tabla 4.5. Resultados de la simulación de los ensayos con dos planchas unidas.

En la tabla 4.8 se muestran los ensayos con rotación incluida empleando doble lámina, así como el entorno sin objeto a detectar.

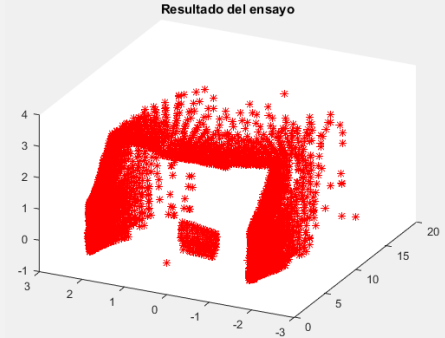
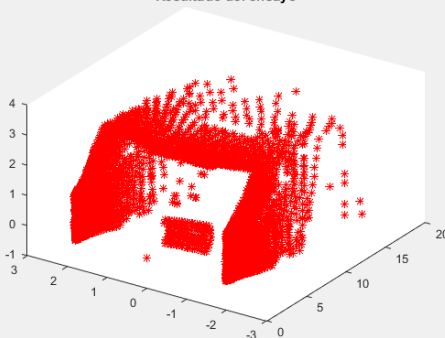
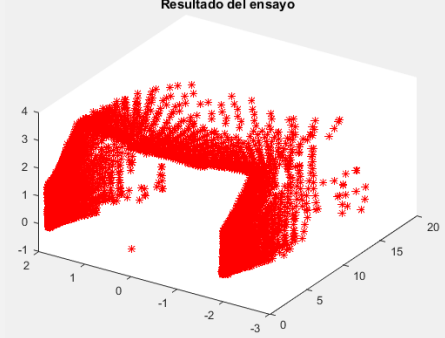
Condiciones	Gráfica
+45 grados	
-45 grados	
Entorno del ensayo	

Tabla 4.6. Ensayos con rotación incluida y entorno de las pruebas.

## 5. Filtrado de outliers

---

### 5.1. Objetivos del filtrado

Una vez realizado el registro, procesado y modelado digital de las mediciones recibidas en cada una de las pruebas es necesario eliminar toda la información correspondiente al entorno del objeto para alcanzar el objetivo principal del proyecto, es decir, analizar dicho ítem y calcular su área y la distancia a la que se ha ubicado según el número de puntos que lo componen.

Se define como outlier a aquella medición o punto procesado, incluido en el recorrido de detección, lejano al área a estudiar para el estudio de los resultados y, el cual, mediante diversas herramientas y procesos se debe eliminar para evitar su influencia en el resultado de la medida.

Gracias a este procedimiento, el usuario puede distinguir cualquier objeto en una zona determinada e, incluso, delimitar varios de estos elementos mediante ecuaciones de múltiples planos, pudiendo así averiguar su posición en el espacio.

### 5.2. Técnicas para la eliminación de outliers

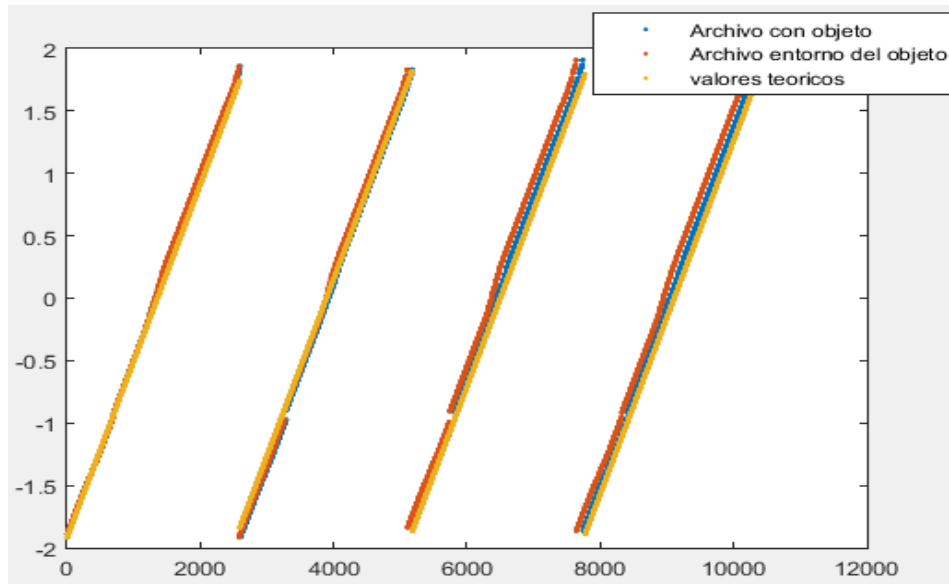
Para poder eliminar los outliers correspondientes al entorno del sistema, se han ideado tres métodos diferentes que descomponen y reagrupan todos los datos. Cada uno de ellos basa su función en tácticas asociadas al tipo de ensayo realizado: eliminación de puntos mediante la resta de dos ensayos diferentes, uno que incluya el objeto a filtrar y otro que englobe únicamente al entorno, formación de clases que describan grupos de puntos, ya que aun desconociendo dónde se encuentra situado el objeto, se puede predecir aquellas mediciones que formen parte de las paredes, el techo o el suelo del pasillo.

#### 5.2.1. Filtrado 1: Comparación de las componentes angulares

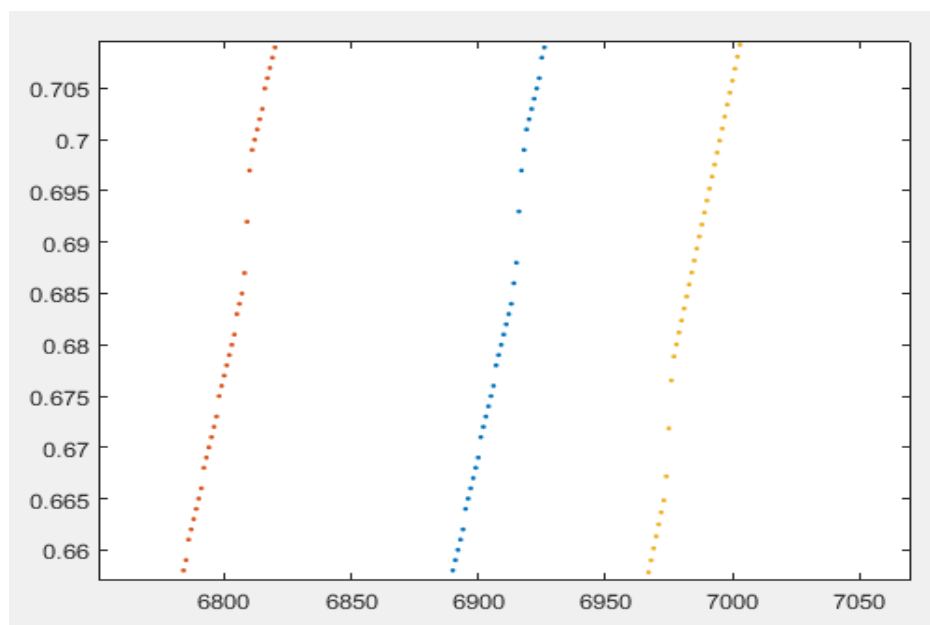
Este procedimiento realiza su cometido según las componentes angulares de cada uno de los puntos que representan los cuatro barridos desfasados. Hay que recordar que la orientación de los puntos viene predefinida como parámetros internos según las ecuaciones (1-3), siendo una la componente vertical que se toma dentro del rango impuesto y otro la componente horizontal.

El principio fundamental de este tipo de filtrado es comparar dos archivos adquiridos en los ensayos, uno con objeto y otro que no lo contenga (captura de “fondo”). Si la distancia del punto al dispositivo es similar en los dos registros, con un margen de error concreto, este será obviado de los distintos arrays que almacenan los valores de cada valor que lo definen ya procesados.

A continuación, para saber más sobre el comportamiento del LIDAR a la hora de ejecutar un ensayo, se muestra el valor de los ángulos horizontales y verticales (en radianes) de cada gráfica en función de la posición del punto obtenido. La realización de estas gráficas han sido necesarias para determinar si las ejecuciones de los ensayos se estaban elaborando de forma correcta.

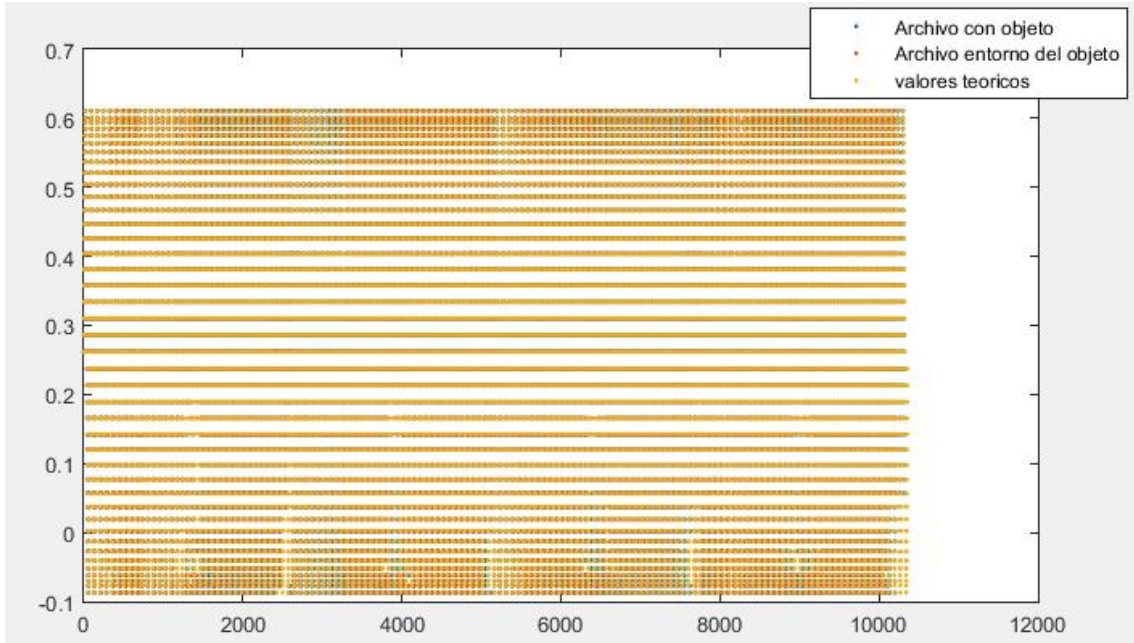


*Gráfica 5.1. Componente horizontal de los cuatro barridos.*

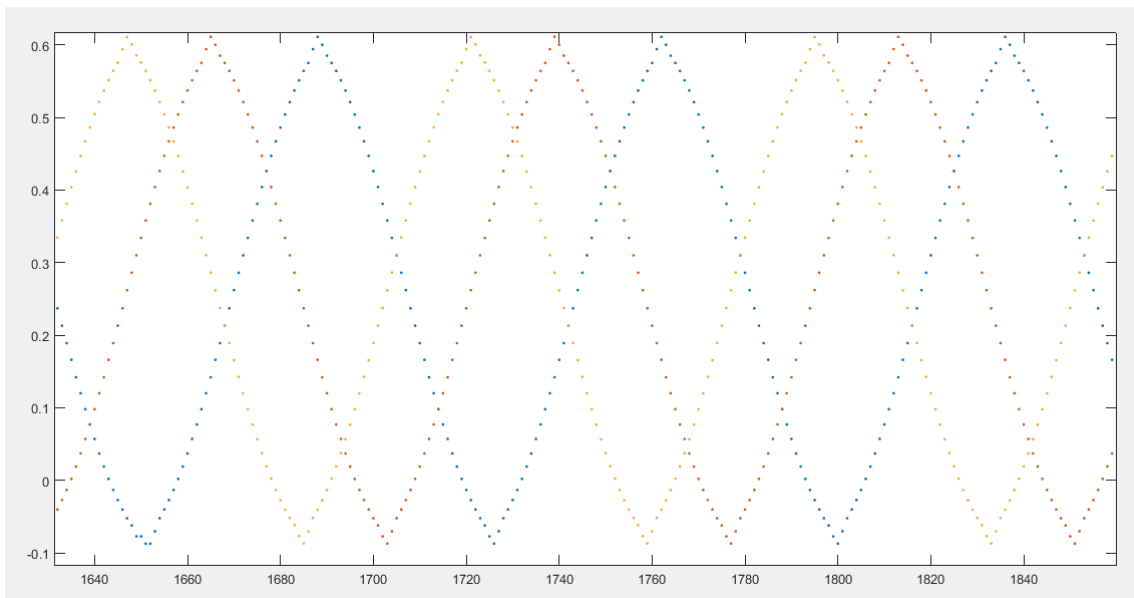


*Gráfica 5.2. Ampliación de la imagen 5.1 para visualización de datos.*

Como se puede observar se definen perfectamente los cuatro barridos constituidos por más de 2000 medidas. El desfase que se produce entre los tres parámetros que se visualizan es debido a factores externos, los cuales provocan que muchos de los puntos que se van a tomar no se reciban de forma correcta, por lo que al no ser un proceso ideal siempre serán recogidos un número menor de muestras con respecto al ensayo teórico que engloba un total de 10360 puntos.



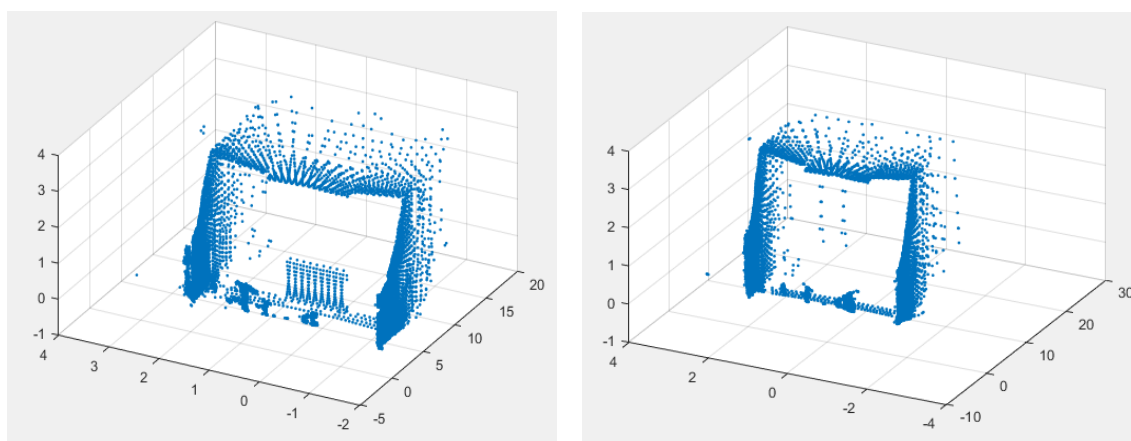
*Grafica 5.3. Componente vertical de los cuatro barridos.*



*Grafica 5.4. Ampliación de la imagen 5.3 para visualización de datos.*

Con respecto a la componente vertical, se puede percibir la periodicidad del recorrido al tratarse de un trayecto sinusoidal, tomando valores desde 35 grados (0.611 radianes) hasta -5 grados (aproximadamente -0.1 radianes), por lo que tomando un único periodo ya se sabe que valores de esta componente se va a poder solicitar en los distintos análisis.

Ahora bien, para poder ejecutar el proceso explicado, es obligatorio dividir el procedimiento principal en tres tipos de filtrado diferentes. Para describir cada uno de ellos nos ayudamos de un ejemplo, escogiendo como patrón el ensayo realizado con dos planchas situadas a 5 metros de distancia junto con el archivo sin objeto.

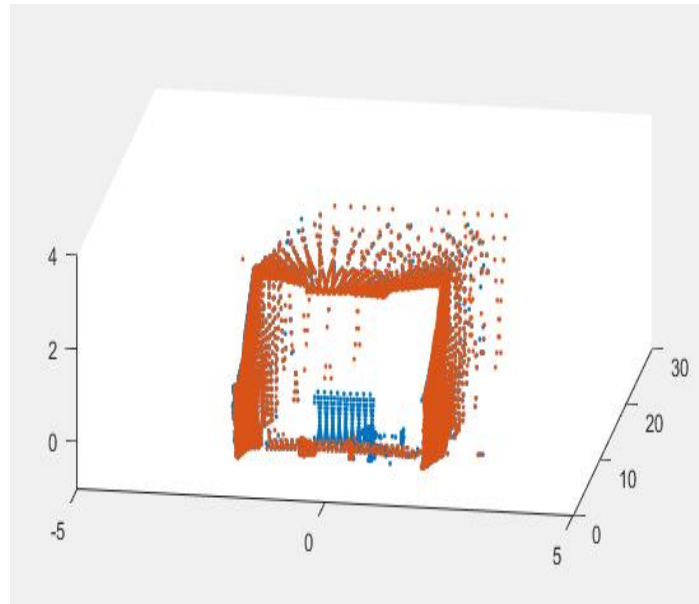


Grafica 5.5. Resultados originales (sin procesar) obtenidos con objeto (izda), sin objeto (dcha).

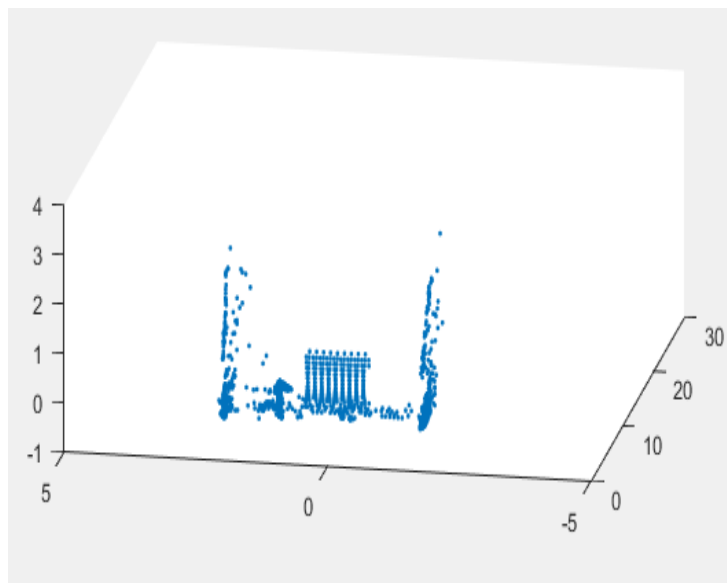
### *Primera fase del filtrado 1: según la componente horizontal.*

Para este procedimiento de inicio se recorre el buffer que almacena los datos de los valores angulares referentes al yaw (orientación horizontal). Para cada contenido de las posiciones del array se busca su igual en el archivo del entorno sin objeto, al cual se le denomina *fondo*. Una vez encontrado se debe confirmar que la componente vertical de las dos mediciones coincide, de esta forma se analizan dos puntos definidos con la misma orientación.

Con todo ello, únicamente hay que observar si la distancia respecto del sensor es similar con un cierto margen (0.3 metros) o, en el caso de haber detectado algún elemento nuevo, verificar que esa diferencia existe para poder almacenar el punto adquirido. Este proceso se realizará con los cuatro barridos configurados. A continuación, se muestra el resultado de este primer desarrollo.



*Grafica 5.6. Solapamiento de los dos archivos con y sin objeto.*



*Grafica 5.7. Grafica resultante del primer filtrado, resta del fondo.*

Como se observa no se puede calcular ni las dimensiones del objeto ni a la distancia que le separa del dispositivo debido a que aún no se ha eliminado toda la información correspondiente al entorno.

*Segunda fase del filtrado 1: según la componente vertical.*

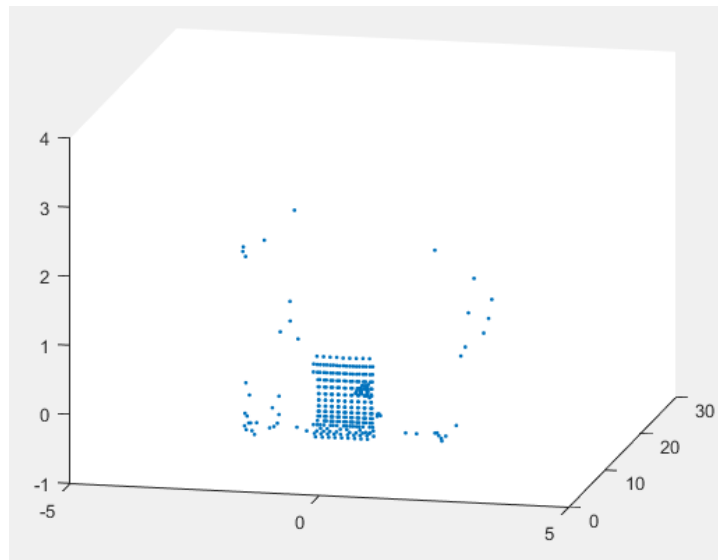
La etapa se basa en el mismo procedimiento que el anterior, con la diferencia de que ahora se recorre primero el buffer con el pitch (componente vertical) de cada punto



comparando después los valores horizontales de los mismos para ver al final si ocupan el mismo espacio en el modelado 3D y obviar aquellos que cumplan este requisito.

Esta segunda técnica expuesta es indispensable, ya que existen errores muy pequeños en la obtención de las componentes angulares que se están obviando en el primer proceso comparativo, por lo que estos deben tenerse en cuenta aplicando una tolerancia determinada.

Una vez aplicada la segunda fase, se obtienen como resultado la gráfica 5.8.



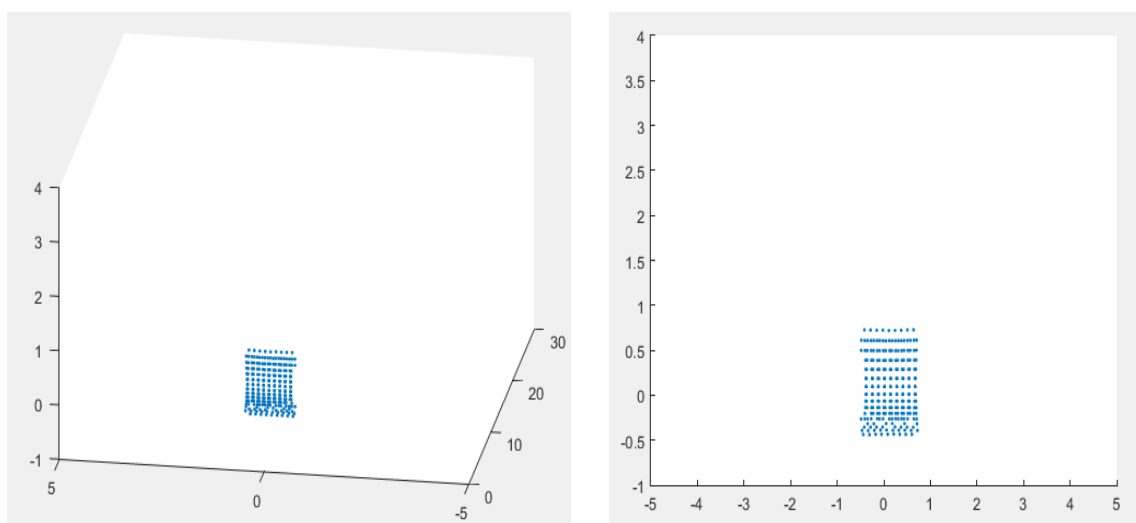
Grafica 5.8. Grafica resultante de la segunda fase de filtrado.

Aun habiendo realizado ya dos etapas de este filtrado según la orientación de los puntos, se observa aun ruido alrededor del objeto. Esos valores, aun siendo en menor número que al principio, van a tener repercusión a la hora de dimensionar y ubicar analíticamente el objeto, por lo que es necesario continuar filtrando.

### *Tercera fase de filtrado 1:*

Para poder deshacerse del ruido, esta tarea se basa principalmente en obtener la componente cartesiana X, es decir, la profundidad de cada medida que más se repite dentro de un rango. Llegado a este punto, el modelado contiene un mayor número de puntos de la plancha que de ruido procedente del entorno, por lo que todo aquel que se salga fuera del área establecida por la mayoría de muestras no se almacena ni se tiene en cuenta en el análisis posterior, dando lugar al resultado final del filtrado mostrado en la imagen 5.9.

Una vez se haya filtrado el entorno al completo, se procede a los cálculos finales expuestos en la tabla 5.1.



Grafica 5.9. Resultados finales del proceso de filtrado 1.

Con el resultado obtenido mediante esta técnica de filtrado se puede observar cómo se cumple esa periodicidad respecto a la orientación vertical de los puntos, formando así líneas horizontales perfectamente descritas que originaron la idea principal de filtro 2D mostrado posteriormente en el apartado 5.2.2.

Parámetros	Filtrado 1	Datos reales
Altura (m)	$1.168 \pm 0.121$ <b>Error absoluto:</b> 0.168 m <b>Error relativo:</b> 16.8 %	1
Anchura (m)	$1.208 \pm 5.85 \times 10^{-3}$ <b>Error absoluto:</b> 0.08 m <b>Error relativo:</b> 6.67 %	1.2
Área (m <sup>2</sup> )	$1.411 \pm 0.146$	1.2
Distancia (m)	5.032	5
Número de puntos	239	-

Tabla 5.1. Medidas calculadas vs medidas reales, tras el proceso de filtrado 1.

El principal problema que conlleva este tipo de filtrado es que, en el último proceso, siempre se debe dar el requisito de que el número de puntos que componen el objeto sea mayor que la cantidad de ruido del entorno, sino el área aislada no tendría por qué ser la del propio elemento. Esta circunstancia puede no darse en función del tamaño del objeto y de la distancia de ubicación, ya que, por ejemplo, para aquellos ítems colocados a más de 10 metros de distancia, por ejemplo, a 15 metros, no se obtienen más de 40 puntos del propio elemento, dando lugar a los errores ya mencionados.

### 5.2.2. Filtrado 2: Descomposición en planos XY

Se atiende a un procedimiento cuya función permite desglosar la información y realizar un tratamiento sobre el propio modelado más fácilmente. La idea que sostiene esta técnica de filtrado es la descomposición en planos XY perpendiculares al eje Z aprovechando la propiedad periódica de la componente angular vertical de las medidas como se comentó en el apartado anterior, así se podrá ver la separación de las muestras, tanto del archivo con objeto como del entorno, para posteriormente aplicar una diferencia de distancias junto con pequeños saltos en los valores angulares horizontales y saber si se han producido cambios en el área de estudio.

Lo primero de todo es localizar el valor de cada una de esas componentes verticales desde su máximo hasta el mínimo de la senoide, independientemente de lo que se obtenga en los demás parámetros, por lo que se obtienen unos 37 datos diferentes, ya que cada periodo o línea se compone de 74 puntos, es decir, que se conformarán 37 planos. En la imagen 5.1 se observa como escogiendo una fila correspondiente a un pitch determinado se pueden obtener todos los puntos de un único plano XY.

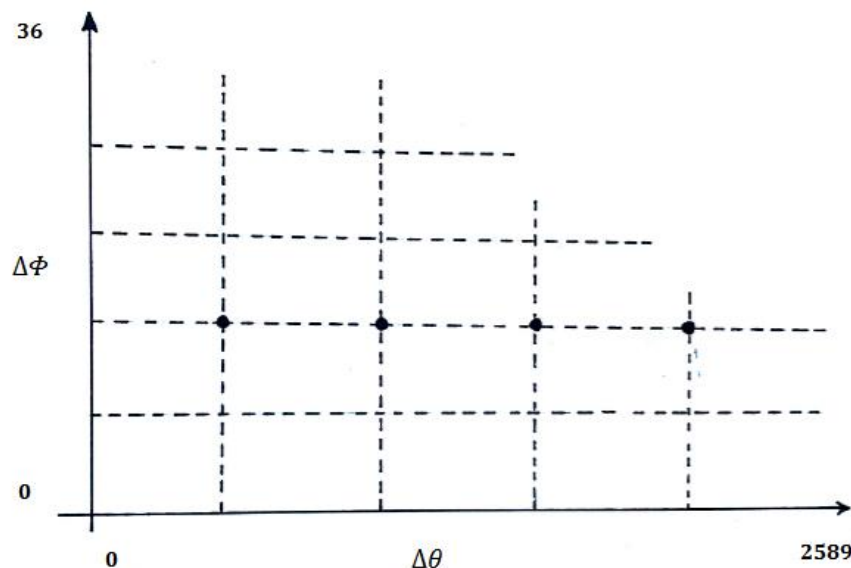
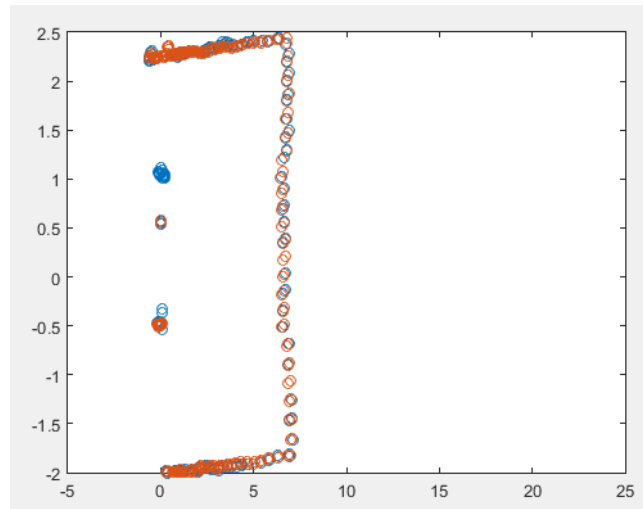


Imagen 5.1. Elección de las mediciones para un pitch determinado

Una vez localizado aquellos puntos que se encuentren en el plano a analizar, se desglosa la información de los cuatro barridos con la finalidad de poder analizarlos uno a uno. Habrá planos en los cuales no se detecten medidas que formen parte del objeto, por lo que serán desechados inmediatamente, como son aquellos que se encuentren a 2 o 3 metros de altura o que contengan puntos del propio techo. Se recuerda que en el ejemplo expuesto el objeto a identificar se sitúa a 5 metros de distancia.



*Gráfica 5.10. Superposición de plano x-y, sin información del objeto.*

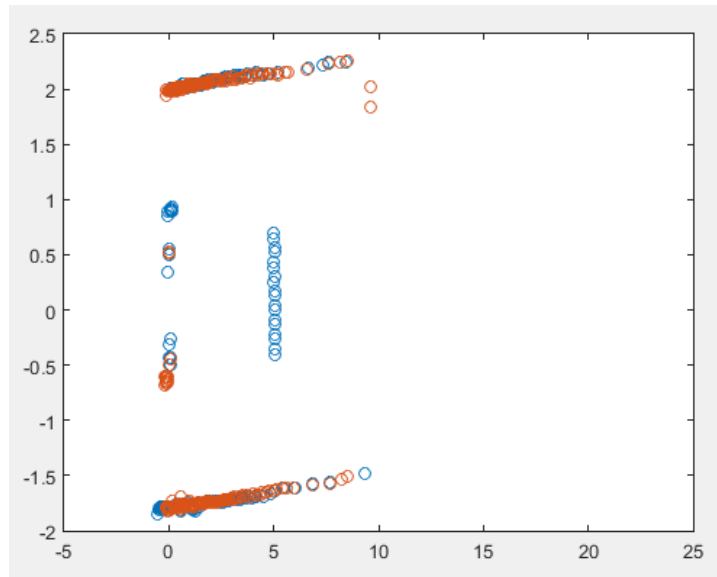
Ahora bien, en los casos para los que se localice puntos pertenecientes al ítem en sí, se ha investigado sobre el funcionamiento del LIDAR ante la detección de un nuevo factor en el entorno de su sistema y se ha llegado a la conclusión de que, comparando el valor de la componente horizontal de cada punto coincidente en los dos archivos se produce un pequeño salto cuando es detectado dicho objeto, no teniendo de esta forma el mismo valor. Hay que añadir que, siempre que no se encuentre nada nuevo sobre el espacio analizado, dicha componente no difiere en su valor aproximadamente para cada uno de los puntos de los dos ensayos. En la imagen 5.2 se observa una matriz que contiene en la columna 1 el ángulo horizontal en radianes de los puntos de un plano determinado y en la columna 2 la distancia a la que se encuentran en metros para el ensayo realizado con objeto, así mismo, en la columna 3 y 4 se hallan los ángulos horizontales y las distancias correspondientes para el ensayo sin objeto.

Es en dicha imagen se ha marcado donde se produce el salto en el registro de ángulos detectados, sin y con objeto a detectar.

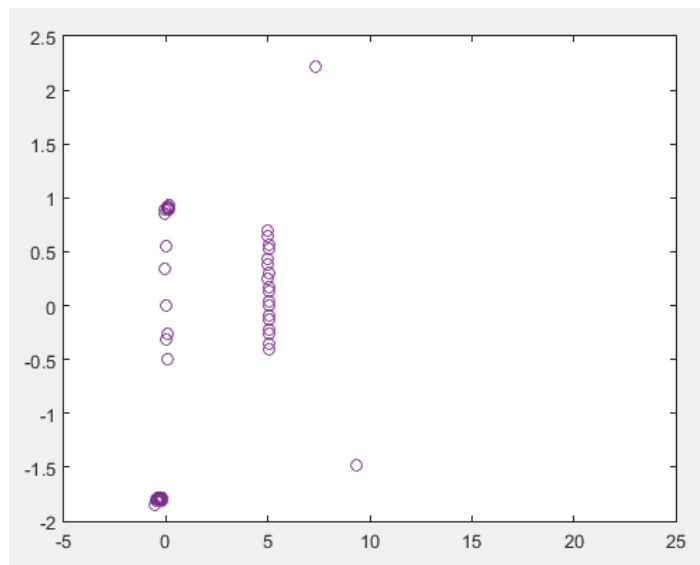
	1	2	3	4
25	-0.5670	3.2230	-0.5670	3.2040
26	-0.5490	3.2930	-0.5490	3.2930
27	-0.4620	3.8380	-0.4620	3.7960
28	-0.4450	3.9490	-0.4450	3.9110
29	-0.3580	4.8170	-0.3580	4.7340
30	-0.3400	4.9540	-0.3410	4.9310
31	-0.0450	5.0510	0.2680	8.4640
32	-0.0270	5.0440	0.2850	7.9430
33	0.0600	5.0440	0.3720	5.9370
34	0.0770	5.0360	0.3890	5.6200
35	0.2850	7.9680	0.4760	4.6640
36	0.3720	5.9280	0.4930	4.4440
37	0.3900	5.6500	0.5800	3.7980
38	0.4760	4.6830	0.5980	3.6980
39	0.4940	4.4920	0.6840	3.2830
40	0.5810	3.8640	0.7020	3.2140
41	0.5980	3.7670	0.7880	2.9320
42	0.6850	3.3260	0.8060	2.8610
43	0.7020	3.2310	0.8920	2.6460
44	0.7890	2.9360	0.9100	2.5970
45	0.8060	2.8650	0.9960	2.4290
46	0.8930	2.6670	1.0140	2.3940
47	0.9100	2.5900	1.1000	2.2860
48	0.9970	2.4330	1.1180	2.2440
49	1.0140	2.3890	1.2040	2.1660
50	1.1010	2.2850	1.2220	2.1500
51	1.1180	2.2630	1.3080	2.0760
52	1.2050	2.1610	1.3260	2.0560

*Imagen 5.2. Comparación entre datos con objeto (columna 1-2) y sin objeto (columnas 3-4). Salto en el valor de yaw*

Este aspecto expuesto únicamente se emplea para verificar que se ha encontrado un elemento no detectado anteriormente (registro de fondo). Para saber aquellos que, si correspondan al objeto, se realiza la diferencia de distancias de los puntos con el mismo valor para la componente angular horizontal, almacenando solo los puntos del archivo principal que se encuentre muy alejados con respecto a las medidas definidas en el ensayo sin ningún elemento. Los resultados obtenidos para un plano que si contenga dicha información se muestran en las siguientes gráficas.

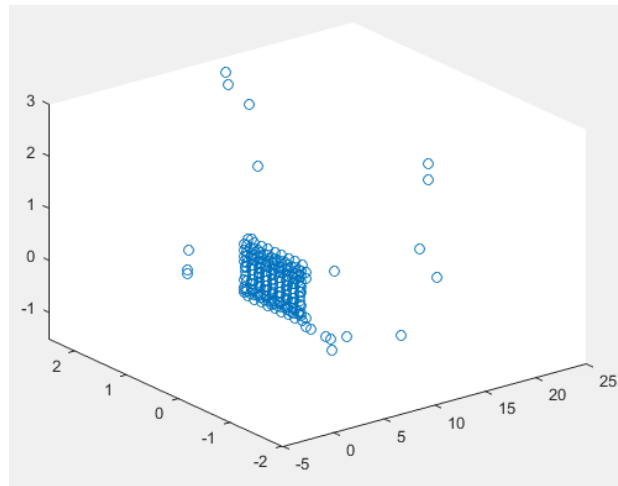


Grafica 5.11. Visualización del registro para un pitch concreto en plano XY.



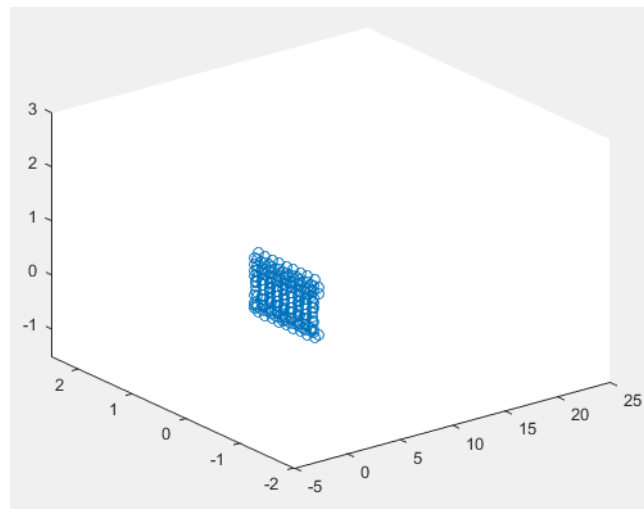
Grafica 5.12. Filtrado realizado en un plano x-y.

Como se muestra en la gráfica 5.13, el modelado obtenido contiene aun ruido producido por factores externos al proceso. A continuación, el proceso a seguir es el mismo para cada uno de los planos, almacenando todas las medidas para poder visualizar el conjunto global. Se descartan todos los puntos cercanos al dispositivo, de esta forma se optimiza el proceso ya que en ningún caso se localizará un objeto a menos de 1 metro de distancia debido a los errores de medida originados por el LIDAR.



Grafica 5.13. Ruido del entorno.

Para eliminar todo el ruido que rodea el objeto se emplea la misma técnica que en el filtrado 1, aunque puede realizarse de diversas formas, como por ejemplo, empleando funciones que detectan valores atípicos dentro de un conjunto de medidas (*function isoutlier*) o mediante filtros normalizados como es el caso del filtro de Hampel, que basa la detección de los outliers en el denominado identificador de Hampel, el cual se trata de una variación de la regla tres-sigma utilizada principalmente en ámbitos estadísticos. El resultado final de esta tarea se muestra en la imagen 5.14.



Grafica 5.14. Resultado final del filtrado 2 de un objeto en espacio 3D.

Parámetros	Filtrado 2	Datos reales
Altura (m)	1.083 ± 0.121 <b>Error absoluto:</b> 0.083 m <b>Error relativo:</b> 8.3 %	1
Anchura (m)	1.1996 ± 5.85x10 <sup>-3</sup> <b>Error absoluto:</b> 4x10 <sup>-4</sup> <b>Error relativo:</b> 0.033 %	1.2
Área (m <sup>2</sup> )	1.2995 ± 0.145	1.2
Distancia (m)	5.032	5
Número de puntos	203	-

Tabla 5.2. Comparación entre los parámetros obtenidos y los reales.

Si se comparan los resultados de la tabla 5.2 (filtrado 2) con respecto a los de la anterior técnica (filtrado 1) empleada se puede observar como en esta ocasión se consiguen un menor número de puntos (mayor filtrado), pero una mejor respuesta en el dimensionado y ubicación del objeto.

### 5.2.3. Filtrado 3: Conformación de planos mediante la agrupación de spots

Este último procedimiento realiza el filtrado mediante procesos de cuantificación y caracterización de planos con ayuda de las ecuaciones pertinentes. El método general se basa en la obtención de los planos que constituyen el entorno a través de los distintos conjuntos de puntos que los forman. Una vez descritos se eliminarán todos aquellos que formen parte del espacio cubico, de esta manera se obtienen únicamente las ecuaciones que describen los objetos restantes, pudiendo distinguirlos y saber en todo momento su situación.

Para poder llegar a este objetivo, primero se reubican todos los datos formando así una matriz bidimensional. El número de filas marcara el rango angular vertical del sensor, desde 35 grados hasta -5 grados mientras que el número de columnas indica el rango horizontal de 210 grados con una resolución determinada para fijar cada índice. El contenido de cada una de las celdas es la distancia obtenida, es decir, para una orientación



dada, la cual encuentra una posición definida en la matriz, se puede saber la ubicación de una medida.

Dado que los índices son números enteros, es imprescindible emplear una cuantificación según el fondo de escala de las componentes angulares y del número de bits que se ha elegido para ello. El número de filas es igual a 32 mientras que el número de columnas queda determinado en 4096, por lo tanto, el número de bits serán 5 y 12 respectivamente. El escalón de cuantificación para cada caso está definido en la ecuación 4.

$$q = \frac{FS}{2^{nbits}-1} \quad (4)$$

Nº Columnas relacionadas con ángulo vertical:	FS=40	nbits=5
Nº Columnas relacionadas con ángulo horizontal:	FS=210	nbits=12

Al encontrar valores angulares negativos, se desplazan de manera que todo el rango correspondiente a las orientaciones (pitch y yaw) sean parámetros positivos.

Esta matriz intercala los cuatro barridos, por lo que disponemos de 2590 columnas como mínimo, esta es la justificación de la elección del número de bits. En la imagen 5.3 se puede apreciar la disposición de los cuatro barridos en el array de almacenamiento según su orientación.

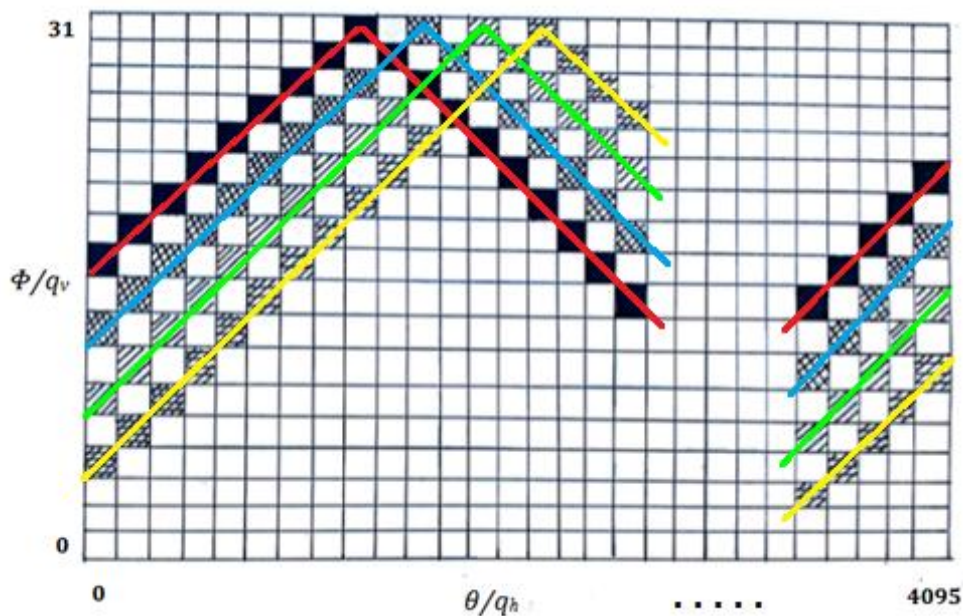
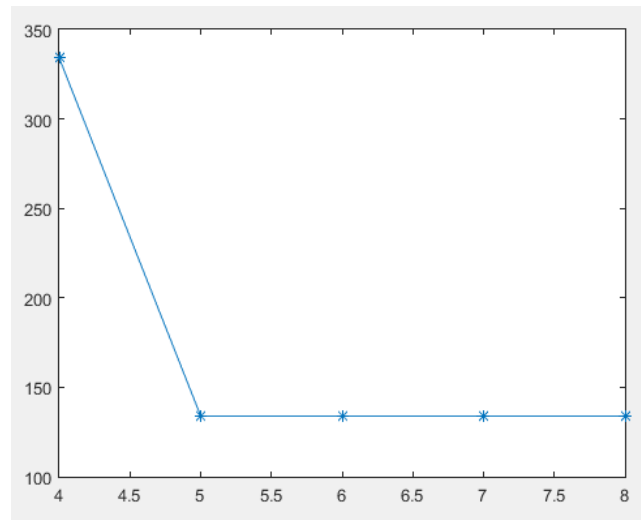


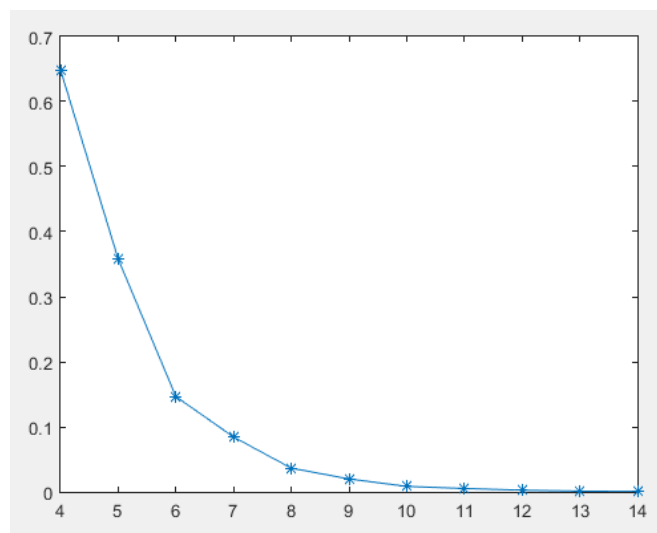
Imagen 5.3. Matriz de datos reubicados según su orientación

Al encontrarse los 4 barridos intercalados también se puede dar que en una misma posición se solapan distintas distancias. En la gráfica 5.15 se muestra el número de puntos sobrescritos en función de la elección del número de bits.



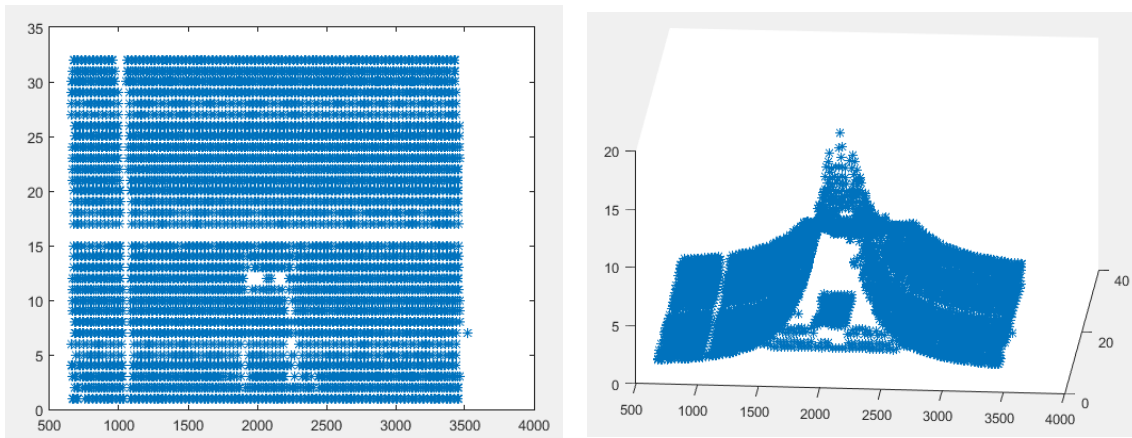
Grafica 5.15. Número de puntos sobrescritos (eje y) en función de los bits cuantificados (eje x).

Se puede observar cómo, a partir de 5 bits el número de puntos sobrescritos no cambia, por lo que es indiferente la elección que se tome, teniendo en cuenta que si se escogen un número menor al propuesto la pérdida de información y el error cometido serían demasiado elevados. En la gráfica 5.16 se muestra el error medio calculado que puede llegar a cometerse en función de la elección de nbits.



Grafica 5.16. Error medio calculado (eje y), en función de los bits cuantificados (eje x)

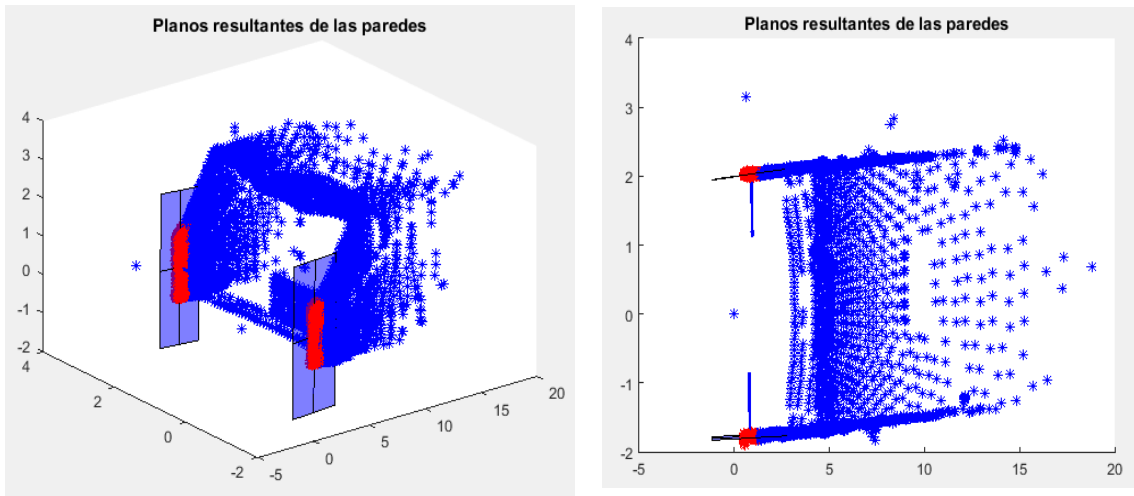
El error cometido a partir de los 7 bits es completamente despreciable. Con todo el análisis expuesto, se construye la matriz mostrada a continuación, donde se puede observar como las distancias que se encuentran en las posiciones centrales son las más alejadas debido a la profundidad del pasillo donde se ejecutaron las distintas pruebas.



Grafica 5.17. Reubicación de los datos.

Esta reubicación permite al usuario acceder directamente a un espacio determinado en el entorno del ensayo, por ejemplo, si se desea conseguir parte de la información de la pared ubicada a la izquierda únicamente habría que considerar las primeras columnas del array, de igual manera si se quiere tratar el techo, se acude directamente a las últimas filas, desde la 28 hasta la 32 aproximadamente. Por lo tanto, para conformar los distintos planos es fundamental aplicar dicho método.

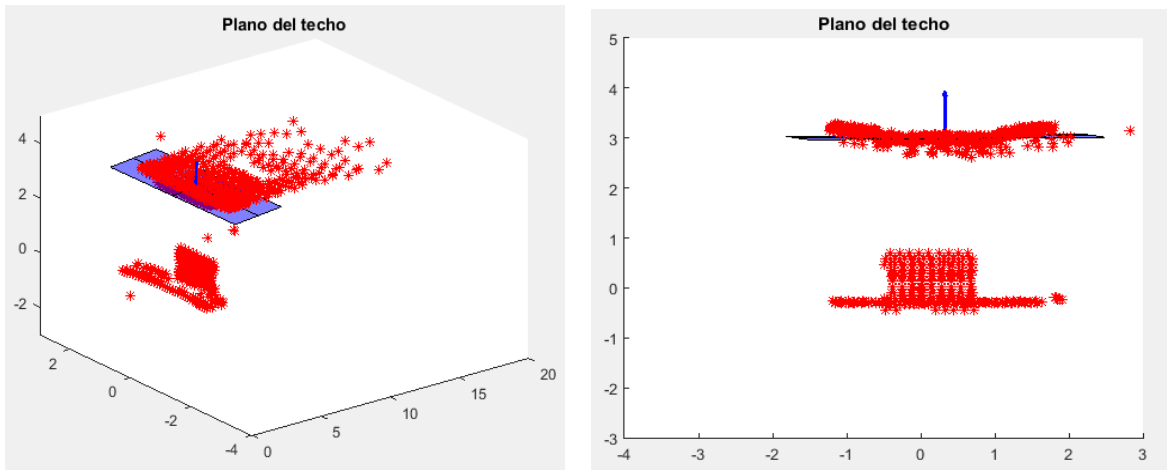
Una vez explicado el proceso para la adquisición de los distintos planos solo queda llevarlo a la práctica. En las imágenes 5.18 y 5.19 se muestran los planos, junto con sus vectores normales, ya conformados de las paredes laterales y la eliminación de aquellos puntos que se encuentren incluidos. De igual forma, las gráficas 5.20 y 5.21 descubren la obtención del plano del techo junto con su posterior filtrado.



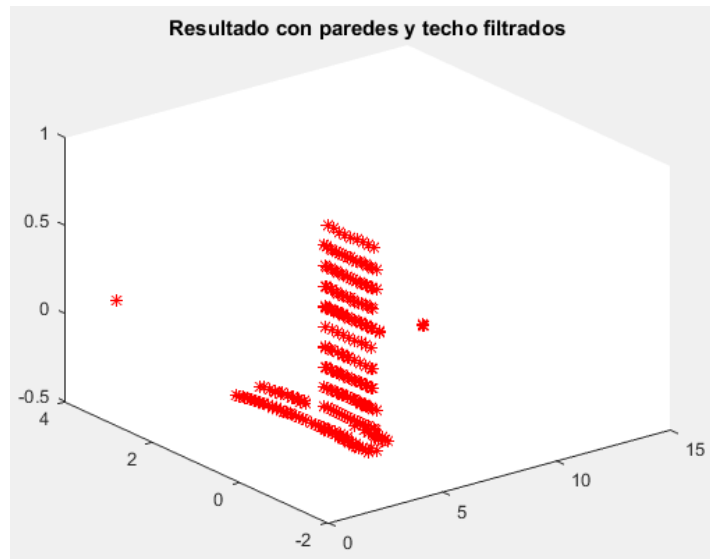
Grafica 5.18. Planos resultantes de las paredes.



Grafica 5.19. Filtrado de las paredes.

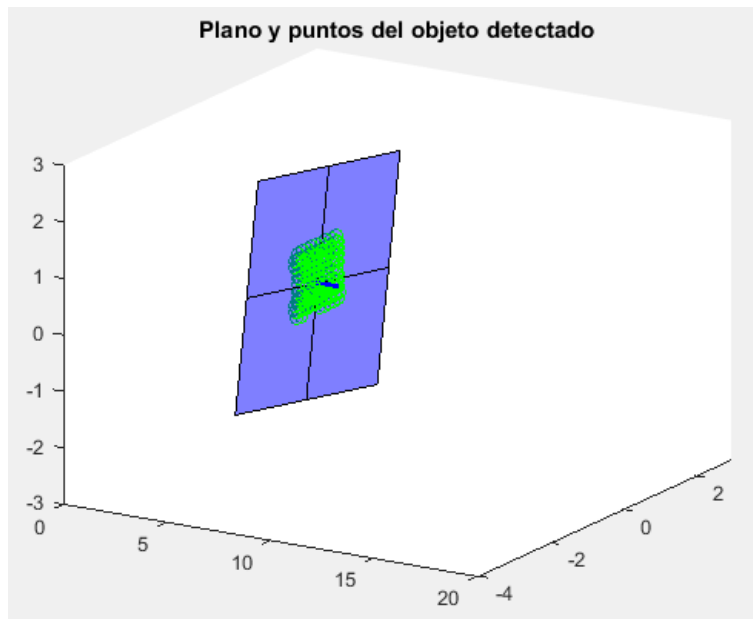


Grafica 5.20. Plano del techo.



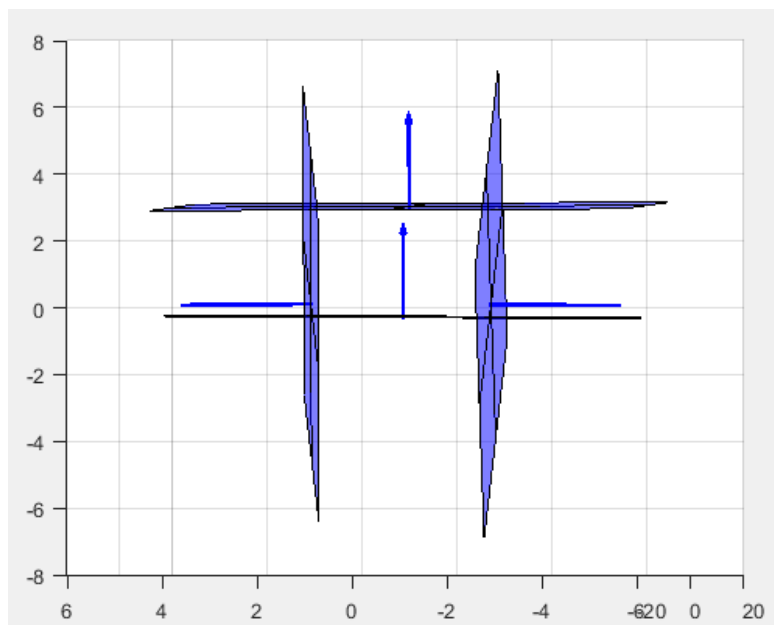
Grafica 5.21. Resultado con paredes y techo filtrados.

Ya solo faltaría filtrar los puntos que constituyan el suelo para finalizar el proceso. Con todo ello ya se obtendría el resultado final de esta técnica, el cual se visualiza en la gráfica 5.22.



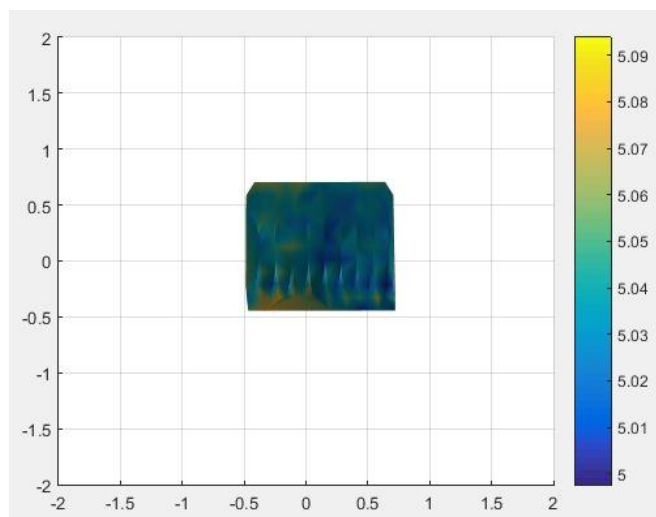
Grafica 5.22. Plano resultante del objeto.

La red cubica que constituye el entorno del sistema a aislar (grafica 5.23) puede ser empleada para filtrar los objetos de todos los ensayos realizados en esas condiciones, es decir, aquellos que se hayan ejecutado en el pasillo descrito.



Grafica 5.23. Conjunto de planos que constituyen el entorno a filtrar.

También el usuario puede tener la opción de obtener una imagen solida del propio objeto, aunque esto no tenga ningún uso dentro del trabajo en sí.



Grafica 5.24. Imagen sólida del objeto detectado.

Se observa una leyenda situada a la derecha de la imagen 5.24, la cual permite ver a que distancia se encuentran los distintos puntos que componen el objeto respecto al origen, es decir, el dispositivo LIDAR.

Por último, en la tabla 5.3 se exponen los resultados cuantitativos de los parámetros respectivos al objetivo final: el área del elemento, la distancia y el número de puntos adquiridos.

Parámetros	Filtrado 3	Datos reales
Altura (m)	1.1518 ± 0.121 <b>Error absoluto:</b> 0.1518 m <b>Error relativo:</b> 15.18 %	1
Anchura (m)	1.2099 ± 5.85x10 <sup>-3</sup> <b>Error absoluto:</b> 0.099 m <b>Error relativo:</b> 8.25 %	1.2
Área (m <sup>2</sup> )	1.3936 ± 0.146	1.2
Distancia (m)	5.0339	5
Número de puntos	230	-

Tabla 5.3. Comparación entre resultados obtenidos y reales.

Como conclusión de este método se puede tomar la precisión de los parámetros calculados respecto a los reales, así como un mayor número de puntos recibidos, aunque las medidas que se sitúen en la parte central de la lámina no sean útiles para el dimensionado.



### 5.3. Elección de la técnica de filtrado

Ya conocidos las distintas técnicas de filtrado es necesario realizar una comparación de todas ellas para elegir la idónea a emplear en el proceso de detección y aislamiento del objeto. La tabla 5.4 muestra la comparativa entre los parámetros cuánticos calculados de todos los procesos descritos en los apartados anteriores.

Parámetros	Filtrado 1	Filtrado 2	Filtrado 3
Altura (m)	$1.168 \pm 0.121$	$1.083 \pm 0.121$	$1.1518 \pm 0.121$
	<b>Error absoluto</b> 0.168 m	<b>Error absoluto</b> 0.083 m	<b>Error absoluto</b> 0.1518 m
	<b>Error relativo</b> 16.8 %	<b>Error relativo</b> 8.3 %	<b>Error relativo</b> 15.18 %
Anchura (m)	$1.208 \pm 5.85 \times 10^{-3}$	$1.1996 \pm 5.85 \times 10^{-3}$	$1.2099 \pm 5.85 \times 10^{-3}$
	<b>Error absoluto</b> 0.08 m	<b>Error absoluto</b> $4 \times 10^{-4}$	<b>Error absoluto</b> 0.099 m
	<b>Error relativo</b> 6.67 %	<b>Error relativo</b> 0.033 %	<b>Error relativo</b> 8.25 %
Área (m <sup>2</sup> )	$1.4109 \pm 0.146$	$1.2995 \pm 0.145$	$1.3936 \pm 0.146$
Distancia (m)	5.032	5.032	5.0339
Número de puntos	239	203	230

Tabla 5.4. Comparación de resultados entre las tres técnicas de filtrado.

Con respecto a dicha comparación, se observa que la diferencia entre cada uno de los valores de filtrado respecto a los reales no es muy significativa, si bien el método 2D utiliza menos spots.

Con todo, hay un factor a tener en cuenta para la elección entre métodos. En las dos primeras técnicas de filtrado, al final del proceso se seguía obteniendo cierto ruido en la imagen. Para eliminarlo se empleaban métodos que dependían de la relación entre el número de puntos del objeto y el número de puntos ajenos a él, lo cual puede ser un

problema a la hora de escoger un elemento a detectar más pequeño que el del ejemplo o de alejar la propia lamina, adquiriendo un menor número de medidas y pudiendo dar errores en el resultado final.

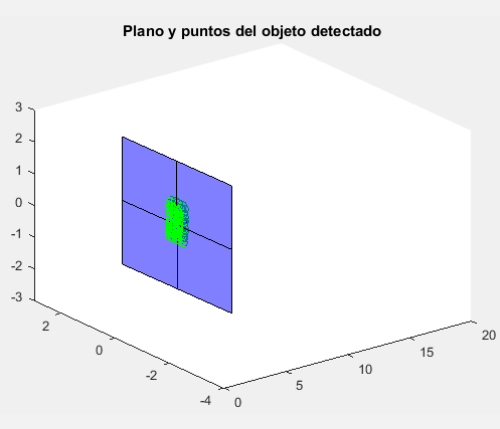
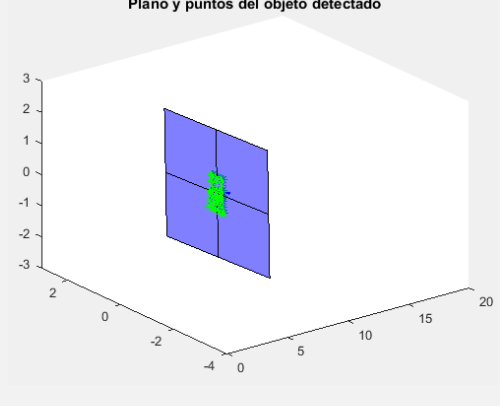
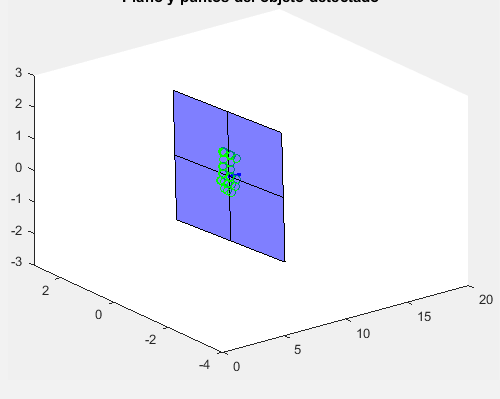
Esta complicación queda resuelta mediante el filtrado por caracterización de planos, ya que, al poder describir mediante ecuaciones toda componente planar que se encuentre dentro del sistema, se logra eliminar o almacenar fácilmente la información que se necesite sin alcanzar ningún tipo de ruido a su alrededor al final del procedimiento, lo que, aparte de optimizar todo el análisis, también permite manejar las mediciones y saber su ubicación incluso a distancias lejanas al dispositivo.

Por lo que, para concluir esta elección, el plan elegido seria el tercer filtrado (por planos) descrito en el apartado 5.2.3.

## 5.4. Resultados obtenidos

Ahora solo queda aplicar dicho procedimiento a todos los ensayos realizados para poder comparar los resultados que se vayan calculando con los reales y, de esta forma, saber si se han alcanzado los objetivos propuestos al principio del TFG.

La tabla 5.5 muestra las conclusiones analíticas de los ensayos ejecutados para una única plancha de poliespán de 1x0.6 mm.

Distancia del objeto	Parámetros resultantes	Gráfica
5 metros	<p><b>Distancia:</b> 5.0566 m</p> <p><b>Altura:</b> 1.1545±0.121 m  <b>Error absoluto:</b> 0.1545 m  <b>Error relativo:</b> 15.45 %</p> <p><b>Anchura:</b> 0.5697±5.85x10<sup>-3</sup> m  <b>Error absoluto:</b> 0.0303 m  <b>Error relativo:</b> 5.05 %</p> <p><b>Área:</b> 0.6576 ± 0.069m<sup>2</sup></p> <p><b>Número de puntos:</b> 113</p>	<p>Plano y puntos del objeto detectado</p> 
7.5 metros	<p><b>Distancia:</b>7.5486 m</p> <p><b>Altura:</b> 1.0210 ± 0.18 m  <b>Error absoluto:</b> 0.021 m  <b>Error relativo:</b> 2.1 %</p> <p><b>Anchura:</b> 0.5820±8.77x10<sup>-3</sup> m  <b>Error absoluto:</b> 0.018 m  <b>Error relativo:</b> 3 %</p> <p><b>Área:</b> 0.5942 ± 0.105 m<sup>2</sup></p> <p><b>Número de puntos:</b> 56</p>	<p>Plano y puntos del objeto detectado</p> 
10 metros	<p><b>Distancia:</b>10.0388 m</p> <p><b>Altura:</b> 1.1315 ± 0.24 m  <b>Error absoluto:</b> 0.1315 m  <b>Error relativo:</b> 13.15 %</p> <p><b>Anchura:</b> 0.5690 ± 0.012 m  <b>Error absoluto:</b> 0.031 m  <b>Error relativo:</b> 5.17 %</p> <p><b>Área:</b> 0.6448 ± 0.137 m<sup>2</sup></p> <p><b>Número de puntos:</b> 40</p>	<p>Plano y puntos del objeto detectado</p> 

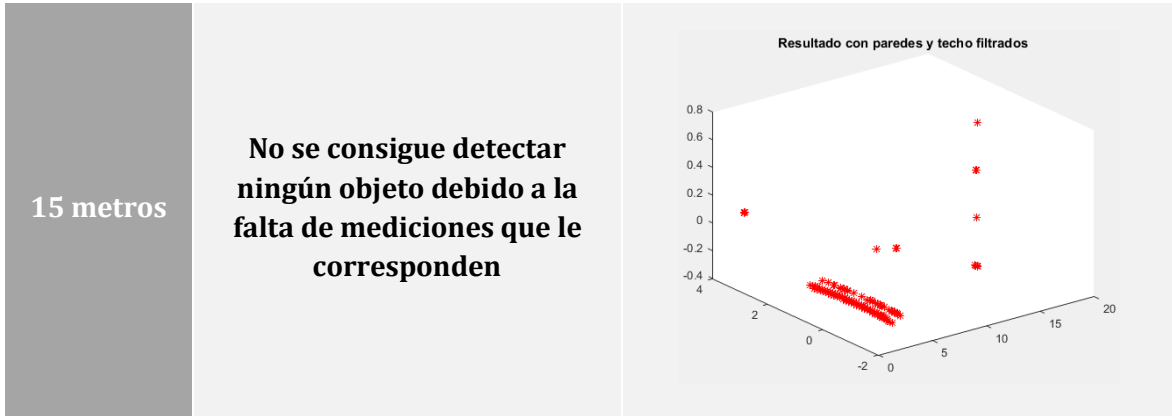


Tabla 5.5. Resultados de la simulación de los ensayos con una única lamina.

Antes de continuar exponiendo los resultados finales del filtrado de los distintos ensayos consta añadir, al observar los valores obtenidos en el ensayo a 15 metros de la tabla 5.5 como estos no son coherentes debido a los pocos puntos que se han conseguido adquirir de la plancha, no pudiendo fijar de una forma clara el área de esta con ayuda de un plano y cometiendo errores en el filtrado del modelado.

La tabla 5.6 muestra las conclusiones analíticas de los ensayos ejecutados para dos láminas de poliespán juntas con las mismas características que el objeto anterior, por lo que se detecta un elemento de  $1 \times 1.2 \text{ m}^2$ . La comparación se ha de centrar en los valores de altura y anchura, y no del área, del objeto; ya que pueden compensarse (por defecto o por exceso) los errores en una dimensión para obtener el valor en dos dimensiones.

Distancia del objeto	Parámetros resultantes	Grafica
5 metros	<p><b>Distancia:</b> 5.0339 m</p> <p><b>Altura:</b> <math>1.1518 \pm 0.121 \text{ m}</math>  <b>Error absoluto:</b> 0.1518 m  <b>Error relativo:</b> 15.18 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>1.2099 \pm 5.85 \times 10^{-3} \text{ m}</math>  <b>Error absoluto:</b> 0.0099 m  <b>Error relativo:</b> 0.825 %</p> <p><b>Área:</b> <math>1.3936 \pm 0.146 \text{ m}^2</math></p> <p><b>Número de puntos:</b> 230</p>	

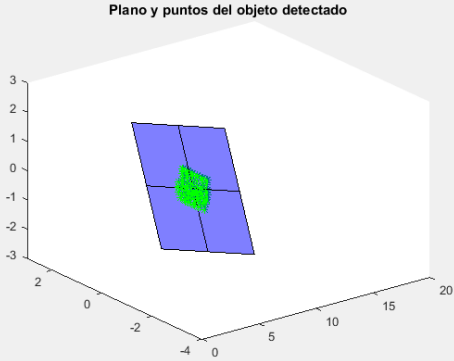
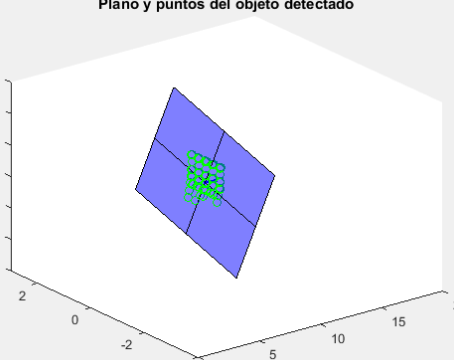
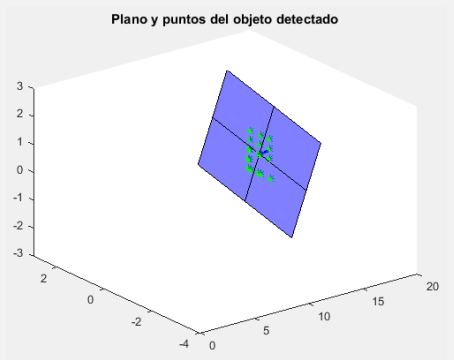
7.5 metros	<p><b>Distancia:</b> 7.5346 m</p> <p><b>Altura:</b> 1.1887±0.18 m  <b>Error absoluto:</b> 0.1887 m  <b>Error relativo:</b> 18.87 %</p> <p><b>Anchura:</b> 1.0213±8.77x10<sup>-3</sup> m  <b>Error absoluto:</b> 0.1787 m  <b>Error relativo:</b> 14.89 %</p> <p><b>Área:</b> 1.214 ± 0.216 m<sup>2</sup></p> <p><b>Número de puntos:</b> 113</p>	<p>Plano y puntos del objeto detectado</p> 
10 metros	<p><b>Distancia:</b> 10.028 m</p> <p><b>Altura:</b> 1.3572 ± 0.24 m  <b>Error absoluto:</b> 0.3572 m  <b>Error relativo:</b> 35.72 %</p> <p><b>Anchura:</b> 1.1592± 0.012 m  <b>Error absoluto:</b> 0.0408 m  <b>Error relativo:</b> 3.4 %</p> <p><b>Área:</b> 1.5733 ± 0.279 m<sup>2</sup></p> <p><b>Número de puntos:</b> 82</p>	<p>Plano y puntos del objeto detectado</p> 
15 metros	<p><b>Distancia:</b> 15.2859 m</p> <p><b>Altura:</b> 1.358 ± 0.365 m  <b>Error absoluto:</b> 0.358 m  <b>Error relativo:</b> 35.8 %</p> <p><b>Anchura:</b> 0.9161± 0.175 m  <b>Error absoluto:</b> 0.0839 m  <b>Error relativo:</b> 8.39 %</p> <p><b>Área:</b> 1.2642 ± 0.335 m<sup>2</sup></p> <p><b>Número de puntos:</b> 20</p>	<p>Plano y puntos del objeto detectado</p> 

Tabla 5.6.Resultados de la simulación de los ensayos con doble lamina

La tabla 5.7 muestra las conclusiones analíticas de los ensayos ejecutados para dos láminas de poliespán juntas con las mismas características que el objeto anterior, la diferencia principal con las pruebas de la tabla 5.6 es el ángulo de giro introducido sobre el eje Z del propio elemento, siendo este 45 y 315 grados.

Angulo de giro real	Parámetros resultantes	Grafica
45 grados	<p><b>Distancia:</b> 5.0095 m</p> <p><b>Altura:</b> <math>0.8434 \pm 0.121</math> m  <b>Error absoluto:</b> 0.1516 m  <b>Error relativo:</b> 15.16 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>1.3022 \pm 5.85 \times 10^{-3}</math> m  <b>Error absoluto:</b> 0.1022 m  <b>Error relativo:</b> 8.517 %</p> <p><b>Número de puntos:</b> 160</p> <p><b>Angulo de giro:</b> 39.477 grados</p>	<p>The figure is a 3D plot titled "Plano y puntos del objeto detectado". It shows a blue rectangular plane in a 3D coordinate system. The axes are labeled with values: the vertical axis ranges from -3 to 3, the horizontal axis from -2 to 20, and the depth axis from -4 to 15. A cluster of green points is visible on the plane.</p>
-45 grados	<p><b>Distancia:</b> 4.9744 m</p> <p><b>Altura:</b> <math>0.8296 \pm 0.121</math> m  <b>Error absoluto:</b> 0.1704 m  <b>Error relativo:</b> 17.04 %</p> <p><b>Anchura:</b> <math>1.3423 \pm 5.85 \times 10^{-3}</math> m  <b>Error absoluto:</b> 0.1423 m  <b>Error relativo:</b> 11.86 %</p> <p><b>Número de puntos:</b> 166</p> <p><b>Angulo de giro:</b> -41.5970 grados</p>	<p>The figure is a 3D plot titled "Plano y puntos del objeto detectado". It shows a blue rectangular plane in a 3D coordinate system. The axes are labeled with values: the vertical axis ranges from -3 to 3, the horizontal axis from -2 to 20, and the depth axis from -4 to 15. A cluster of green points is visible on the plane.</p>

Tabla 5.7. Resultados de la simulación de los ensayos con rotación sobre eje Z.

## 6. Conclusiones

---

En este apartado se resumen las conclusiones obtenidas y se proponen futuras líneas de investigación que se deriven del trabajo realizado.

### 6.1. Conclusiones finales

En el presente TFG se ha empleado un dispositivo LIDAR YVT-X002 para la detección y reconocimiento de objetos en un entorno conocido. Para ello, se aísla el elemento detallando el área de estudio y calculando a su vez tanto la distancia a la que se sitúa como las dimensiones de este.

Además de comprender y poner a funcionar el LIDAR, se han analizado e implementado diferentes técnicas de filtrado previo a la determinación de las dimensiones del objeto bajo estudio, tanto de forma simulada como experimental (ver apéndice B).

*Errores cometidos en los cálculos realizados:* debido a que la obtención de las mediciones del entorno se realiza mediante un barrido sinusoidal, aun configurando el sensor en modo entrelazado (4 barridos desfasados), se puede observar como hay una mayor concentración de muestras en los extremos verticales del recorrido que en el centro, lo da lugar a errores influidos por el tamaño del objeto a detectar, la distancia a la que se ubique y la posición del propio sensor, ya que no se adquieren los mismo resultados si variamos la altura de este respecto del suelo. Dicho error depende de la resolución angular horizontal (lineal) y vertical (no lineal), por lo que se puede calcular según las ecuaciones 2 y 3 correspondientes al apartado 2.1.5. Es importante tener en cuenta este factor dentro de cada ensayo, ya que este fija una zona de tolerancia dentro de la que se debe encontrar los parámetros calculados.

*Comparación principal entre valores experimentales y teóricos:* Observando las tablas del apéndice B y comparando los resultados finales respectivos a los dos procedimientos se llega a la conclusión de que la experimentación se ajusta de forma aceptable para el caso bajo estudio a la simulación previa realizada. En alguno de los ensayos experimentales se aprecia que se sobrepasa el valor real de la altura debido a que puntos del suelo se han identificado como parte del objeto,

*Efecto del tamaño del objeto a detectar:* Como es lógico, empleando como ejemplo de explicación de este apartado las pruebas realizadas, cuando se escoge una única plancha de poliespán, a partir de los 10 metros no se consigue calcular debidamente sus dimensiones ni identificar dicho elemento ya que el número de medidas recibidas es demasiado pobre, mientras que si doblamos su anchura, se dobla proporcionalmente el número de puntos recibidos, consiguiendo de esta forma identificar el objeto correctamente y definirlo mediante las ecuaciones de un plano a diferencia que en el caso anterior, aunque se sigan

cometiendo errores en el dimensionado. Esto nos puede llevar a determinar, en función del tamaño del objeto bajo estudio, cuál es la distancia máxima de observación.

*Efecto de la distancia al sensor:* De igual manera que con el tamaño, en todos los ensayos en los cuales se ha variado este factor se contempla como a cuanto más distancia se sitúe el objeto del origen mayor será el error cometido, pudiendo incluso no ser identificado. Este hecho es debido a la resolución angular del sensor, ya que su rango de detección se va abriendo cuanto mayor sea la distancia a la que se coloque. Por ejemplo, para una distancia de 5 metros el dispositivo sería capaz de captar correctamente un objeto de hasta 3.3 metros de altura como máximo, a partir de ese valor los elementos estarían fuera del rango, mientras que, si se sitúa a 15 metros, el elemento podría llegar a alcanzar hasta los 11 metros de altura.

Otro aspecto a tener en cuenta sería la forma del propio objeto. En todos los ensayos se han empleado elementos rectangulares, facilitando así su identificación, pero si se escogiese un objeto, por ejemplo, cilíndrico, debería analizarse de una forma distinta a la explicada. Una solución para ello sería la creación de patrones para distintas formas, de manera que cuando se ejecuten los ensayos con el objeto elegido sin importar su volumen o forma se pueda identificar introduciendo en el programa de filtrado el patrón correspondiente.

*Efecto de la orientación del objeto:* Es importante para alcanzar el objetivo principal del TFG saber si el objeto que está siendo detectado se encuentra perpendicular al eje objeto-sensor o rotado respecto a su eje Z, ya que este hecho lleva a errores en el cálculo de la anchura. Desde el punto donde se encuentra ubicado el sensor y observando de frente el entorno (plano YZ) un objeto planar rotado se vería como si estuviese colocado perpendicularmente al dispositivo, pero su anchura habría disminuido claramente. Por ello es necesario calcular el ángulo de giro y, mediante relaciones trigonométricas ya explicadas, averiguar la verdadera anchura del objeto. Hay que tener en cuenta que todo este procedimiento solo es válido para objetos planares, ya que no tendría ningún sentido conocer si un elemento cilíndrico o esférico se encuentra rotado.



## 6.2. Líneas futuras

Llegados a este punto cabe plantear las siguientes líneas de trabajo que complementen lo realizado en este TFG:

- Aprovechar la información de la intensidad del haz recibido para discriminar entre objetos, además de para filtrar puntos del suelo respecto del objeto bajo estudio.
- Utilizar como objeto a identificar unidades robóticas como el P3-DX disponible en el grupo Geintra.
- Extender el estudio a objetos en movimiento, no solo en condiciones estáticas.
- Proponer alternativas para la identificación de diferentes objetos simultáneamente.
- Desarrollar una aplicación para que el módulo sensorial compuesto por miniPC y LIDAR 3D proporcione datos filtrados de la ubicación (XYZ) del robot. Analizar la viabilidad de obtener también la orientación con respecto al eje Z del objeto.

# Bibliografía

- [1] “YVT-X002 Datasheet”, Hokuyo Autmatic CO.
- [2] “YVT-X002 Sensor Specifications”, Hokuyo Autmatic CO.
- [3] “Manual Volumetric Scanning Sensor Project ver 1.1 Specifications”, Hokuyo Automatic Co.
- [4] “Scanning Laser Range Finder”, Hokuyo Autmatic CO.
- [5] Álvaro Fernández Rincón, “Contribution a la detección y conteo de personas a partir de información de profundidad”, pp 6-8.  
[dspace.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/.../TFG-Fernandez-Rincon-2016.pdf?...1](https://dspace.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/.../TFG-Fernandez-Rincon-2016.pdf?...1)  
[Última visita Julio 2017]
- [6] Mathworks, “Function isoutlier”.  
<https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/isoutlier.html>  
[Última visita Julio 2017]
- [7] Mathworks, “Function fitplane”.  
<https://es.mathworks.com/help/vision/ref/pcfitplane.html>  
[Última visita Julio 2017]
- [8] “Function iscolinear”.  
<http://www.peterkovesi.com/matlabfns/Robust/iscolinear.m>  
[Última visita Julio 2017]



# Apéndice A

## Estructura del programa de recogida de datos

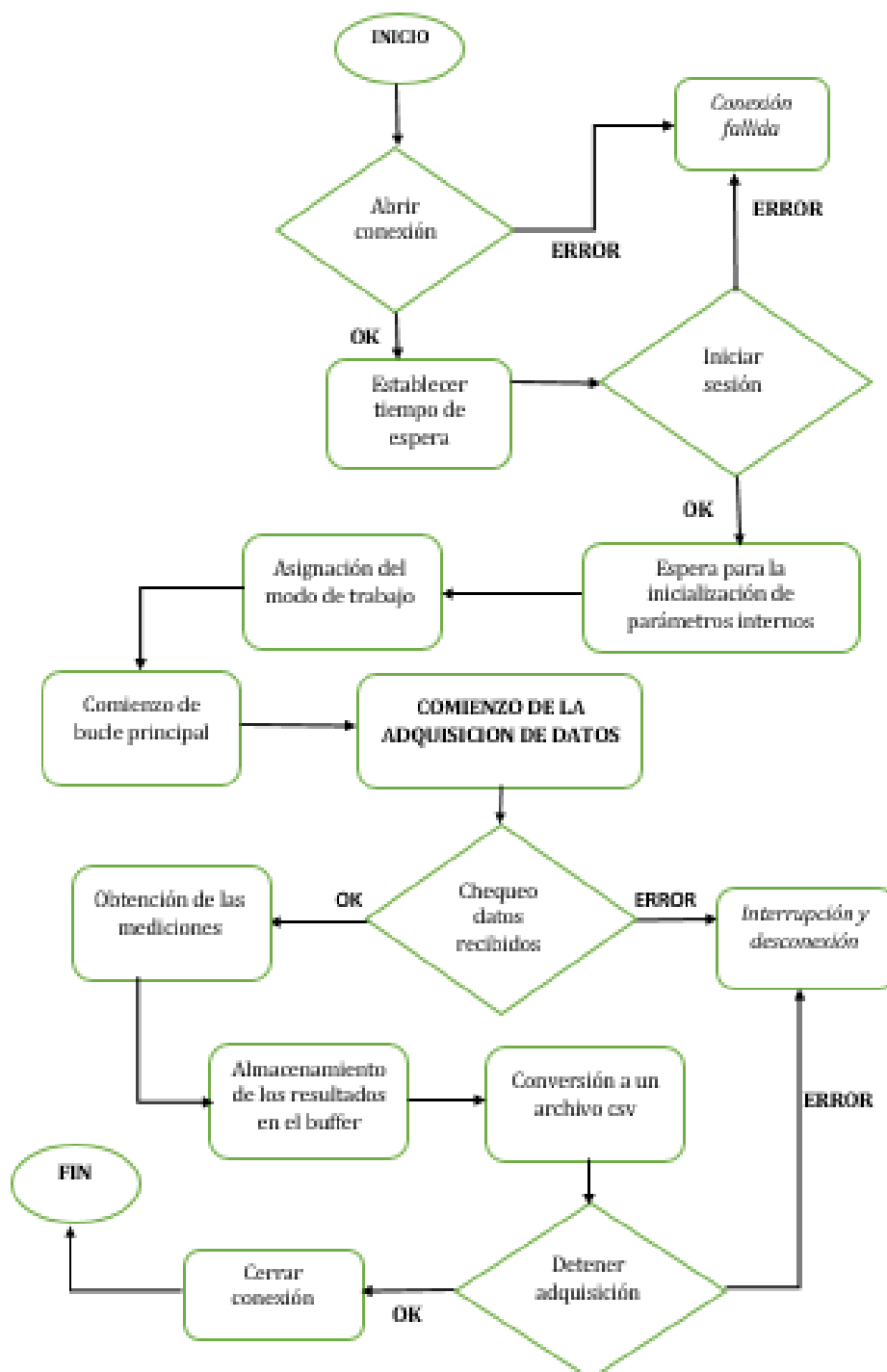


Diagrama 1. Estructura del programa de adquisición de datos.

El diseño de esta aplicación incluye varios procesos subyacentes con los que se debe manejar y controlar en todo momento el LIDAR, si esto no sucede, el propio programa permite recibir por parte del host una señal de error para bloquearlo y conocer el fallo producido en el procedimiento. Ahora se pasará a explicar cada uno de los procesos remarcados en el diagrama anterior:

1. La apertura de conexión se realiza una vez conocidos el número del puerto, que en el caso de este dispositivo siempre se tratará con un valor igual 10940 y su dirección IP, la cual permitirá al usuario realizar dicho enlace mediante el protocolo TCP/IP.
2. Al establecer el tiempo de espera, se le concede al LIDAR el tiempo suficiente para permitir estabilizarlo, ya sea por la alimentación o por la conexión de la alimentación. Este parámetro se establecerá con un valor igual a 2000 ms.
3. Al iniciar la sesión para la recogida de datos, el LIDAR fijará el valor de sus parámetros internos, por ejemplo, todos los valores angulares de cada uno de los puntos para los distintos modos, ya que, como se comentó en el apartado 2 sobre los fundamentos teóricos, estos vienen preestablecidos por unas ecuaciones facilitadas por el propio fabricante.
4. Se ejecutará una espera para dar el tiempo suficiente a que el dispositivo configure todos estos valores internos y así almacenarlos debidamente.
5. Es necesario asignar el modo de trabajo para saber cuanta información se quiere obtener según el uso que se le vaya a dar al dispositivo (modo no-entrelazado o modo entrelazado). Para ello se debe configurar con el comando SET el parámetro interno “\_itl” que establecerá el número de barridos/campos.
6. Comienzo de la adquisición de datos. Con el empiece de este proceso se entra en el bucle principal del programa encargado de las principales tareas a empeñar (obtención, descomposición y almacenamiento de datos).
7. Una vez se adquieran dichos resultados, es imprescindible realizar un chequeo sobre estos para ver si ha podido suceder algún error que nos lleve a una mala interpretación y análisis.
8. Como se ha explicado en ocasiones anteriores, los datos recibidos no solo se componen de los valores correspondientes a distancia o intensidad, también se encuentran formados por una cabecera la cual da información de todos los aspectos de la prueba y de su correcto funcionamiento. Por ello, el siguiente paso es la descomposición de estos para poder trabajar únicamente con los valores que forman parte del modelado digital.
9. Las mediciones adquiridas se almacenan en un buffer principal mediante el uso de una función creada con anterioridad. Estos parámetros guardados incluyen los valores de su posición en coordenadas cartesianas (XYZ) además de la distancia alcanzada sobre cada uno de los puntos con su orientación correspondiente, la

posición de la propia muestra respecto a su periodo o línea (desde 1 hasta 74), el número de línea, barrido y la intensidad del haz tras la captación.

10. El siguiente paso es realizar una conversión para crear un archivo csv y poder llevar los resultados a otro programa para su posterior análisis y estudio.
11. Ahora, ya con las mediciones correctamente almacenadas, se detendrá la adquisición de datos por parte del sensor.
12. Por último, se cierra la conexión entre el host y el PC para así completar el proceso y finalizarlo.



# Apéndice B

## Tablas. Resultados experimentales vs Simulaciones

En este apartado se exponen las comparaciones de los resultados finales entre los ensayos ya filtrados y las soluciones teóricas dadas en simulación, omitiendo los valores de incertidumbre pues son idénticos para las versiones experimental y simulada. En la tabla 1 se encuentran los resultados de la detección de una lámina con las dimensiones ya descritas.

Distancia del objeto	Resultados experimentales	Resultados simulados
5 metros	<b>Distancia:</b> 5.0566 m <b>Altura:</b> 1.1545 m <b>Anchura:</b> 0.5697 m <b>Área:</b> 0.6576 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 113	<b>Distancia:</b> 5 m <b>Altura:</b> 0.9237 m <b>Anchura:</b> 0.5690 m <b>Área:</b> 0.5256 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 111
7.5 metros	<b>Distancia:</b> 7.5486 m <b>Altura:</b> 1.0210 m <b>Anchura:</b> 0.5820 m <b>Área:</b> 0.5942 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 56	<b>Distancia:</b> 7.5 m <b>Altura:</b> 0.892 m <b>Anchura:</b> 0.4866 m <b>Área:</b> 0.4340 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 51
10 metros	<b>Distancia:</b> 10.0388 m <b>Altura:</b> 1.1315 m <b>Anchura:</b> 0.5690 m <b>Área:</b> 0.6448 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 40	<b>Distancia:</b> 10 m <b>Altura:</b> 0.7698 m <b>Anchura:</b> 0.5397 m <b>Área:</b> 0.4154 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 27
15 metros	<b>No se obtienen un filtrado correcto del objeto debido a la poca información.</b>	<b>Distancia:</b> 15 m <b>Altura:</b> 0.7049 m <b>Anchura:</b> 0.4049 m <b>Área:</b> 0.2854 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 10

Tabla 1. Comparación de los valores finales de la detección de una lámina de poliespán



A continuación, en la tabla 2, se halla la comparación de los resultados obtenidos de la detección de dos planchas de poliespán adyacentes.

Distancia del objeto	Resultados experimentales filtrados	Resultados de las simulaciones
5 metros	<b>Distancia:</b> 5.0339 m <b>Altura:</b> 1.1518 m <b>Anchura:</b> 1.2099 m <b>Área:</b> 1.3936 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 230	<b>Distancia:</b> 5 m <b>Altura:</b> 0.9237 m <b>Anchura:</b> 1.1843 m <b>Área:</b> 1.0939 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 218
7.5 metros	<b>Distancia:</b> 7.5346 m <b>Altura:</b> 1.1887 m <b>Anchura:</b> 1.0213 m <b>Área:</b> 1.214 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 113	<b>Distancia:</b> 7.5 m <b>Altura:</b> 0.892 m <b>Anchura:</b> 1.1825 m <b>Área:</b> 1.0548 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 104
10 metros	<b>Distancia:</b> 10.028 m <b>Altura:</b> 1.3572 m <b>Anchura:</b> 1.1592 m <b>Área:</b> 1.5733 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 82	<b>Distancia:</b> 10 m <b>Altura:</b> 0.7698 m <b>Anchura:</b> 1.099 m <b>Área:</b> 0.8460 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 58
15 metros	<b>Distancia:</b> 15.2859 m <b>Altura:</b> 1.358 m <b>Anchura:</b> 0.9161 m <b>Área:</b> 1.2642 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 20	<b>Distancia:</b> 15 m <b>Altura:</b> 0.7049 m <b>Anchura:</b> 0.8845 m <b>Área:</b> 0.6234 m <sup>2</sup> <b>Número de puntos:</b> 24

Tabla 2. Comparación de los valores finales de la detección de dos planchas adyacentes

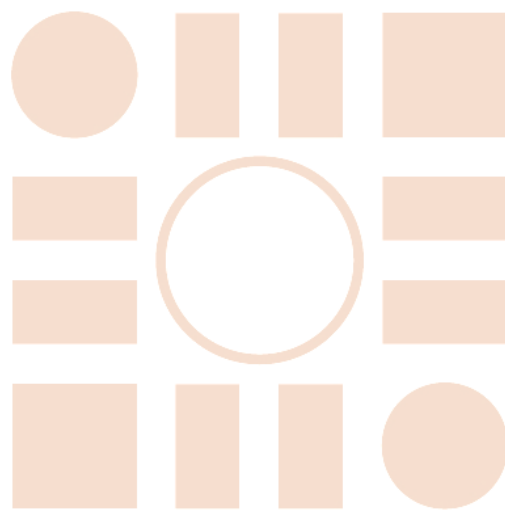
Por último, en la tabla 3. se comparan los valores finales de los aquellos ensayos en los que se incluye una rotación sobre el propio objeto.

Angulo de giro real	Resultados experimentales filtrados	Resultados de las simulaciones
45 grados	<b>Distancia:</b> 5.0095 m <b>Altura:</b> 0.8434 m <b>Anchura:</b> 1.3022 m <b>Número de puntos:</b> 160 <b>Angulo de giro:</b> 39.477 grados	<b>Distancia:</b> 5 m <b>Altura:</b> 0.9730 m <b>Anchura:</b> 1.1793 m <b>Número de puntos:</b> 167 <b>Angulo de giro:</b> 41.826 grados
-45 grados	<b>Distancia:</b> 4.9744 m <b>Altura:</b> 0.8296 metros <b>Anchura:</b> 1.3423 m <b>Número de puntos:</b> 166 <b>Angulo de giro:</b> -41.5970 grados	<b>Distancia:</b> 5 m <b>Altura:</b> 0.9763 m <b>Anchura:</b> 1.1997 m <b>Número de puntos:</b> 161 <b>Angulo de giro:</b> -44.404 grados

Tabla 3. Comparación de los valores finales de los ensayos con rotación incluida.



Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá