
Evaluación de sensores de distancia para aplicaciones de mapeo de entornos con agentes robóticos móviles

Jorge Ricardo Cerón Cheley



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Evaluación de sensores de distancia para aplicaciones de
mapeo de entornos con agentes robóticos móviles**

Trabajo de graduación presentado por Jorge Ricardo Cerón Cheley para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Evaluación de sensores de distancia para aplicaciones de
mapeo de entornos con agentes robóticos móviles**

Trabajo de graduación presentado por Jorge Ricardo Cerón Cheley para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica


Guatemala,

2024


Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

(f) 
M. Sc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f) 
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de febrero de 2025.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo continuo, y no podría haberlo logrado sin el apoyo incondicional de las personas que siempre estuvieron a mi lado a lo largo de este proceso. A mi padre, Jorge, cuyo consejo y ejemplo me han guiado en cada paso, a mi madre, Brenda, por su amor y dedicación, que me ha enseñado a enfrentar los retos con paciencia y fortaleza, y a mi hermana, Camila, por ser mi apoyo emocional constante, saber cómo distraerme cuando lo necesitaba y, sobre todo, por su incansable cariño. Cada uno de ellos ha sido esencial para mi crecimiento personal y académico, y su presencia ha sido un pilar en mi vida durante toda esta carrera.

Quiero expresar también mi sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, el Dr. Luis Alberto Rivera Estrada, quien ha sido una fuente invaluable de conocimiento y motivación. Su disposición constante para resolver mis dudas, su paciencia para guiarme en cada etapa de este proyecto y sus palabras de aliento me han permitido superar obstáculos y continuar avanzando. Sin su apoyo, este trabajo no habría sido posible.

A mis amigos y compañeros de estos cinco años, gracias por compartir este camino lleno de retos, aprendizajes y momentos inolvidables. Su amistad ha hecho que mi experiencia universitaria haya sido mucho más enriquecedora y memorable. También a mis amigos del colegio, quienes siempre han estado presentes, ofreciéndome su apoyo y comprensión a pesar de la distancia. Su apoyo constante es un tesoro que valoro profundamente.

Finalmente, mi agradecimiento se extiende a todos los profesores que, con generosidad, han compartido su conocimiento conmigo. Gracias por extender siempre su mano y respaldarme en cada paso del camino. Su apoyo no solo ha sido crucial para la realización de este trabajo de graduación, sino también para que pudiera enfrentar cada materia con confianza y éxito.

Prefacio	III
Lista de figuras	X
Lista de cuadros	XII
Resumen	XIII
Abstract	XIV
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Generación de trayectorias y mapeo de entornos	3
2.2. <i>Ant Colony Optimization</i> (ACO)	4
2.3. <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	5
2.4. Implementación de algoritmos de inteligencia de enjambre en UVG	5
2.5. Robotat	10
3. Justificación	12
4. Objetivos	13
4.1. Objetivo general	13
4.2. Objetivos específicos	13
5. Alcance	14
6. Marco teórico	16
6.1. Interacción de un robot móvil con su entorno	16
6.2. Modelos probabilístico de movimiento para robots móviles en entornos planos	17
6.3. Robot móvil con tracción diferencial	18
6.4. Localización de robots móviles	19
6.5. Localización y mapeo simultáneo (SLAM)	20
6.6. Filtro de Kalman y filtro de Kalman extendido (EKF)	21

6.7.	<i>Light Detection and Ranging</i> (LiDAR)	22
6.8.	Sensores de distancia por tiempo de vuelo	23
6.9.	Sensores de distancia por triangulación	23
6.10.	Vehículo diferencial <i>Pololu 3pi+ 32U4</i>	24
6.11.	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> (UART)	25
7.	Validación de sensor de distancia tipo láser	27
7.1.	Sensores de distancia tipo láser considerados	27
7.1.1.	Sensor VL53L0X	27
7.1.2.	LiDAR FHL-LD20	28
7.1.3.	YDLIDAR Tmini Pro	28
7.2.	Selección del sensor de distancia tipo láser	29
7.2.1.	Criterios para el <i>trade study</i> de los sensores de distancia tipo láser	31
7.2.2.	Resultados del <i>trade study</i>	36
8.	Lectura e interpretación de datos extraídos del LiDAR FHL-LD20	38
8.1.	Funcionamiento del sensor de distancia FHL-LD20	38
8.1.1.	Características generales	38
8.1.2.	Protocolo de comunicación	39
8.2.	Lectura de datos	41
8.2.1.	Lectura e interpretación de datos mediante ESP32 y Matlab	41
8.2.2.	Lectura e interpretación de datos mediante ESP32 y Python	47
9.	Calibración del LiDAR FHL-LD20	50
9.1.	Desarrollo de plataforma física para pruebas y calibración del LiDAR FHL-LD20	50
9.2.	Calibración de las mediciones del LiDAR FHL-LD20	53
9.3.	Precisión del LiDAR FHL-LD20 después del proceso de calibración	55
10.	Caracterización del LiDAR FHL-LD20	60
10.1.	Depuración de mediciones nulas en el LiDAR FHL-LD20	60
10.2.	Rango de medición efectivo del LiDAR FHL-LD20	63
10.2.1.	Rango mínimo de medición	63
10.3.	Estimación de las varianzas del sensor	67
10.3.1.	Estimación de la varianza asociada a las mediciones de distancia del sensor	67
10.3.2.	Dispersión de las mediciones angulares del sensor	72
11.	Evaluación conceptual para la futura integración del LiDAR FHL-LD20 en agentes robóticos	83
11.1.	Montaje frontal del sensor FHL-LD20	83
11.2.	Montaje superior del sensor FHL-LD20	85
11.3.	Montaje frontal del sensor FHL-LD20 con rueda loca	87
12.	Conclusiones	89
13.	Recomendaciones	91
14.	Bibliografía	92

15. Anexos	95
15.1. Pruebas de rango de medición mínimo	95
15.2. Pruebas para la estimación de la varianza asociada a las mediciones de distancia del sensor	97
15.3. Pruebas para la dispersión de las mediciones angulares del sensor	111
15.4. Enlace al repositorio en GitHub	121

1.	Mapa generado a partir de cuadrícula de probabilidad de colisión con ruta óptima [1]	4
2.	Ruta generada a partir del algoritmo ACO mejorado [3]	5
3.	Desplazamiento del grupo de robots hacia la meta [5]	6
4.	Formación triangular del grupo de robots en la meta [5]	6
5.	Mapa y trayectoria generada para la validación en Webots [7]	7
6.	Secuencia de movimientos del agente móvil para la evasión de obstáculos en Webots [7]	8
7.	Escenario simulado en Webots [8]	9
8.	Puntos de visibilidad de los sensores integrados en el agente robótico móvil en Webots. [8]	9
9.	Espacio de trabajo estimado en exploración de 10 minutos, con planificación de trayectoria hacia su posición inicial de simulación [8]	10
10.	Robotat, laboratorio especializado en experimentación robótica	11
11.	Interacción de un robot con su entorno [12]	17
12.	Sistema de coordenadas de referencia de un robot móvil con tracción diferencial. XOY muestra el marco de referencia mundial. (x_b, y_b) es la coordenada del centro de masa del robot a lo largo de los ejes X_R y Y_R , los cuales representan el sistema local de coordenadas del robot [15]	19
13.	Visualización del proceso de SLAM [12]	21
14.	Funcionamiento LiDAR [18]	23
15.	Diagrama esquemático de un sensor de distancia basado en tecnología de triangulación [20] Nota: La distancia fija H representa la línea base entre el emisor láser y el centro óptico de la lente, mientras que d es la distancia entre la lente y el detector. El ángulo de proyección del haz láser hacia el objeto se denota como α , y el ángulo de recolección β se calcula en función de d y la posición p del punto láser en el detector. La ubicación del punto $[X, Z]^T$ se determina a partir de la línea base H , el ángulo de proyección α , y el ángulo de recolección β	24
16.	Pololu 3pi+ 32U4 OLED Robot [21]	25
17.	Esquema de comunicación UART entre dispositivos [22]	25
18.	Ejemplo de protocolo de trama UART [22]	26

19.	Resultados del <i>trade study</i>	37
20.	Leyenda del gráfico de barras segmentadas	37
21.	Orientación del sensor [25]	39
22.	Esquema de conexión del conector ZH1.5T-4P del LiDAR FHL-LD20 [25] . . .	40
23.	Diagrama de flujo general para captura de datos provenientes del sensor . . .	42
24.	Diagrama de flujo general para procesamiento de datos provenientes del sensor	44
25.	Ejemplificación del proceso de reconstrucción de mediciones: ángulo de inicio	45
26.	Visualización de la primera corrida del sensor: 840 puntos de medición	46
27.	Vista de usuario, interfaz gráfica LiDAR MapViewer	48
28.	Vista frontal de las dos clases de paredes laterales que componen la plataforma de pruebas	51
29.	Vista isométrica de la base de la plataforma de pruebas	51
30.	Vista isométrica del soporte para el LiDAR FHL-LD20	51
31.	Vista isométrica de la plataforma de pruebas	52
32.	Vista superior de la plataforma de pruebas	52
33.	Comparación de la reconstrucción con y sin ángulo de corrección: tres revo- luciones completas capturadas	54
34.	Análisis de la reconstrucción realizada para las aristas horizontales de una caja de 400×400 mm: tres revoluciones completas capturadas	56
35.	Análisis de la reconstrucción realizada para las aristas verticales de una caja de 400×400 mm: tres revoluciones completas capturadas	57
36.	Vista superior de la plataforma de pruebas reconstruida con los ajustes lineales	58
37.	Diagrama de flujo general para procesamiento de datos en formato decimal . .	61
38.	Comparación de la reconstrucción con y sin filtro de mediciones nulas: tres revoluciones completas capturadas	62
39.	Ejemplificación de las lecturas nulas durante la reconstrucción de mediciones: entorno circular de 60 mm de radio	63
40.	Reconstrucciones vacías de tres revoluciones completas capturadas en entorno circular: 60 mm de radio	64
41.	Reconstrucción del entorno circular de 90 mm de radio con tres revoluciones completas capturadas	65
42.	Reconstrucción del entorno circular de 100 mm de radio con tres revoluciones completas capturadas	66
43.	Reconstrucción con 180 revoluciones completas capturadas del entorno circu- lar: 149 mm de radio	68
44.	Reconstrucción del entorno circular de 499 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas	69
45.	Ajuste lineal para la variación de la varianza en función de la distancia	70
46.	Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 149 mm . . .	71
47.	Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 499 mm . . .	72
48.	Variación del sesgo en función de la distancia	72
49.	Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del círculo de obstrucción visual con apertura de aproximadamente 40°	73
50.	Reconstrucción del entorno circular de 149 mm de radio con arco, 180 revo- luciones completas capturadas	73

51.	Reconstrucción del entorno circular de 499 mm de radio con arco, 180 revoluciones completas capturadas	74
52.	Cuatro puntos de referencia principales en las transiciones de geometría	75
53.	Dispersión angular en la última medición del círculo externo antes del arco a diferentes distancias radiales	76
54.	Dispersión angular en la primera medición correspondiente al inicio del arco a diferentes distancias radiales	76
55.	Dispersión angular en la última medición justo antes de finalizar el arco a diferentes distancias radiales	77
56.	Dispersión angular en la primera medición del círculo externo tras concluir el arco. a diferentes distancias radiales	77
57.	Cuatro puntos de referencia principales en las transiciones de geometría	79
58.	Dispersión angular en la última medición del círculo externo antes del arco a diferentes distancias radiales	80
59.	Dispersión angular en la primera medición correspondiente al inicio del arco a diferentes distancias radiales	80
60.	Dispersión angular en la última medición justo antes de finalizar el arco a diferentes distancias radiales	81
61.	Dispersión angular en la primera medición del círculo externo tras concluir el arco. a diferentes distancias radiales	81
62.	Vista isométrica del montaje frontal del sensor FHL-LD20 en Pololu 3pi+	84
63.	Vista isométrica del soporte para el montaje frontal del sensor FHL-LD20	84
64.	Ubicación del centro de gravedad del montaje realizado	85
65.	Vista isométrica del montaje superior del sensor FHL-LD20 en Pololu 3pi+	85
66.	Ubicación del centro de gravedad del montaje realizado	86
67.	Vista isométrica del soporte para el montaje frontal del sensor FHL-LD20	86
68.	Vista isométrica del montaje superior del sensor FHL-LD20 en Pololu 3pi+	87
69.	Ubicación del centro de gravedad del montaje realizado	87
70.	Vista isométrica del soporte para el montaje frontal del sensor FHL-LD20	88
71.	Reconstrucciones vacías de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 70 mm de radio	95
72.	Reconstrucciones vacías de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 8 cm de radio	96
73.	Reconstrucción del entorno circular de 199 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas	97
74.	Reconstrucción del entorno circular de 249 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas	98
75.	Reconstrucción del entorno circular de 299 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas	99
76.	Reconstrucción del entorno circular de 349 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas	100
77.	Reconstrucción del entorno circular de 399 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas	101
78.	Reconstrucción del entorno circular de 449 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas	102
79.	Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 149 mm	103

80.	Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 249 mm . . .	103
81.	Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 299 mm . . .	104
82.	Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 349 mm . . .	104
83.	Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 399 mm . . .	105
84.	Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 449 mm . . .	105
85.	Distribución de las mediciones de distancia radial para un círculo de 399 mm de radio	106
86.	Distribución de las mediciones de distancia radial para un círculo de 449 mm de radio	106
87.	Distribución de las mediciones de distancia radial para un círculo de 499 mm de radio	107
88.	Reconstrucción del entorno circular de 199 mm de radio con arco, 180 revo- luciones completas capturadas	111
89.	Reconstrucción del entorno circular de 249 mm de radio con arco, 230 revo- luciones completas capturadas	112
90.	Reconstrucción del entorno circular de 299 mm de radio con arco, 280 revo- luciones completas capturadas	112
91.	Reconstrucción del entorno circular de 349 mm de radio con arco, 330 revo- luciones completas capturadas	113
92.	Reconstrucción del entorno circular de 399 mm de radio con arco, 380 revo- luciones completas capturadas	113
93.	Reconstrucción del entorno circular de 449 mm de radio con arco, 430 revo- luciones completas capturadas	114
94.	Deltas de la última medición angular capturada para el arco de 129 mm de radio, finalizando a 42°	114
95.	Distribución de la última medición angular capturada para el arco de 129 mm de radio, finalizando a 42°	115
96.	Deltas de la primera medición angular capturada para el arco de 279 mm de radio, iniciando a 47°	115
97.	Distribución de la primera medición angular capturada para el arco de 279 mm de radio, iniciando a 47°	116
98.	Deltas de la última medición angular capturada para el arco de 279 mm de radio, finalizando a 42°	116
99.	Distribución de la última medición angular capturada para el arco de 279 mm de radio, finalizando a 42°	117
100.	Deltas de la primera medición angular capturada para el arco de 379 mm de radio, iniciando a 47°	117
101.	Distribución de la primera medición angular capturada para el arco de 379 mm de radio, iniciando a 47°	118
102.	Deltas de la primera medición angular capturada para el arco de 479 mm de radio, iniciando a 47°	118
103.	Distribución de la primera medición angular capturada para el arco de 479 mm de radio, iniciando a 47°	119
104.	Deltas de la última medición angular capturada para el arco de 479 mm de radio, finalizando a 42°	119
105.	Distribución de la última medición angular capturada para el arco de 479 mm de radio, finalizando a 42°	120

Lista de cuadros

1.	Criterios de comparación	29
2.	Matriz de comparación por pares	30
3.	Escala fundamental de comparación por pares	31
4.	Valores de interés para la comparación	31
5.	Ponderación de costo	32
6.	Ponderación de disponibilidad	32
7.	Ponderación de precisión	32
8.	Ponderación de rango de medición	33
9.	Ponderación de parámetros eléctricos	33
10.	Ponderación de velocidad de medición	34
11.	Ponderación de tamaño	34
12.	Ponderación de masa	34
13.	Ponderación de operatividad en aplicaciones deseadas	35
14.	Ponderación de adaptabilidad a robots móviles	36
15.	Características de los sensores analizados	36
16.	Ponderación individual de los sensores evaluados según criterios establecidos	37
17.	Parámetros de rendimiento	39
18.	Parámetros de conexión del LiDAR FHL-LD20	40
19.	Parámetros de transmisión UART	40
20.	Estructura de un paquete de medición	40
21.	Estadísticas de precisión: valores promedio de distancia, sesgo y varianza muestral obtenidos para cada radio tras las diez corridas realizadas	70
22.	Resumen de extremos locales y globales respecto al valor teórico	78
23.	Resumen de extremos locales y globales respecto al valor teórico para ángulos a 222° y 227°, respecto del eje horizontal positivo	82
24.	Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 149 mm de radio	107
25.	Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 199 mm de radio	108

26.	Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 249 mm de radio	108
27.	Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 299 mm de radio	109
28.	Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 349 mm de radio	109
29.	Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 399 mm de radio	110
30.	Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 449 mm de radio	110
31.	Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 499 mm de radio	111
32.	Estadísticas de precisión: valores mínimo, promedio y máximo de las mediciones angulares en los puntos inicial y final del arco a 42° y 47° respecto al eje horizontal positivo, para los ocho escenarios evaluados	120
33.	Estadísticas de precisión: valores mínimo, promedio y máximo de las mediciones angulares en los puntos inicial y final del círculo externo a 42° y 47° respecto al eje horizontal positivo, para los ocho escenarios evaluados	121
34.	Estadísticas de precisión: valores mínimo, promedio y máximo de las mediciones angulares en los puntos inicial y final del arco a 222° y 227° respecto al eje horizontal positivo, para los ocho escenarios evaluados	121
35.	Estadísticas de precisión: valores mínimo, promedio y máximo de las mediciones angulares en los puntos inicial y final del círculo externo a 222° y 227° respecto al eje horizontal positivo, para los ocho escenarios evaluados	121

Este trabajo de investigación se enfocó en la evaluación de sensores de distancia tipo láser para aplicaciones de mapeo de entornos con agentes robóticos móviles, destacando la importancia de contar con sensores precisos y confiables para la navegación autónoma. A través de un análisis comparativo entre tres sensores de distancia tipo láser: VL53L0X, LiDAR FHL-LD20, y YDLIDAR Tmini Pro, se evaluaron diversos criterios y parámetros técnicos que permitieron seleccionar al sensor LiDAR FHL-LD20 como el más adecuado para su integración en dichas aplicaciones. Adicionalmente, se desarrolló una herramienta de software diseñada para procesar, visualizar e interpretar los datos generados por el sensor seleccionado.

La herramienta no solo facilitó la interpretación de los datos, sino que también se consolidó como un recurso clave para validar el rendimiento del sensor en diversas condiciones operativas. De forma paralela, se llevaron a cabo pruebas de calibración y caracterización del sensor en escenarios específicos. Estas pruebas permitieron definir un rango mínimo de medición efectivo, depurar mediciones nulas, y analizar las distribuciones de las mediciones de distancia y ángulo, revelando que el sensor ofrece mediciones precisas, con desviaciones menores a 5 mm en las distancias y un margen de error inferior a 3° en las mediciones angulares.

Finalmente, se evaluó la viabilidad de integrar el sensor en agentes robóticos móviles disponibles en la universidad. Las contribuciones de esta investigación son significativas, ya que abren el camino para futuras aplicaciones en robótica autónoma y mapeo de entornos dinámicos, aportando herramientas útiles para avanzar en la integración de sensores LiDAR en sistemas robóticos móviles.

This research focused on the evaluation of laser distance sensors for environment mapping applications with mobile robotic agents, emphasizing the importance of precise and reliable sensors for autonomous navigation. Through a comparative analysis of three laser distance sensors: VL53L0X, LiDAR FHL-LD20, and YDLIDAR Tmini Pro, various technical criteria and parameters were assessed, leading to the selection of the LiDAR FHL-LD20 as the most suitable for integration in such applications. Additionally, a software tool was developed to process, visualize, and interpret the data generated by the selected sensor.

The tool not only facilitated data interpretation but also became a key resource for validating the sensor's performance under different operational conditions. Simultaneously, calibration and characterization tests were carried out in specific scenarios. These tests helped define the sensor's minimum effective measurement range, refine data by filtering out null measurements, and analyze the distributions of distance and angle readings, revealing that the sensor provides precise measurements with deviations of less than 5 mm in distances and a margin of error below 3° in angular measurements.

Finally, the feasibility of integrating the sensor into available mobile robotic agents at the University was assessed. The contributions of this research are significant, as they pave the way for future applications in autonomous robotics and dynamic environment mapping, providing valuable tools to advance the integration of LiDAR sensors into mobile robotic systems.

Los avances en la tecnología de sensores y algoritmos de navegación han impulsado de manera significativa el desarrollo de robots móviles autónomos, los cuales son capaces de operar con alta eficiencia en entornos dinámicos y desconocidos. Estos sistemas tienen aplicaciones en diversas áreas, como la logística, la agricultura, la exploración espacial y las operaciones de rescate. Sin embargo, el éxito de estos robots depende en gran medida de su capacidad para percibir y modelar su entorno con precisión.

Este trabajo de investigación abordó la necesidad de evaluar y seleccionar sensores de distancia tipo láser adecuados para aplicaciones de mapeo en sistemas robóticos. Para ello, se analizaron tres modelos de sensores láser, considerando sus características técnicas y su posible integración con agentes robóticos dentro del ecosistema Robotat de la Universidad del Valle de Guatemala. Además, se desarrolló una herramienta de software que permite capturar, procesar y visualizar los datos obtenidos del sensor seleccionado, optimizando su uso para aplicaciones futuras. También se incluyeron pruebas de calibración y caracterización del sensor, en las cuales se establecieron criterios de comparación y evaluación para analizar su desempeño. Este enfoque permitió identificar posibles limitaciones y áreas de mejora, con el fin de optimizar el rendimiento del sensor y garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos.

Un aspecto fundamental de esta investigación fue la selección y evaluación de los sensores de distancia. Para ello, se llevó a cabo un análisis comparativo entre tres modelos de sensores, con el objetivo de identificar cuál es el más adecuado para su integración futura en algoritmos de exploración y mapeo de entornos robóticos. Este análisis garantizó que la selección final maximizara el rendimiento del sensor, tomando en cuenta los criterios más relevantes para la aplicación.

En el desarrollo de la herramienta de software para la lectura e interpretación de los datos del sensor seleccionado, se detalló el formato de los paquetes de datos enviados por el sensor, así como su protocolo de comunicación y las características generales de su funcionamiento. Se hizo énfasis en el uso de software como MATLAB y Python para capturar y procesar esta información de manera eficiente. Además, se presentó la aplicación desarrollada, diseñada para facilitar la interacción del usuario con el sensor.

En la etapa de calibración del sensor, se detallaron las correcciones implementadas para compensar las desviaciones sistemáticas en las lecturas, garantizando que las mediciones reflejen con precisión las dimensiones reales del entorno. Este proceso permitió minimizar las discrepancias en la distancia y el ángulo, aspectos clave en las tareas de navegación robótica y mapeo. Además, se presentó un análisis de los criterios utilizados para evaluar la calibración del sensor. También se destacó el diseño de una plataforma física para las pruebas del sensor LiDAR, la cual incorpora paredes modulares que brindan flexibilidad para evaluar diferentes configuraciones del entorno.

Simultáneamente, se llevó a cabo la etapa de caracterización del sensor, evaluando su fiabilidad en condiciones reales de operación. Se analizaron las variaciones en las mediciones de distancia y ángulo, proporcionando datos sobre los parámetros de incertidumbre necesarios para integrar el sensor en algoritmos de navegación autónoma, como el filtro de Kalman extendido (EKF). Además, se detallaron las pruebas realizadas para evaluar la repetibilidad de los datos obtenidos y los análisis correspondientes. Las pruebas se realizaron en diversos entornos circulares controlados, con el fin de evaluar su rendimiento y la precisión de las mediciones en distintas longitudes.

Finalmente, se presentó una evaluación conceptual de la integración del sensor LiDAR FHL-LD20 en los robots de tracción diferencial Pololu 3pi+. Se incluyeron modelos 3D que ilustraron las posibles configuraciones del sensor, considerando el espacio disponible, la operatividad y las limitaciones inherentes a cada montaje.

En el campo de la robótica móvil, la navegación autónoma desempeña una tarea fundamental para que los sistemas robóticos se desplacen de manera segura y eficiente en entornos dinámicos y desconocidos. Este proceso implica la percepción del entorno mediante sensores, la planificación y ejecución de trayectorias y la toma de decisiones en tiempo real, sin la necesidad de intervención humana directa. Por lo tanto, la exitosa integración de este proceso resulta en una mayor capacidad de adaptación y desempeño de los robots móviles con su entorno, promoviendo la autonomía e independencia de estos sistemas.

2.1. Generación de trayectorias y mapeo de entornos

En [1] se describió un método de construcción para mapeo de entornos basado en un mapa de cuadrícula de probabilidad de colisión y la mejora de un algoritmo A*. Se utilizaron técnicas de probabilidad de colisión que consideraron tanto el tamaño del robot como la posición relativa de este y los obstáculos presentes en la cuadrícula para construir un mapa del entorno. El método permitió encontrar rutas seguras y eficientes al integrar información de probabilidad de colisión en el proceso de construcción de mapas y planificación de rutas desde el nodo de inicio hasta el nodo objetivo. El mapa generado ofrece una cuadrícula en escala de grises indicando la probabilidad de colisión según la cercanía de los obstáculos; cuanto más oscuro el color, más peligroso y cercano se encuentra el obstáculo. En cambio, la cuadrícula blanca representa la zona libre y menos propensa a la colisión.

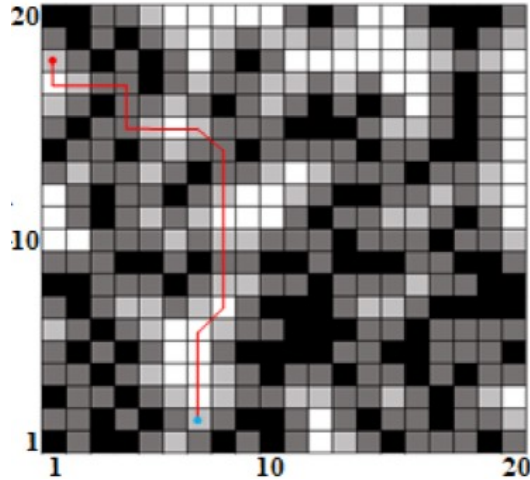


Figura 1: Mapa generado a partir de cuadrícula de probabilidad de colisión con ruta óptima [1]

Además, considera la función de costo del algoritmo A*, minimizando el tiempo de búsqueda de nodos peligrosos en entornos complejos, generando un mapa más completo y reduciendo el tiempo de búsqueda y número de giros en las rutas propuestas. Los resultados de las simulaciones realizadas en Matlab demuestran mejoras en la seguridad ante colisiones y eficiencia de localización de objetos en entornos complejos sobre algoritmos tradicionales. Sin embargo, los autores identifican ciertas limitaciones ante obstáculos dinámicos al momento de mapear el entorno.

En [2] se desarrolló e implementó un algoritmo para el mapeo bidimensional en robots cuadrúpedos utilizando estimaciones de mínimos cuadrados. El algoritmo generado tuvo como finalidad planificar y producir trayectorias de seguimiento que permitieron la evasión de obstáculos en entornos cambiantes. Esto se logró por medio de un radar láser 3D y un sistema de posicionamiento de banda ultraancho (UWB) los cuales proporcionaban datos espaciales y direccionales del entorno en tiempo real. Dicha información fue transformada en un mapa de rejilla 2D donde se estableció la ubicación actual del cuadrúpedo, la presencia de obstáculos y los espacios libres de movimiento. El artículo presentó resultados experimentales que demostraron la precisión del algoritmo en la construcción del entorno y la autonomía del cuadrúpedo al ajustar sus movimientos y trayectorias en tiempo real según diferentes situaciones. Además, se destacó la futura implementación de algoritmos de trayectorias globales y locales para mejorar la reconstrucción del entorno y la estabilidad del sistema de planificación de rutas y navegación espacial.

2.2. *Ant Colony Optimization (ACO)*

En [3] se compararon algoritmos basados en ACO para abordar la problemática de planificación de rutas para robots móviles en entornos complejos. En el artículo se analizaron diferentes parámetros para determinar tanto la convergencia de las trayectorias como la optimización y suavidad de las rutas en diferentes entornos de simulación para cada uno de

los algoritmos propuestos. Además, se destacó la implementación de mecanismos de reacción y supresión de curvas para mejorar el rendimiento y adaptabilidad de estos, resultando en un algoritmo que superó en eficiencia y convergencia las versiones tradicionales de ACO. Los resultados de simulación en MATLAB demostraron que el algoritmo mejorado garantiza que los robots puedan encontrar una trayectoria satisfactoria incluso en situaciones desafiantes.

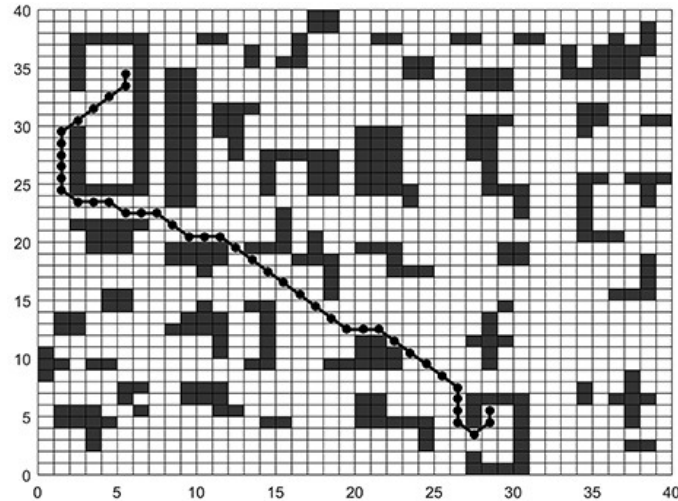


Figura 2: Ruta generada a partir del algoritmo ACO mejorado [3]

2.3. *Particle Swarm Optimization (PSO)*

En [4] se presentó la implementación de PSO para la planificación de rutas de robots móviles en coordenadas polares. Se empleó el algoritmo de optimización por enjambre de partículas como un proceso de búsqueda donde cada agente se movió a través de un espacio bidimensional buscando la mejor ruta desde el punto de inicio hasta el punto objetivo. Durante la ejecución del algoritmo, los agentes se movieron a través del espacio de búsqueda, ajustando su posición y velocidad en función de la información obtenida de su propio desempeño pasado y de la mejor solución global encontrada por otros agentes en el enjambre. Este proceso de búsqueda colectiva permitió que los agentes exploraran el espacio y convergieran hacia soluciones óptimas. Los resultados de simulación demostraron que el algoritmo PSO eliminó puntos de ruta redundantes, optimizando la eficiencia de trayectorias planificadas. Sin embargo, los autores identificaron ciertas limitaciones de escalabilidad en entornos con obstáculos dinámicos.

2.4. **Implementación de algoritmos de inteligencia de enjambre en UVG**

En el trabajo de investigación [5] se desarrolló e implementó un algoritmo de control para sistemas de robots multiagente orientado a misiones de búsqueda, basado en métodos teóricos de grafos y control moderno. Se destacó que la integración de una sola función racional que

combina el control de formación y colisiones permitía que los agentes alcanzaran formaciones con un mínimo error cuadrático medio al utilizar grafos totalmente rígidos. Además, los resultados de la simulación en el entorno de Webots demostraron que los agentes lograron alcanzar la meta en el 80 % de los escenarios considerados, con un 11 % de éxito en control de formación. Esto indicó que el algoritmo propuesto fue efectivo en la coordinación de los agentes, más no fue eficiente en la cantidad de formaciones finales exitosas.

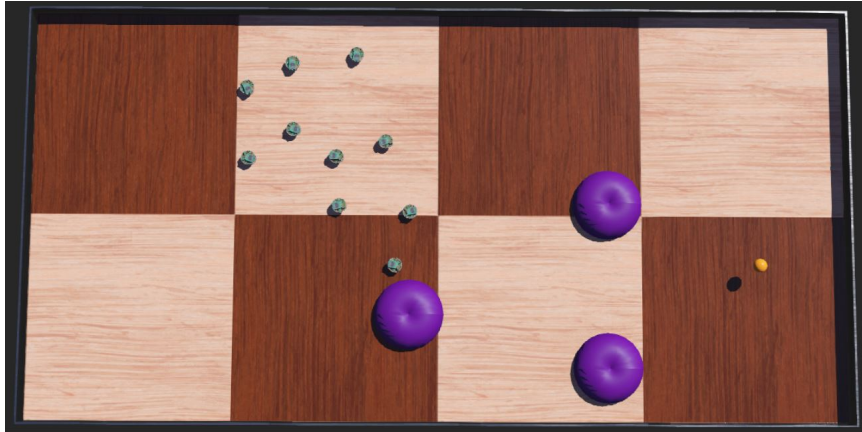


Figura 3: Desplazamiento del grupo de robots hacia la meta [5]

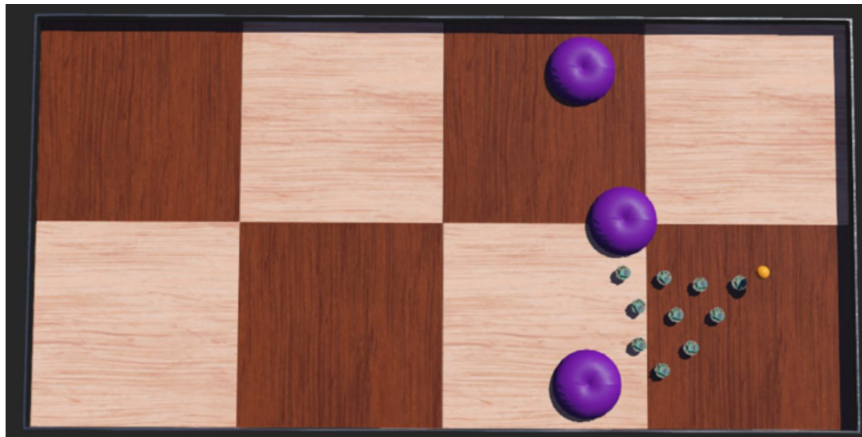


Figura 4: Formación triangular del grupo de robots en la meta [5]

En [6] se desarrolló un algoritmo que determinaba los parámetros más adecuados para mejorar y potenciar el desempeño del algoritmo PSO estándar. Mediante el uso de redes neuronales recurrentes, la herramienta nombrada Deep PSO Tuner, permitió la selección dinámica y automática de los hiper-parámetros que debería de emplear el algoritmo, mejorando la precisión y tiempo de convergencia del mismo. Los resultados de las simulaciones realizadas demostraron que la red neuronal BiLSTM fue la más efectiva, logrando superar obstáculos locales y permitiendo una mayor precisión y rendimiento del algoritmo en diferentes situaciones. No obstante, se mencionaron ciertas limitaciones respecto a la escalabilidad del método y la baja reacción del algoritmo en situaciones con obstáculos dinámicos.

En el trabajo de investigación [7], se propusieron dos algoritmos basados en ACO para

resolver problemas de exploración de terrenos, planificación de trayectorias y evasión de obstáculos. Los algoritmos fueron implementados en Matlab y se realizaron validaciones a nivel de simulación en el entorno de Webots de Cybertbotics. Los resultados de este trabajo evidenciaron que las trayectorias generadas por los algoritmos condujeron a que los agentes móviles evadieran exitosamente los obstáculos presentes en el entorno. Asimismo, las modificaciones realizadas al algoritmo, resultaron en mejoras significativas en la autonomía y rendimiento de los agentes y en la fidelidad de las replicas de los entornos explorados.

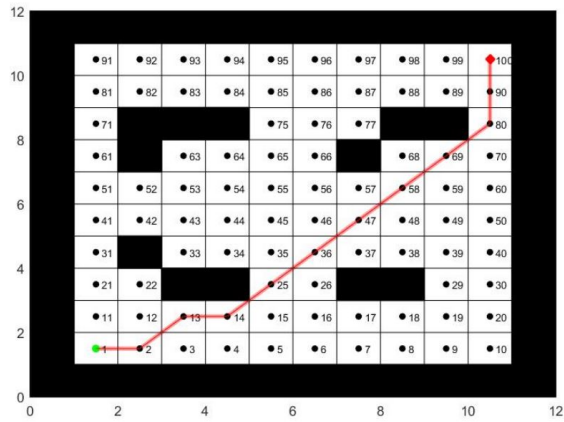


Figura 5: Mapa y trayectoria generada para la validación en Webots [7]

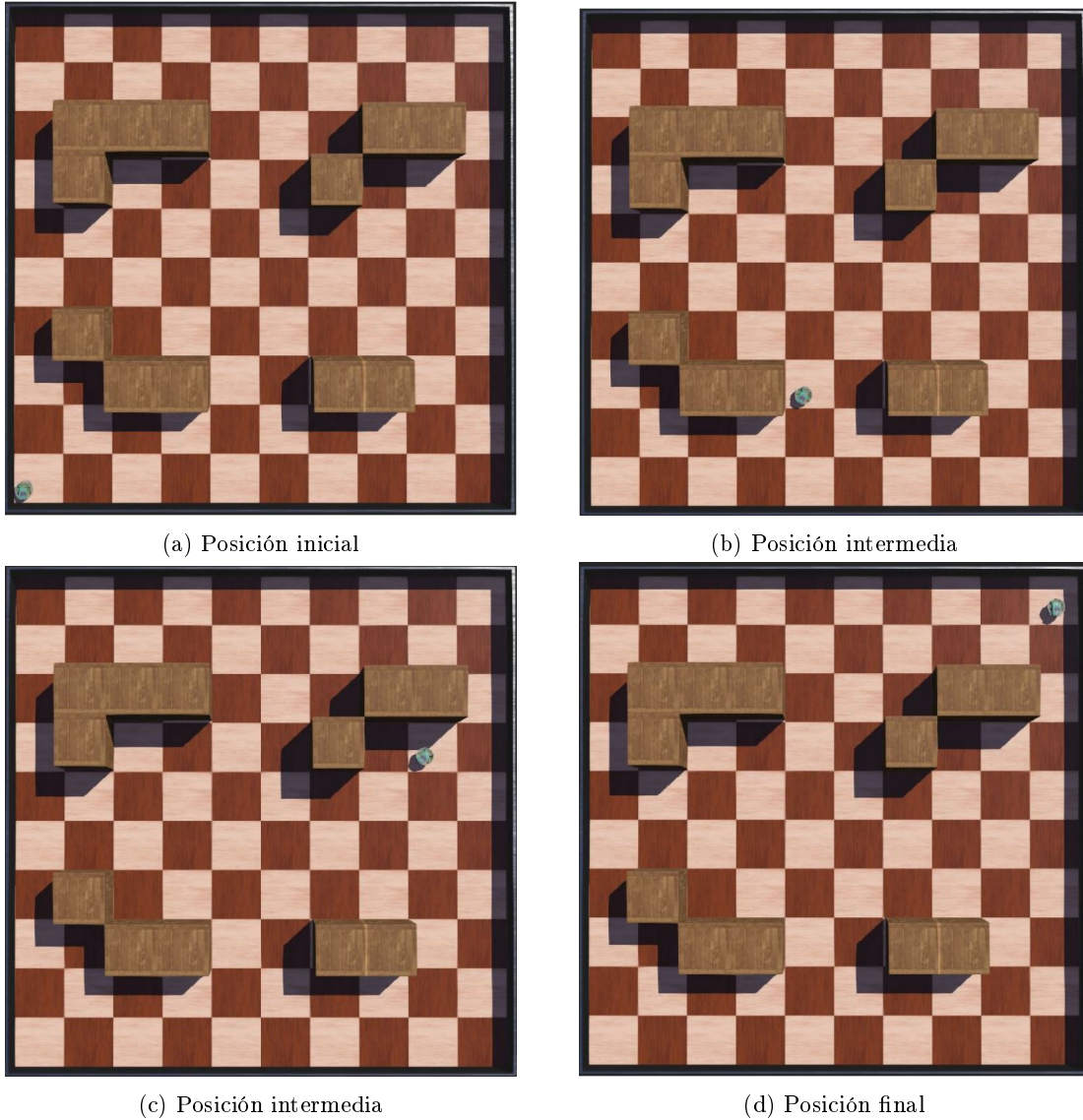


Figura 6: Secuencia de movimientos del agente móvil para la evasión de obstáculos en Webots [7]

En [8] se desarrollaron y evaluaron algoritmos para el mapeo de entornos y generación de trayectorias utilizando sistemas robóticos multiagente. Se enfocó en la implementación simulada de la combinación de tres algoritmos relacionados con la navegación autónoma en robots con tracción diferencial. Estos algoritmos abarcaron la exploración de entornos, el mapeo bidimensional de los mismos y la generación óptima de trayectorias. Para llevar a cabo la validación, se desarrollaron y simularon en Webots distintos escenarios de trabajo que incluían pasillos, espacios abiertos y obstáculos tridimensionales. Estos entornos fueron reconstruidos, de manera individual y colectiva, por agentes robóticos móviles con sensores de distancia integrados: cinco sensores frontales separados por un ángulo de 45 grados entre sí y un único sensor colocado en la parte trasera del vehículo.

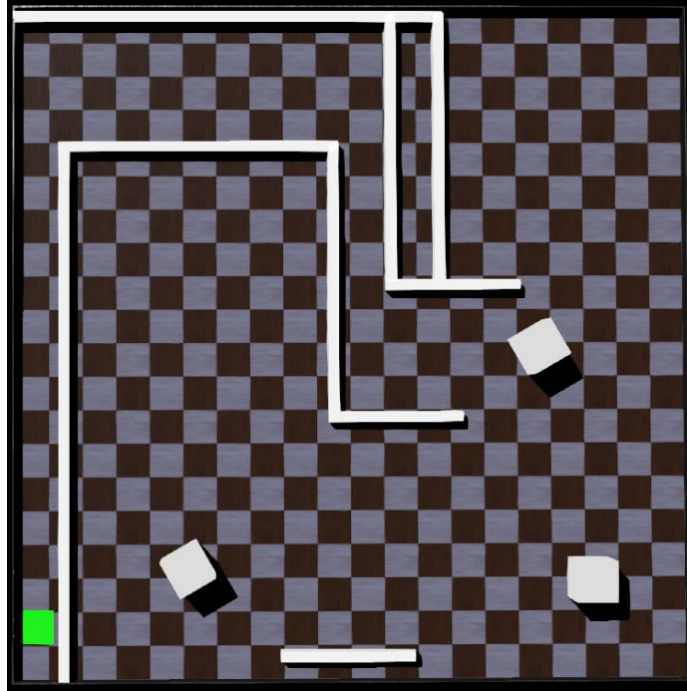


Figura 7: Escenario simulado en Webots [8]

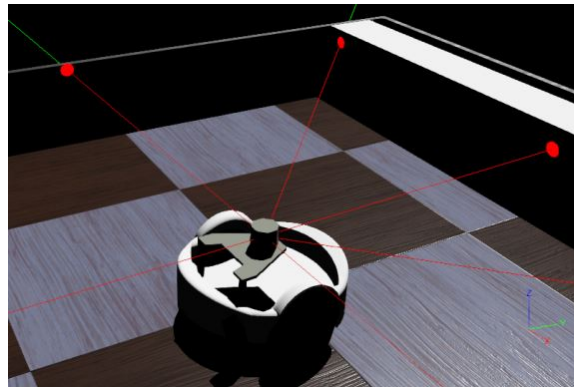


Figura 8: Puntos de visibilidad de los sensores integrados en el agente robótico móvil en Webots. [8]

En las simulaciones computarizadas, se observó que la integración de sensores a distancia tipo láser en lugar de los tipo sonar en los agentes resultaba más precisa y eficaz en la detección de obstáculos, asegurando trayectorias de exploración confiables y no redundantes. Además, se destacó que la disposición e interacción entre estos sensores influía en la capacidad del sistema para obtener una representación precisa del entorno. Se decidió combinar los datos provenientes de todos los sensores delanteros para compensar las limitaciones individuales de cada sensor, obteniendo una buena estimación y reconstrucción del entorno. La precisión en la distribución y disposición de los obstáculos en las estimaciones del espacio de trabajo permitieron el desarrollo y validación del algoritmo de planificación de trayectorias en mapas previamente explorados. Basándose en las validaciones simuladas de los algoritmos desarrollados, el autor recomienda dos sensores de distancia comerciales

para la implementación física de estos algoritmos en futuros estudios. No obstante, se mencionaron ciertas limitaciones respecto a la representación exacta del entorno debido a la falta de información en ciertas áreas por el tiempo de simulación y colisiones recurrentes por obstáculos imprevistos, como la esquina de un obstáculo.

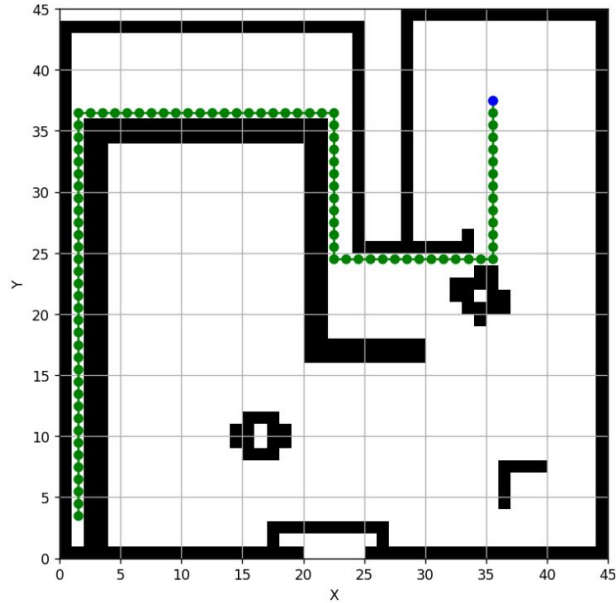


Figura 9: Espacio de trabajo estimado en exploración de 10 minutos, con planificación de trayectoria hacia su posición inicial de simulación [8]

2.5. Robotat

En las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala, se encuentra un laboratorio especializado en la experimentación robótica denominado Robotat. Inspirado en el Robotarium del Instituto de Tecnología de Georgia [9], Estados Unidos, este espacio cuenta con una plataforma de acero blanca de 4.8×3.8 m, rodeada por el sistema de captura de movimiento OptiTrack. Dicho sistema está conformado por seis cámaras de alta precisión y baja latencia, diseñadas para capturar movimiento en tiempo real. Además, el laboratorio dispone de una red WiFi local que permite la comunicación entre los robots. Este entorno ha creado un ecosistema integral de aprendizaje, investigación y desarrollo práctico en el campo de la robótica [10].

En los sistemas de captura de movimiento, el uso eficiente de las cámaras es fundamental para procesar de manera óptima las imágenes obtenidas. En el caso del Robotat, el sistema OptiTrack utiliza marcadores reflectivos de plástico conocidos como marcadores pasivos para calcular con precisión la localización tridimensional de los objetos [11]. Estos marcadores reflejan la luz infrarroja emitida por las cámaras, lo que permite su detección dentro de la plataforma. Además, pueden adherirse a diversos objetos para rastrear su posición dentro del espacio 3D que abarca la plataforma, facilitando un seguimiento detallado y preciso de los movimientos.



Figura 10: Robotat, laboratorio especializado en experimentación robótica

En entornos desconocidos, los robots móviles deben ser capaces de desplazarse de un punto a otro de manera eficiente y segura tomando en cuenta los obstáculos y elementos de interés dentro del área de operación. En los trabajos de fases anteriores se han desarrollado e implementado, a nivel de simulación, algoritmos de exploración para el mapeo de entornos utilizando modelos virtuales de robots con tracción diferencial. El uso de estos algoritmos junto con las estimaciones del entorno han permitido que se evalúe el rendimiento de algoritmos para la planificación de trayectorias en espacios donde se desee llevar a cabo una navegación autónoma. Sin embargo, todos los avances que se han realizado han sido a nivel de simulación en software como Matlab y Webots, por lo que no se ha tenido una validación física de los algoritmos en robots móviles funcionales.

Por esta razón, el enfoque principal de este trabajo es abordar, evaluar y seleccionar opciones de sensores de distancia que permitan la futura validación física de los algoritmos de exploración y mapeo de entornos en agentes robóticos móviles. Se busca verificar que, con los datos capturados del sensor, las estimaciones del espacio de trabajo sean consistentes con las mediciones del espacio en sí. Además, se propone buscar posibles formas de implementación para integrar los sensores de distancia a los robots diferenciales Pololu 3Pi+, lo cual dotaría a los agentes con capacidades adicionales. Esto establecería un precedente con buena base para futuras implementaciones en esta línea de investigación, como lo puede ser el mapeo de entornos físicos dinámicos.

El mapeo de entornos utilizando robots móviles, resulta fundamental en una amplia gama de aplicaciones, desde la logística en el transporte de suministros en ambientes comerciales hasta la exploración de terrenos desconocidos en operaciones de búsqueda y rescate. La capacidad de generar mapas detallados que representen con precisión obstáculos y elementos relevantes, no solo mejora la comprensión del entorno sino que también establece una base sólida para la toma de decisiones y planificación de acciones en situaciones críticas, como desastres naturales. Estos mapas permiten identificar rutas seguras y evaluar riesgos en las operaciones, lo que mitiga los impactos negativos en situaciones de emergencia para los humanos.

4.1. Objetivo general

Evaluar sensores de distancia tipo láser para aplicaciones de mapeo de entornos con agentes robóticos móviles.

4.2. Objetivos específicos

- Seleccionar un sensor de distancia tipo láser que sea factible para investigaciones con robots móviles en el ecosistema Robotat.
- Desarrollar una herramienta de software que permita la obtención e interpretación de los datos provenientes del sensor seleccionado.
- Realizar una caracterización detallada del sensor empleado.
- Desarrollar métodos de prueba y definir criterios de evaluación para la calibración del sensor.
- Evaluar la futura integración del sensor en agentes robóticos móviles disponibles en la Universidad.

El alcance de este proyecto incluyó la selección, evaluación, calibración y caracterización de un sensor LiDAR para su futura integración en un sistema robótico autónomo, específicamente para aplicaciones de mapeo. Se desarrolló una herramienta de software que permitió la captura, procesamiento y visualización de los datos generados por el sensor, optimizando su uso en futuras tareas. Además, se definieron los criterios de evaluación y se realizaron pruebas en diversas condiciones para validar el desempeño del sensor en entornos controlados. El proyecto incluyó un análisis comparativo entre varios sensores, lo que facilitó la elección del más adecuado según los requisitos del sistema.

En cuanto a la calibración y caracterización del sensor, se diseñaron y ejecutaron pruebas controladas para determinar tanto el rango mínimo de medición como la varianza asociada a las mediciones de distancia y ángulo. Se utilizaron círculos de diferentes tamaños, con radios que variaban desde 60 mm hasta un máximo de 500 mm, para estudiar el comportamiento del sensor frente a distintas distancias y evaluar su efectividad. Las pruebas también incluyeron un análisis de la dispersión angular de las mediciones, lo que permitió evaluar el impacto de los cambios geométricos y la obstrucción visual sobre la precisión del sensor. Este análisis resultó clave para garantizar la fiabilidad de las mediciones en aplicaciones de navegación autónoma. Para ambos casos, se realizaron múltiples corridas variando los escenarios circulares con el fin de identificar patrones o tendencias específicas en el comportamiento del sistema.

Se desarrollaron herramientas de software en MATLAB y Python que facilitaron la captura, procesamiento y visualización de los datos del sensor. Estas herramientas fueron fundamentales para evaluar la repetibilidad y precisión de las mediciones en condiciones controladas, así como para la creación de la herramienta final destinada a la interpretación de los datos. No obstante, la comunicación del sensor se realizó exclusivamente mediante cables, lo que limitó la flexibilidad del sistema. Para futuras investigaciones, se sugiere explorar la incorporación de una transmisión de datos inalámbrica, como la que ofrece Wi-Fi, con el fin de mejorar la versatilidad del sistema y facilitar su integración en entornos más dinámicos.

Cabe destacar que esta investigación se centró en una distancia máxima de operación

de 500 mm, acorde con los requerimientos de la aplicación específica. Aunque el sensor es capaz de medir distancias mayores, este aspecto no fue explorado durante el proyecto. A pesar de las limitaciones de tiempo que impidieron ampliar el rango de medición, los resultados obtenidos contribuyen significativamente a la base de conocimientos en el campo de la robótica, beneficiando tanto a la comunidad académica como profesional. Además, aunque se confirmó la viabilidad de integrar el sensor en agentes robóticos móviles, como el Pololu 3pi+, no se realizó una prueba física exhaustiva de los montajes propuestos. No obstante, esta investigación sienta las bases para que, en futuras fases del proyecto, dichos montajes se implementen físicamente, posibilitando el desarrollo de un vehículo explorador específicamente diseñado para el mapeo de entornos.

6.1. Interacción de un robot móvil con su entorno

El entorno o mundo en el que opera un robot se define por su estado, que engloba las condiciones y características tanto del robot mismo como del entorno circundante. Sin embargo, en la práctica, especificar un estado completo es prácticamente imposible para cualquier sistema robótico realista. Esto se debe a que un estado completo abarcaría no solo todos los aspectos del entorno que podrían tener un impacto en el futuro, sino también las propias características y estados internos del propio robot. Por lo tanto, en las implementaciones prácticas se selecciona un pequeño subconjunto de todas las variables de estado para formar un estado representativo y manejable. Esta selección incluye variables como [12]:

- La pose del robot: Comprende su ubicación y orientación con respecto a un marco de coordenadas global. Para un robot móvil en un entorno plano, la pose suele estar constituida por sus dos coordenadas de ubicación en el plano y su orientación de giro (*yaw*) [12].
- La velocidad del robot: En un entorno plano, las velocidades críticas para un robot móvil de dos ruedas son la velocidad lineal y la angular. La velocidad lineal indica cuán rápido avanza el robot en línea recta a lo largo de su trayectoria, mientras que la velocidad angular determina la rapidez con la que el robot gira alrededor de su centro de giro. Esta última se regula ajustando las velocidades angulares de las ruedas izquierda y derecha [12].
- La ubicación y características de los objetos circundantes en el entorno: Este aspecto abarca características como la apariencia visual de objetos, su forma, tamaño, disposición espacial y cualquier otra propiedad relevante para la interacción del robot con su entorno. Estas variables son cruciales para interpretar y comprender la situación del robot en distintos escenarios [12].

Además de lo anterior, se distinguen dos tipos fundamentales de interacciones entre un

robot y su entorno: la influencia del robot en el estado mediante acciones de control de sus actuadores y la recopilación de información del estado a través de los sensores del propio robot. Las acciones de control, como el movimiento del robot y la manipulación de objetos, provocan cambios instantáneos en el estado del entorno lo que demanda una continua adaptación y respuesta por parte del sistema robótico para actualizar las condiciones del mismo. Por otro lado, se utilizan los sensores para capturar información sobre el estado del entorno. Sin embargo, es común que las mediciones de los sensores tengan cierto retraso, por lo que proporcionan una percepción del estado en momentos relativamente anteriores [12].

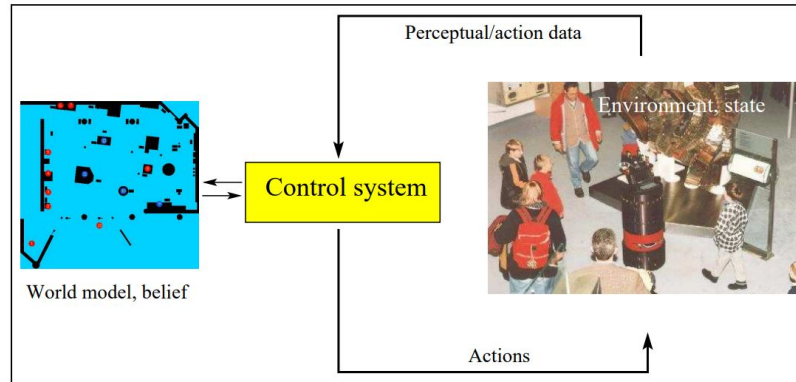


Figura 11: Interacción de un robot con su entorno [12]

6.2. Modelos probabilístico de movimiento para robots móviles en entornos planos

Los modelos probabilísticos de movimiento son empleados en robótica móvil para estimar la posición futura de un robot en función de su movimiento y de las incertidumbres asociadas que puedan influir en su trayectoria como la imprecisión de los sensores, la presencia de fuerzas externas, el ruido, entre otros. Un enfoque comúnmente utilizado es el modelo de movimiento de velocidad, el cual se basa en la relación entre las velocidades lineales y angulares del robot y su ubicación actual en el espacio para predecir su posición futura. Esta metodología en particular ofrece ventajas significativas como su facilidad de implementación y simplicidad para predecir, de manera directa, el movimiento futuro del robot en entornos simples y controlados [12].

Por otro lado, se pueden emplear las mediciones de odometría como base para calcular el movimiento del robot a lo largo del tiempo. La odometría es una técnica utilizada en navegación para estimar la posición y desplazamiento de un vehículo móvil por medio de la medición de las distancias recorridas por sus ruedas o sistemas de locomoción. Este enfoque, conocido como modelo de odometría, integra la información de los encoders en las ruedas para medir la rotación de las mismas y calcular la distancia recorrida. Estas mediciones combinadas con otros datos de orientación son empleados para estimar la posición actual del robot. Sin embargo, este método sufre de errores acumulativos a medida que el robot se desplaza debido a pequeñas desviaciones en la rotación de las ruedas [12].

Alternativamente, existe un modelo más complejo, que considera la cinemática del robot

con la geometría del mismo. El modelo de movimiento cinemático considera la velocidad lineal y angular del robot, junto con la forma y tamaño del mismo para predecir con precisión el desplazamiento y la orientación futura del robot. Este enfoque destaca por su capacidad para capturar el comportamiento del robot en el espacio, ofreciendo una representación más completa del movimiento. Además, su consideración en la geometría proporciona un análisis más profundo en cómo el diseño del robot influye en su movimiento [13].

6.3. Robot móvil con tracción diferencial

Los robots móviles con ruedas (WMRs, por sus siglas en inglés) están compuestos por uno o más cuerpos rígidos equipados con un sistema de locomoción. En términos generales, constan de un cuerpo rígido que funciona como base o chasis, junto con un conjunto de ruedas que les permite moverse sobre el suelo. En un robot móvil de tracción diferencial existen dos ruedas fijas con un eje de rotación común y orientación constante, las cuales se controlan de manera independiente para imponer diferentes valores de velocidad angular y controlar el movimiento lineal del propio robot. Además, estos robots pueden contar con una o más ruedas giratorias de apoyo no motorizadas para proporcionar estabilidad adicional. Es importante destacar que un robot de este tipo puede realizar giros en su propio eje sin necesidad de desplazarse, siempre que las velocidades angulares de las dos ruedas sean iguales y opuestas [14].

En robótica móvil con sistemas de ruedas, se emplea la cinemática diferencial para establecer la relación entre las velocidades de las ruedas del robot y su movimiento en el espacio cartesiano. De esta manera, así como cada rueda contribuye al movimiento general del robot, estas imponen restricciones específicas a la velocidad del mismo. En el caso particular de un robot móvil con tracción diferencial y ruedas fijas, operando en un entorno plano, cada rueda se desplaza únicamente en el plano que la contiene, lo que implica la ausencia de deslizamiento relativo entre la rueda y la superficie, y garantiza que no se produzcan deslizamientos laterales. Estas restricciones, conocidas como restricción de rodadura y restricción de deslizamiento, son fundamentales para definir el modelo cinemático del robot como [15]:

$$\dot{x}_b \cos \theta + \dot{y}_b \sin \theta = \frac{D_L \dot{\theta}_L + D_R \dot{\theta}_R}{4} \quad (1)$$

$$\dot{x}_b \sin \theta + \dot{y}_b \cos \theta = 0 \quad (2)$$

$$2l\dot{\theta} = D_R \dot{\theta}_R - D_L \dot{\theta}_L \quad (3)$$

donde (x_b, y_b) es la coordenada del centro de masa del robot, \dot{x}_b e \dot{y}_b son las velocidades del centro de masa a lo largo de los ejes X_R y Y_R , correspondiente al sistema local de referencia del robot, donde el eje longitudinal X_R apunta hacia adelante en la dirección del movimiento del robot y Y_R es perpendicular al eje longitudinal apuntando hacia la izquierda del robot. θ representa la orientación del robot respecto de su posición inicial en el punto de inicio del movimiento y $\dot{\theta}$ corresponde a la velocidad angular en el sistema del robot. D_R y D_L son los diámetros nominales de las ruedas derecha e izquierda. Las velocidades angulares de cada rueda se denotan por $\dot{\theta}_R$ y $\dot{\theta}_L$. La distancia nominal entre las dos ruedas se representa por l [15].

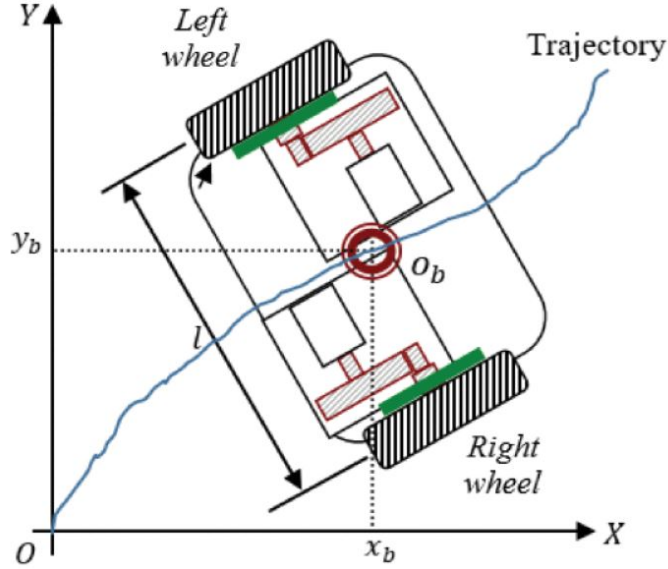


Figura 12: Sistema de coordenadas de referencia de un robot móvil con tracción diferencial. XOY muestra el marco de referencia mundial. (x_b, y_b) es la coordenada del centro de masa del robot a lo largo de los ejes X_R y Y_R , los cuales representan el sistema local de coordenadas del robot [15]

6.4. Localización de robots móviles

En términos de percepción del entorno, la localización de robots móviles constituye uno de los desafíos fundamentales en la robótica. Este desafío se enfoca en determinar la pose de un robot con respecto a un mapa predefinido del entorno en el que opera. Esta información es crucial para permitir que los robots móviles ejecuten tareas autónomas de manera efectiva, tales como la navegación, manipulación de objetos o inspección de entornos [16].

En sí, la localización se refiere al proceso de establecer una correspondencia entre el sistema de coordenadas del mapa mundial con las coordenadas locales del sistema del robot. Conocer esta transformación permite que el robot pueda ubicar objetos de interés en su propio marco de referencia, facilitando su navegación. Sin embargo, la pose del robot no se puede detectar directamente, por lo que se emplea una combinación de diferentes sensores para llevar a cabo la localización de robot como cámaras, LiDAR, sistemas de posicionamiento global, entre otros [16].

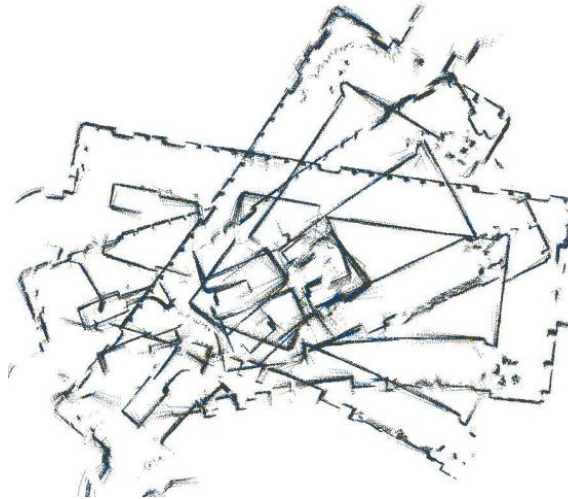
Los problemas de localización varían en dificultad según la naturaleza del entorno y el conocimiento inicial sobre las características del robot. Se distinguen tres tipos de problemas de localización según el conocimiento de la pose del robot: localización local, cuando se conoce la pose inicial; localización global, cuando la pose inicial es desconocida; y el desafío de los “robots secuestrados”, donde el robot es teletransportado durante su operación. Otro factor que tiene un impacto en la dificultad de localización es si el entorno es dinámico o estático, así como si el algoritmo de localización controla o no el movimiento del robot. Además, la cantidad de robots involucrados también puede representar un desafío adicional, ya que un mayor número de robots aumenta la complejidad del proceso de localización [12].

6.5. Localización y mapeo simultáneo (SLAM)

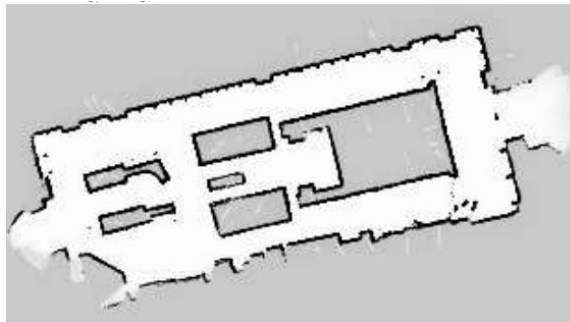
Un desafío central en la robótica móvil es la construcción de un mapa del entorno desconocido mientras simultáneamente se localiza la propia posición del robot dentro de ese mapa. A esta problemática se le denomina localización y mapeo simultáneo o SLAM, por sus siglas en inglés, y a menudo se considera un problema de la clase “huevo y la gallina” debido a su estrecha interrelación. Esto pues, la precisión de la localización del robot depende del mapa que esté construyendo, y la precisión del mapa depende de la posición precisa del robot en el entorno [17].

Para resolver esta problemática, los sistemas de robots móviles emplean una variedad de sensores para recopilar información del entorno y estimar tanto la posición del robot como la estructura del mapa. Una vez se recopilan los datos crudos obtenidos de los sensores, estos son procesados y fusionados para crear mediciones más confiables. Se utiliza algún algoritmo de localización para estimar la posición y orientación del robot en el entorno. Este algoritmo puede basarse en técnicas como el filtro de Kalman, el filtro de partículas, el algoritmo de gráficos de pose u otros [17].

Simultáneamente, se construye el mapa, empleando las mediciones de los sensores y las estimaciones de la posición del robot. Para esto, se requiere la integración de las observaciones sensoriales en un marco de referencia común. A medida que el robot se mueve, se recopilan más datos por lo que el algoritmo escogido actualiza el mapa y la estimación de la posición del robot constantemente. En algunos casos, se pueden emplear algoritmos de optimización para mejorar la distribución de las características del mapa del entorno y la estimación de la posición del robot. El proceso de SLAM es iterativo y complejo. Como se observa en la Figura 13, la información odométrica cruda recolectada por el sistema de sensores de un robot móvil no proporciona una representación precisa del mapa del entorno. Sin embargo, mediante la aplicación de algoritmos de mapeo y localización, esta información odométrica se fusiona entre sí para generar un mapa representativo del entorno circundante [12].



(a) Mapeo de entorno utilizando información odométrica cruda



(b) Mapeo de entorno después de fusionar la información odométrica con algoritmo

Figura 13: Visualización del proceso de SLAM [12]

6.6. Filtro de Kalman y filtro de Kalman extendido (EKF)

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo utilizado para estimar el estado de un sistema dinámico lineal en presencia de ruido. Cuenta con dos etapas principales: la etapa de predicción, donde se estima el estado futuro del sistema utilizando el modelo dinámico y la estimación del estado actual, y la etapa de actualización, donde se ajusta la predicción con nuevas mediciones para minimizar el error en la estimación. Este filtro es ideal para sistemas lineales donde las ecuaciones del modelo y las mediciones se describen mediante relaciones lineales. Además, funciona bajo el supuesto de que tanto el proceso como el ruido de las mediciones siguen una distribución normal gaussiana.

Cuando el sistema no es lineal, se utiliza el filtro de Kalman extendido (EKF, por sus siglas en inglés), una extensión del filtro de Kalman clásico. El EKF se utiliza para estimar el estado de un sistema dinámico en presencia de ruido y no linealidades. Este algoritmo funciona iterativamente, actualizando continuamente las estimaciones del estado del sistema a medida que se reciben nuevas mediciones, utilizando una versión linealizada del modelo del

sistema. Al igual que el filtro de Kalman clásico, el EKF opera bajo dos etapas principales: la etapa de predicción y la etapa de actualización [17].

En la primera etapa, se predice el estado actual del sistema utilizando el modelo dinámico del mismo y el estado anterior estimado. Junto con la predicción del estado, se predice su covarianza (la incertidumbre en la estimación). En la segunda etapa, se incorporan las nuevas mediciones al estado predicho para mejorar la precisión de la estimación. Se calcula la ganancia de Kalman, que determina cuánta confianza se tiene en la estimación del estado del sistema en función de la diferencia entre las mediciones reales y las predichas por el algoritmo. Finalmente, se utiliza esta ganancia para corregir la estimación del estado del sistema utilizando las mediciones disponibles de tal manera que se minimice el error de la estimación del estado [17].

Esta técnica de estimación es especialmente útil cuando el modelo del sistema y las mediciones no son lineales, lo que lo hace adecuado para sistemas como los robots móviles. Por esta razón, el EKF se utiliza en el contexto de SLAM para estimar la posición del robot en un entorno desconocido mientras construye un mapa del mismo. Siguiendo la metodología anteriormente expuesta, el EKF estima la posición y la orientación del robot en función de las mediciones odométricas y las lecturas de los sensores. A medida que el robot se mueve, se recopilan los datos de sus sensores para crear el mapa del entorno y corregir las estimaciones anteriores de la posición y orientación del mismo. Por medio de la ganancia de Kalman se compensa el error debido a pequeñas desviaciones en la rotación de las ruedas o deslizamientos en las mismas, mejorando así la precisión de la localización del robot y el mapa generado [12].

6.7. *Light Detection and Ranging (LiDAR)*

Los LiDAR son sistemas de teledetección que emplean pulsos de luz láser para medir distancias. Estos dispositivos emiten, de manera individual o continua, pulsos láser dirigidos hacia el objetivo que se va a medir. Al emitir un pulso láser, un circuito interno de sincronización se activa instantáneamente. Se mide el tiempo entre la emisión del pulso láser y su retorno al receptor. Los sensores receptores, al detectar la luz láser reflejada por el objetivo detienen el contador. El número de pulsos de reloj registrados durante la fase de emisión y detección es empleado para calcular la distancia hacia el objetivo. Esta tecnología es ampliamente utilizada en mediciones topográficas para generar mapas de alta resolución del terreno o la superficie. Además, son empleados en vehículos autónomos para la detección y percepción del entorno [18].

Esta tecnología puede clasificarse en dos tipos principales: el escáner LiDAR de una sola línea y el escáner LiDAR multilínea. El primero se utiliza para medir distancias con precisión en una dimensión específica, mientras que el segundo combina múltiples planos de escaneo para capturar mediciones en varias direcciones simultáneamente. Este último, emite pulsos láser en varias direcciones mientras gira y es utilizado en vehículos autónomos para resolver la problemática de SLAM y ofrecer un modelado del entorno más preciso [18].

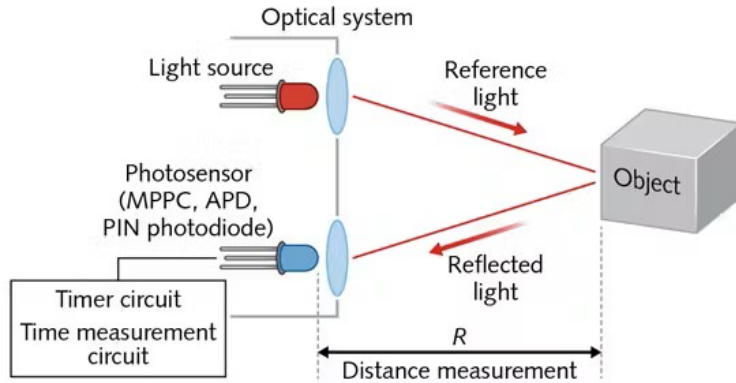


Figura 14: Funcionamiento LiDAR [18]

6.8. Sensores de distancia por tiempo de vuelo

Como su nombre lo indica, estos sensores emplean la tecnología de *Time-of-Flight* (ToF) para medir la distancia entre el sensor y un objeto. El principio de funcionamiento se basa en la velocidad de la luz. En sí, el sensor posee un emisor láser que cada cierto tiempo envía fotones que son reflejados por un objeto y detectados por el receptor. La diferencia de tiempo entre la emisión y la recepción proporciona la distancia real del objetivo en milímetros con una alta precisión. Los sensores ToF ofrecen una rápida respuesta independientemente del tamaño y color del objeto. Son empleados en una amplia gama de aplicaciones, como sistemas de detección de obstáculos, medición de niveles de líquido, reconocimiento de gestos en cámaras y sistemas de seguridad automotriz [19].

6.9. Sensores de distancia por triangulación

Los sensores de distancia basados en triangulación utilizan la geometría de triángulos para calcular la distancia a un objeto. En este sistema, un emisor láser proyecta un haz de luz infrarroja hacia el objeto, y la luz reflejada regresa y pasa a través de una lente que enfoca el haz en un detector, donde se registra el punto de incidencia. Este proceso forma dos triángulos similares. El primero se define por la distancia fija entre el emisor láser y el centro óptico de la lente y la distancia desconocida al punto de reflexión en el objeto. Mientras que el segundo se establece entre el centro óptico de la lente y el plano del detector, junto con la distancia al punto donde el haz de luz reflejado incide sobre el detector.

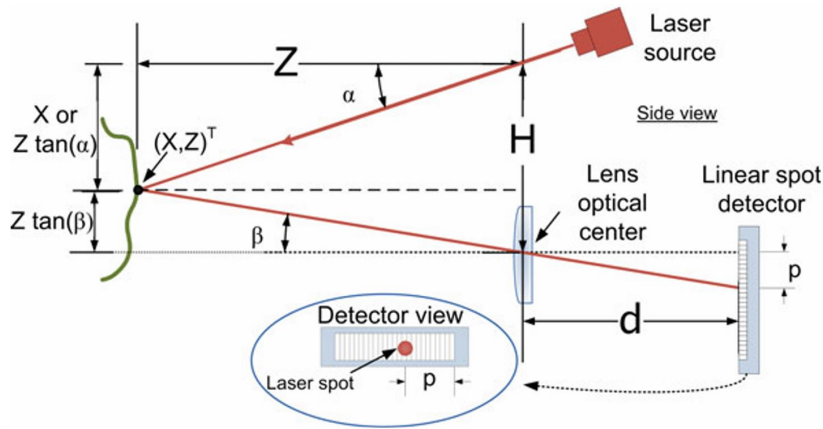


Figura 15: Diagrama esquemático de un sensor de distancia basado en tecnología de triangulación [20]

Nota: La distancia fija H representa la línea base entre el emisor láser y el centro óptico de la lente, mientras que d es la distancia entre la lente y el detector. El ángulo de proyección del haz láser hacia el objeto se denota como α , y el ángulo de recolección β se calcula en función de d y la posición p del punto láser en el detector. La ubicación del punto $[X, Z]^T$ se determina a partir de la línea base H , el ángulo de proyección α , y el ángulo de recolección β .

A medida que el objeto se aproxima o se aleja, el ángulo reflejado cambia, desplazando el punto de impacto en el detector. Al conocer la distancia fija entre el emisor y el detector y aplicando trigonometría, el sistema puede calcular con precisión la distancia al objeto. Esta técnica permite obtener mediciones precisas a distancias cortas y medias.

6.10. Vehículo diferencial *Pololu 3pi+ 32U4*

El vehículo diferencial Pololu 3pi+ 32U4 es un pequeño robot móvil, con un diámetro nominal de 9.7 cm, manufacturado por Pololu Corporation. Está diseñado para ser un robot de tipo diferencial, por lo que emplea dos ruedas motorizadas independientes para controlar su movimiento. Esto le permite moverse con facilidad y realizar maniobras precisas al variar la velocidad de cada rueda. Una característica notable del robot es que en su núcleo se encuentra un microcontrolador AT-mega32U4 AVR de Microchip, el cual proporciona capacidad de procesamiento y control. Se puede programar utilizando el entorno de desarrollo integrado IDE de Arduino, lo que lo hace accesible para implementar distintos algoritmos de control [21].

Cuenta con una variedad de sensores, que incluyen una unidad de medición inercial completa (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro de 3 ejes), cinco sensores de reflectancia orientados hacia abajo para el seguimiento de bordes y sensores de impacto a lo largo de su cara frontal. Dispone de conexión USB para la comunicación con un ordenador, facilitando la programación del mismo en lenguajes como C o C++. Además, ofrece una serie de periféricos de expansión que permite a los usuarios personalizar y ampliar sus capacidades [21].



Figura 16: Pololu 3pi+ 32U4 OLED Robot [21]

6.11. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)*

El *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)*, por sus siglas en inglés) es uno de los protocolos de comunicación más utilizados en sistemas embebidos debido a su simplicidad. Este protocolo utiliza solo dos cables para transmitir y recibir datos, y opera de manera serial y asíncrona, es decir, no requiere una señal de reloj compartida entre los dispositivos para sincronizar la transmisión de datos. En lugar de eso, la velocidad de transmisión se ajusta configurando la tasa de baudios, la cual define cuántos bits por segundo pueden ser transmitidos y recibidos entre ambos dispositivos [22].

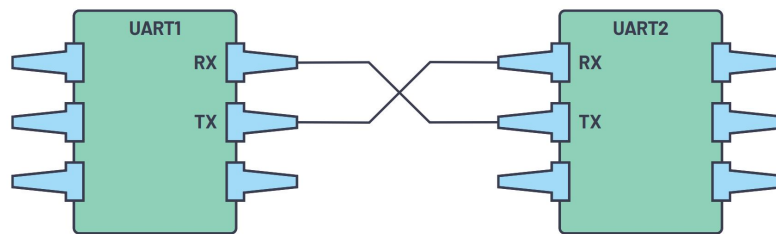


Figura 17: Esquema de comunicación UART entre dispositivos [22]

El protocolo UART emplea dos señales principales: transmisión (Tx) y recepción (Rx) . Durante la comunicación, el UART del dispositivo convierte los datos paralelos en un flujo serial de bits, que luego se envían bit a bit a través de la línea Tx a Rx. El UART receptor recibe los datos en serie y los convierte en datos paralelos para el dispositivo receptor. Para que esta comunicación sea efectiva, ambos dispositivos deben estar configurados con la misma velocidad en baudios, lo que asegura que los bits se transmitan y reciban al mismo ritmo, sincronizando el flujo de datos [23].

Existen diferentes modos de comunicación a través de UART:

- Simplex: Comunicación unidireccional. Un dispositivo siempre actúa como transmisor y otro como receptor, sin alternar roles.
- Semidúplex: Comunicación bidireccional, pero no simultánea. Ambos dispositivos pueden enviar y recibir datos, pero no al mismo tiempo, se alterna entre transmisión y recepción.
- Dúplex completo: Comunicación bidireccional simultánea. Ambos dispositivos pueden enviar y recibir datos al mismo tiempo a través de sus respectivas líneas Tx y Rx.

Una característica importante de la comunicación UART es la implementación de una estructura de tramas (*frame protocol*), que añade seguridad y robustez a la transmisión de datos. Cada trama incluye un conjunto de bits que agrupan los datos de manera estructurada con campos por encabezados, datos y verificación de errores, como el *Cyclic Redundancy Check* (CRC) [22]. Este protocolo asegura que los datos sean recibidos de manera confiable, y permite a los diseñadores personalizar los encabezados y finales de cada trama para adaptarse a los requisitos específicos de la aplicación. En la Figura 18 se muestra un ejemplo de cómo se estructura una trama UART.

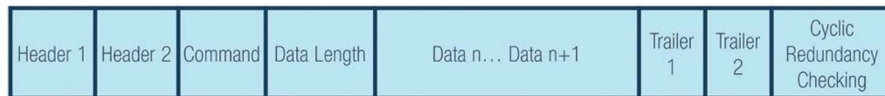


Figura 18: Ejemplo de protocolo de trama UART [22]

Validación de sensor de distancia tipo láser

En este capítulo se presentan las alternativas de sensores de distancia tipo láser consideradas y la validación de la selección del sensor más adecuado para la futura implementación de algoritmos de exploración y mapeo de entornos en agentes robóticos móviles. Cada uno de los sensores analizados presenta ventajas específicas, por lo que, con el fin de identificar aquel que mejor se adaptara a las necesidades de esta aplicación, se realizó un *trade study* en el cual se evaluaron diversos parámetros y especificaciones de cada uno de estos. Este análisis comparativo asegura que la elección final ofrezca el mejor rendimiento posible según criterios relevantes para la aplicación.

7.1. Sensores de distancia tipo láser considerados

Las opciones de sensores de distancia tipo láser consideradas para este trabajo fueron: el módulo VL53L0X, el LiDAR FHL-LD20 y el YDLIDAR Tmini Pro. Estos sensores fueron seleccionados estratégicamente para analizar dos tecnologías de medición diferentes: triangulación y tiempo de vuelo (ToF, por sus siglas en inglés). Ambas tecnologías han demostrado ser altamente efectivas en la obtención de mediciones de distancia para aplicaciones de navegación autónoma, haciendo que los sensores que las utilizan sean candidatos adecuados para la aplicación prevista.

7.1.1. Sensor VL53L0X

El sensor de distancia láser VL530X de STMicroelectronics [24] es un módulo compacto con microcontrolador integrado que utiliza la tecnología de medición por tiempo de vuelo para obtener mediciones precisas, independientemente de la reflectancia del objetivo. Es capaz

de medir distancias con precisión en un rango de 50 mm a 2 m. Una característica destacada de este sensor es su emisor láser de cavidad vertical de 940 nm, el cual es completamente invisible para el ojo humano durante su funcionamiento.

Con un campo de visión (FoV) típico de 25°, el sensor integra una avanzada matriz SPAD, capaz de detectar fotones individuales incluso en condiciones de luz extremadamente débil. Esta característica junto con sus filtros anti-infrarrojos, mejora significativamente la sensibilidad y precisión de las mediciones en entornos con niveles altos de luz infrarroja. Adicionalmente, su interfaz I^2C estándar facilita el control y transferencia de datos, lo que simplifica su integración en proyectos electrónicos. Por estas razones, es ampliamente utilizado en aplicaciones como prevención de colisiones, detección de bordes, o en sistemas de auto-enfoque en cámaras digitales [24].

7.1.2. LiDAR FHL-LD20

El LiDAR FHL-LD20, desarrollado por youyeetoo Tech [25], es un sensor omnidireccional de 360° que emplea tecnología de triangulación para escanear su entorno. Una vez recopilados los datos de distancia, el sensor combina estos valores con los ángulos medidos por la unidad de medición angular para generar una nube de puntos, que puede utilizarse para crear un mapa detallado del contorno circundante. Además, cuenta con un CCD fotosensible de alto rendimiento, el cual le permite medir distancias con precisión en un rango de 100 mm a 8 m.

El núcleo de medición de distancia del FHL-LD20 permite capturar 4000 puntos por segundos, lo que facilita la actualización del entorno capturado. Esta capacidad, junto con la modulación de la velocidad del motor, mejora la cobertura del sensor y reduce los puntos ciegos en distintos entornos. Adicionalmente, su comunicación serial UART simplifica la integración del LiDAR en una amplia variedad de aplicaciones, como la navegación autónoma en robots móviles, la reconstrucción de mapas 2D y la elusión de obstáculos [25].

7.1.3. YDLIDAR Tmini Pro

El YDLIDAR Tmini Pro es un LiDAR 2D de 360° desarrollado por EAI Technology [26]. Emplea el principio de tiempo de vuelo para lograr mediciones de distancia con alta precisión. Durante la medición, su estructura mecánica gira 360 grados, lo que le permite obtener información continua de ángulos y realizar un escaneo completo del entorno. Entre sus características destacadas se encuentra su resistencia al polvo y al agua, lo que lo hace adecuado para operar en condiciones ambientales adversas.

Junto a esto, su tamaño compacto facilita su integración a otros sistemas, optimizando la estructura espacial en una amplia variedad de aplicaciones. Esto lo hace adecuado para pruebas en diversos escenarios. Utiliza comunicación serial UART para transmitir los datos de medición, lo que simplifica su conexión con sistemas de procesamiento. Con un rango de medición de 20 mm a 12 m, el YDLIDAR Tmini Pro es empleado en navegación y elusión de obstáculos en robots de servicio doméstico y aspiradoras robot, mejorando su eficiencia y capacidad de respuesta en entornos complejos [26].

7.2. Selección del sensor de distancia tipo láser

Los sensores descritos en la sección anterior fueron evaluados considerando sus diferencias en metodología de medición y cantidad de datos generados. Aunque los tres sensores comparten el mismo propósito, estas variaciones presentan ventajas y desventajas específicas en función del objetivo y contexto de cada proyecto. Por esta razón, para realizar una comparación efectiva entre estos, se establecieron distintos criterios que se consideraron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

En el Cuadro 1 se presentan los criterios empleados en el *trade study* junto con el peso asignado a cada parámetro. Estos pesos fueron determinados mediante el proceso de ponderación por pares, un método utilizado para comparar y sopesar criterios cualitativos y cuantitativos entre sí. Para este estudio, se consideraron 10 criterios para asegurar una decisión fundamentada al escoger el sensor.

Criterios	Peso %
Costo	10
Disponibilidad	15
Precisión	6
Rango de medición	7
Parámetros eléctricos	5
Velocidad de medición	6
Tamaño	6
Masa	8
Operatividad en aplicaciones deseadas	22
Adaptabilidad a robots móviles	15

Cuadro 1: Criterios de comparación

El método de ponderación por pares emplea una matriz de comparaciones (ver Cuadro 2) para evaluar la importancia relativa entre cada par de criterios. Primero, se calcula la media geométrica de los valores en cada fila de la matriz. Luego, estos valores se normalizan para obtener los factores de ponderación, garantizando que la suma total sea igual a 1 [27]. Los valores para las comparaciones se seleccionan dentro de un intervalo 1 a 9, como se describe en el Cuadro 3.

	Costo	Disponibilidad	Precisión	Rango de medición	Parámetros eléctricos	Velocidad de medición	Tamaño	Peso	Operatividad	Adaptabilidad	Media Geométrica	Masa
Costo	1	1/4	1/2	3	2	5	4	4	1/5	1/3	1.1487	0.1019
Disponibilidad	4	1	3	2	2	4	3	3	1/3	1/4	1.6438	0.1458
Precisión	2	1/3	1	7	3	1	1/4	1/4	1/8	1/6	0.6700	0.0594
Rango de medición	1/3	1/2	1/7	1	5	1/3	5	5	1/3	1/4	0.7794	0.0691
Parámetros eléctricos	1/2	1/2	1/3	1/5	1	1/5	2	1/2	1/2	3	0.5887	0.0522
Velocidad de medición	1/5	1/4	1	3	5	1	1/4	1/4	1	1/2	0.6871	0.0609
Tamaño	1/4	1/3	4	1/5	1/2	4	1	1	1/5	1	0.6960	0.0617
Masa	1/4	1/3	4	1/5	2	4	1	1	1/3	1	0.8414	0.0746
Operatividad	5	3	8	3	2	1	5	3	1	1	2.5313	0.2244
Adaptabilidad	3	4	6	4	1/3	2	1	1	1	1	1.6917	0.1500
										Suma	11.2779	1.0000

Cuadro 2: Matriz de comparación por pares

Valor	Descripción
1	Igual importancia
3	Moderadamente más importante
5	Fuertemente más importante
7	Muy fuertemente más importante
9	Extremadamente más importante
2,4,6,8	Valores intermedios entre los anteriores

Cuadro 3: Escala fundamental de comparación por pares

7.2.1. Criterios para el *trade study* de los sensores de distancia tipo láser

El *trade study* es un método sistemático de toma de decisiones diseñado para identificar la solución técnica más adecuada entre un conjunto de alternativas viables. Este enfoque consiste en evaluar y comparar diferentes opciones en función de una serie de criterios pre-definidos, los cuales son ponderados numéricamente según su importancia relativa en el proyecto. A cada criterio se le asigna un peso específico, de manera que las alternativas que satisfacen más plenamente con dicho criterio obtengan una puntuación superior a aquellas que lo satisfacen en menor medida. El Cuadro 4 muestra las calificaciones posibles al desempeño de cada uno de los criterios evaluados.

Adjetivos(s)	Calificación
No aceptable / Nulo	0
Muy malo / Muy bajo	1
Malo / Bajo	2
Moderado / Normal	3
Bueno / Alto	4
Muy bueno / Muy Alto	5

Cuadro 4: Valores de interés para la comparación

Costo

Dado que no se contaba con los dispositivos, fue necesario evaluar su compra. Para este criterio, se asignó la ponderación más alta al módulo VL53L0X, cuyo precio aproximado de \$6.00 lo hace más accesible que los otros sensores de distancia. Su precio resulta ser más de diez veces inferior al de los LiDAR evaluados. Cabe señalar que las ponderaciones asignadas a cada sensor en el Cuadro 5 reflejan las limitaciones económicas del proyecto, donde se priorizaron las opciones que se ajustaran al presupuesto disponible. En el Cuadro 15 se especifican los precios de los LiDAR, junto con características destacables que serán mencionadas en los criterios de evaluación.

Alternativa	Costo
VL53L0X	5
FHL-LD20	3
YDLIDAR Tmini Pro	1

Cuadro 5: Ponderación de costo

Disponibilidad

Este criterio es considerado uno de los más importantes, ya que la disponibilidad de un sensor influye directamente en diversos aspectos. Por un lado, un sensor que se encuentra ampliamente disponible permite realizar sustituciones rápidas y oportunas cuando sea necesario. Junto a esto, los sensores con amplia disponibilidad suelen ofrecer un mejor soporte técnico, lo que facilita su mantenimiento y desarrollo. En este contexto, como se muestra en el Cuadro 6, el módulo VL53L0X recibió la ponderación más alta, ya que es accesible en el mercado local de Guatemala. Es importante señalar que, aunque los otros dos sensores son desarrollados en el extranjero y generan un cargo adicional por envío, también cuentan con un excelente soporte técnico.

Alternativas	Disponibilidad
VL53L0X	5
FHL-LD20	3
YDLIDAR Tmini Pro	1

Cuadro 6: Ponderación de disponibilidad

Precisión

Como se indica en el Cuadro 15, la precisión de cada sensor se presenta dentro de un rango, donde el primer valor refleja la precisión en condiciones óptimas y el segundo corresponde a escenarios menos favorables. Aunque estos valores pueden fluctuar según el entorno donde se utilicen, los rangos proporcionan una idea general de la precisión de cada sensor. En este contexto, se observa que ambos sensores de distancia tipo láser LiDAR tienen una precisión inferior en comparación con el módulo VL53L0X. En particular, el FHL-LD20 muestra la menor precisión entre los tres sensores evaluados, lo que justifica su puntuación en el Cuadro 7.

Alternativas	Precisión
VL53L0X	5
FHL-LD20	3
YDLIDAR Tmini Pro	4

Cuadro 7: Ponderación de precisión

Rango de medición

El rango de medición del sensor debe ser adecuado para cubrir las dimensiones del área de trabajo. Puesto que se planea operar en el ecosistema Robotat, que cuenta con una plataforma de 4.8×3.8 m, es importante que el sensor tenga un rango suficiente para medir distancias dentro de este espacio sin restricciones. Además, al considerar su futura integración con robots móviles para el mapeo de entornos, un rango de medición limitado podría restringir significativamente su utilidad. En este contexto, el FHL-LD20 obtiene la ponderación más alta (ver Cuadro 8), ya que tiene la capacidad de cubrir áreas de trabajo moderadamente grandes como la plataforma del Robotat .

Alternativas	Rango de medición
VL53L0X	2
FHL-LD20	5
YDLIDAR Tmini Pro	4

Cuadro 8: Ponderación de rango de medición

Parámetros eléctricos

El sensor debe ser compatible con el voltaje de operación del sistema en el que se integrará, ya que esto influye directamente en el diseño general del mismo. También, es importante conocer su consumo de corriente para evitar sobrecargas en la fuente de alimentación. En aplicaciones móviles, un sensor con bajo consumo de energía es preferible, ya que extiende el tiempo de funcionamiento y reduce la frecuencia de recargas. Como se muestra en el Cuadro 15, los tres sensores operan con voltajes de alimentación similares. Sin embargo, los sensores LiDAR presentan un mayor consumo de corriente durante su funcionamiento. Aunque este incremento es manejable al integrarlos con otros subsistemas, el módulo VL53L0X destaca por su menor consumo energético, lo cual respalda su puntuación en el Cuadro 9.

Alternativas	Parámetros eléctricos
VL53L0X	5
FHL-LD20	3
YDLIDAR Tmini Pro	3

Cuadro 9: Ponderación de parámetros eléctricos

Velocidad de medición

Una mayor velocidad de medición permite capturar rápidamente los cambios en el entorno, lo que mejora la capacidad de respuesta en tiempo real. En este aspecto, tanto el sensor LiDAR FHL-LD20 como el YDLIDAR Tmini Pro pueden obtener mediciones a una velocidad de 4000 puntos por segundo, lo que les otorga una alta ponderación en este criterio (ver Cuadro 10). Por otro lado, la velocidad de medición del módulo VL53L0X depende del

modo de operación, con tiempos de respuesta típicos que oscilan entre 30 ms y 200 ms, lo que lo hace más lento en comparación con los otros sensores.

Alternativas	Velocidad de medición
VL53L0X	2
FHL-LD20	5
YDLIDAR Tmini Pro	5

Cuadro 10: Ponderación de velocidad de medición

Tamaño

Un sensor compacto se integra más fácilmente en sistemas con espacio limitado como lo podría ser un robot móvil. Un tamaño reducido permite mayor flexibilidad en el diseño estructural del sistema. En este contexto, como se muestra en el Cuadro 11, el módulo VL53L0X recibió la ponderación más alta. No obstante, los tamaños de los otros dos sensores también son manejables y adecuados para la aplicación en cuestión.

Alternativas	Tamaño
VL53L0X	5
FHL-LD20	3
YDLIDAR Tmini Pro	4

Cuadro 11: Ponderación de tamaño

Masa

Cada gramo adicional puede impactar la eficiencia energética y la estabilidad de sistema en el que se integre el sensor. Un sensor liviano reduce la carga que el sistema debe soportar, favoreciendo su rendimiento. Por esta razón, el módulo VL53L0X recibió la mayor ponderación en términos de masa. Sin embargo, las masas de los otros dos sensores también son manejables y adecuados para la aplicación en cuestión, siendo el YDLIDAR Tmini Pro el sensor con menor puntuación debido a su mayor masa (ver Cuadro 12).

Alternativas	Masa
VL53L0X	5
FHL-LD20	3
YDLIDAR Tmini Pro	4

Cuadro 12: Ponderación de masa

Operatividad en aplicaciones deseadas

Este fue el criterio que se consideró más importante, pues determina cómo el sensor se ajusta a las necesidades específicas de la aplicación. Puesto que se requiere para futuras aplicaciones de mapeo de entornos con robots móviles, la naturaleza unidireccional del módulo VL53L0X afecta su rendimiento en comparación con los otros dos sensores, que son omnidireccionales. Por esta razón, como se muestra en el Cuadro 13, el módulo VL53L0X obtuvo la menor puntuación en comparación a los LIDAR evaluados. El VL53L0X mide distancias en una sola dirección a la vez, lo que implica que para capturar un mapa completo del entorno, el sensor se debe girar o el robot cambiar su orientación. Esto puede complicar la eficiencia en la obtención de datos y aumentar el tiempo necesario para crear un mapa exhaustivo.

Por otro lado, los sensores omnidireccionales tienen la ventaja de capturar el entorno completo en una sola rotación. Eso reduce significativamente el tiempo necesario para obtener un mapa completo y facilita la interpretación de bordes y esquinas al realizar SLAM. Esta capacidad mejora notablemente la eficiencia en la programación de algoritmos de mapeo y planificación de trayectorias, haciéndolos ideales para aplicaciones de navegación autónoma, evasión de obstáculos y generación de mapas 2D. En contraste, el sensor unidireccional enfrenta desafíos adicionales en términos de localización y mapeo, dado que requiere múltiples capturas para obtener una visión completa del entorno.

Alternativas	Operatividad en aplicaciones deseadas
VL53L0X	1
FHL-LD20	5
YDLIDAR Tmini Pro	5

Cuadro 13: Ponderación de operatividad en aplicaciones deseadas

Adaptabilidad a robots móviles

Este criterio, considerado como el segundo en importancia, evalúa la facilidad de integración y el desempeño del sensor en sistemas robóticos. Este criterio hace énfasis en la facilidad de montaje y mantenimiento al integrar el sensor al diseño estructural de distintos sistemas robóticos, asegurando que no interfieran con otros componentes estructurales. También, toma en cuenta el campo de visión, que determina la cobertura del entorno: un campo de visión más amplio proporciona una visión más completa y detallada. Finalmente, se analiza la robustez y resistencia del sensor frente a condiciones operativas adversa.

En este contexto, dado que se planea utilizar los sensores en aplicaciones futuras con robots móviles, la naturaleza unidireccional del módulo VL53L0X exige la instalación de al menos cinco sensores para cubrir múltiples direcciones y recabar suficientes características del entorno. Otra alternativa sería implementar un sistema de rotación para obtener una cobertura completa sin la necesidad de instalar más de uno, lo que añadiría complejidad al diseño. En contraste, los sensores LiDAR están diseñados para ser montados en diversas posiciones y orientaciones, lo cual facilita su integración en robots móviles y ofrece una

cobertura más amplia del entorno. Además, su capacidad para operar en diversas condiciones ambientales, tanto en interiores como exteriores, y su versatilidad en aplicaciones, les otorgan una puntuación superior que el módulo VL53L0X (ver Cuadro 14).

Alternativas	Adaptabilidad a robots móviles
VL53L0X	2
FHL-LD20	4
YDLIDAR Tmini Pro	5

Cuadro 14: Ponderación de adaptabilidad a robots móviles

	VL53L0X	FHL-LD20	YDLIDAR Tmini Pro
Precio	\$6.00	\$60.00	\$100.00
Disponibilidad	Guatemala	Estados Unidos	Estados Unidos
Precisión	± 3 mm a ± 10 mm	± 10 mm a ± 20 mm	± 25 mm a ± 50 mm
Rango de medición	50 mm a 2 m	100 mm a 8 m	20 mm a 12 m
Parámetros eléctricos	DC 3.3 V @ 20 mA	DC 5 V @ 300 mA $i_{inrush} \leq 1.0$ A	DC 5 V @ 340 mA $i_{inrush} \leq 1.0$ A
Velocidad de medición	30 ms a 200 ms	4000 puntos/s	4000 puntos/s
Tamaño	$4.4 \times 2.4 \times 1.0$ mm	$96.3 \times 59.8 \times 38.8$ mm	$38.6 \times 38.6 \times 33.4$ mm
Peso	2.0 g	100.4 g	45.0 g
Operatividad en aplicaciones deseadas	Unidireccional	Omnidireccional	Omnidireccional
Adaptabilidad a robots móviles	I^2C	UART	UART

Cuadro 15: Características de los sensores analizados

7.2.2. Resultados del *trade study*

Una vez definidos los pesos y ponderaciones de los criterios presentados previamente, se elaboró un esquema de ponderación para obtener los resultados del estudio comparativo. En la Figura 19, el gráfico de barras apiladas ilustra el valor total de cada alternativa a través de la longitud de la barra segmentada. Cada segmento de la barra representa un criterio evaluado (ver Figura 20), y su longitud indica la magnitud de la ponderación obtenida. De acuerdo con la puntuación final, se concluyó que el LiDAR FHL-LD20 era la opción más adecuada como sensor de distancia tipo láser. Por lo tanto, se seleccionó para utilizarlo en investigaciones con robots móviles dentro del ecosistema Robotat. Cabe señalar que en el Cuadro 16 se resume la ponderación individual obtenida por cada sensor de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente.

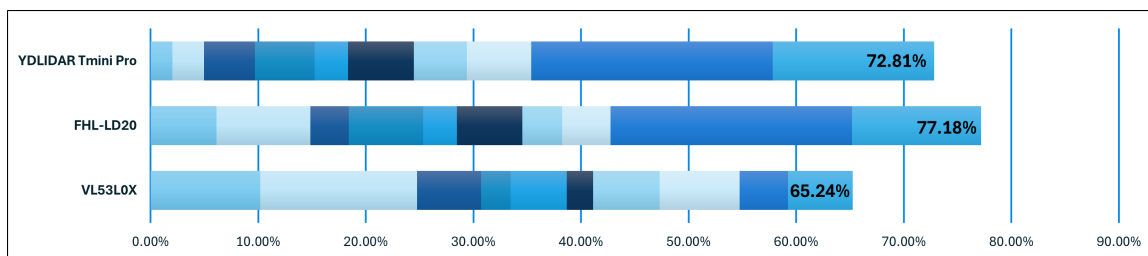


Figura 19: Resultados del *trade study*

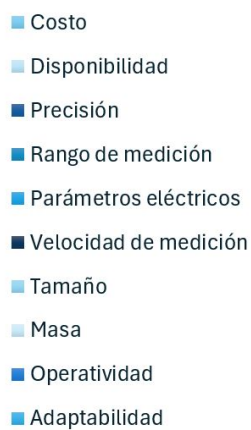


Figura 20: Leyenda del gráfico de barras segmentadas

Criterios	VL53L0X	FHL-LD20	YDLIDAR Tmini Pro
	Pesos	Pesos	Pesos %
Costo	10.19	6.11	2.04
Disponibilidad	14.57	8.74	2.91
Precisión	5.94	3.56	4.75
Rango de medición	2.76	6.91	5.53
Parámetros eléctricos	5.22	3.13	3.13
Velocidad de medición	2.44	6.09	6.09
Tamaño	6.17	3.70	4.94
Masa	7.46	4.48	5.97
Operatividad en aplicaciones deseadas	4.49	22.44	22.44
Adaptabilidad a robots móviles	6.00	12.00	15.00
Total	65.24	77.18	72.81

Cuadro 16: Ponderación individual de los sensores evaluados según criterios establecidos

Lectura e interpretación de datos extraídos del LiDAR FHL-LD20

Este capítulo aborda el funcionamiento y la interpretación de datos del sensor LiDAR FHL-LD20. Se detalla el formato de los paquetes de datos enviados por el sensor, y se describe cómo se captura y procesa esta información utilizando software como Matlab y Python. Además, se presenta la aplicación desarrollada para que el usuario comprenda cómo opera el sensor y utilizar de manera efectiva los datos que proporciona.

8.1. Funcionamiento del sensor de distancia FHL-LD20

Esta sección se centra en el funcionamiento del sensor FHL-LD20, detallando sus características técnicas, protocolo de comunicación y la estructura de los datos que transmite. Se exploran los principios de operación que permiten al sensor capturar y transmitir información de manera eficiente. La comprensión de estos aspectos es fundamental para integrar y utilizar el sensor de manera efectiva en aplicaciones que requieran mediciones precisas.

8.1.1. Características generales

El sensor de distancia tipo láser FHL-LD20, fabricado por Youyeetoo, está diseñado para capturar datos en un plano bidimensional, generalmente en orientación horizontal. Utiliza un láser infrarrojo con una longitud de onda que varía entre 775 nm y 800 nm, siendo 793 nm el valor típico. Su campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés) abarca una sección circular de 360° con un radio que varía entre 100 mm y 8 m. Además, cuenta con un motor eléctrico integrado que hace girar la ventana óptica de emisión y recepción del láser, permitiendo cubrir un ángulo de medición en todo el plano horizontal. En el Cuadro 17 se presentan algunos parámetros relevantes del sensor.

Parámetros de rendimiento	
Resolución angular	0.54°
<i>Pitch</i>	0°~1.0°
<i>Yaw</i>	-0.5°~0.5°
Tiempo de arranque	≤ 3.4 s Típico de 3 s
Frecuencia de escaneo	6 Hz ± 0.2 Hz
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 50°C
Humedad relativa	< 95 % RH
Nivel de seguridad del láser	IEC 60825 Clase 1

Cuadro 17: Parámetros de rendimiento

Orientación del sensor

El LiDAR FHL-LD20 utiliza un sistema de coordenadas zurdo, donde el centro de rotación actúa como el origen de coordenadas (ver Figura 21). La dirección que conecta el centro de rotación con el centro de la rueda motriz se establece como la dirección de cero grados, y el ángulo de rotación aumenta en sentido horario. Además, el sensor tiene un margen limitado de inclinación y rotación en los ejes de *pitch* y *yaw*, por lo que si se superan los límites descritos en el Cuadro 17, su capacidad para medir distancias con precisión podría verse comprometida.

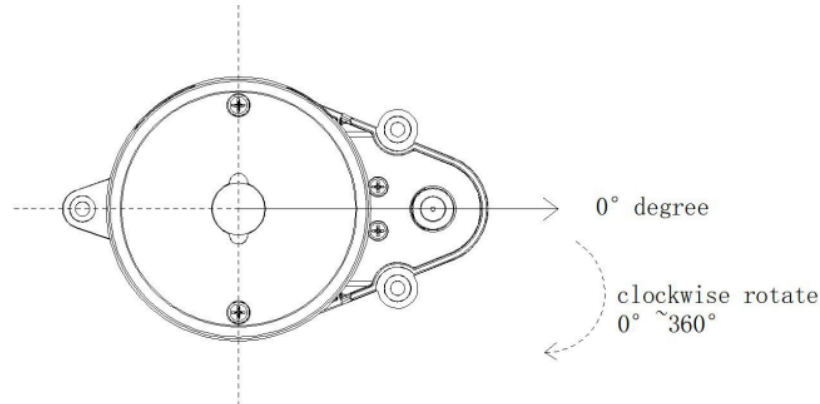


Figura 21: Orientación del sensor [25]

8.1.2. Protocolo de comunicación

El FHL-LD20 utiliza un puerto serial asíncrono estándar (UART) para la transmisión unidireccional de datos. La conexión se realiza a través de un conector ZH1.5T-4P de 1.25mm, que se utiliza tanto para la alimentación como para la transmisión de datos hacia un dispositivo *Host*. En la Figura 22 y en el Cuadro 19 se muestra el orden de los pines de entrada y salida del sensor, y en el Cuadro 19 se especifican los parámetros de transmisión.

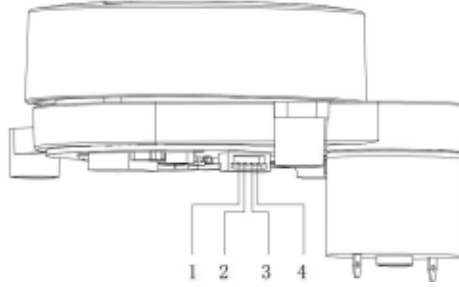


Figura 22: Esquema de conexión del conector ZH1.5T-4P del LiDAR FHL-LD20 [25]

No. Pin	Señal	Tipo	Descripción	Voltajes de operación		
				Mínimo	Típico	Máximo
1	RX/PWM	Entrada	Control de velocidad externo	3 V	3.3 V	3.6 V
2	GND	Alimentación	Tierra	-	0 V	-
3	TZ	Salida	Salida de datos del LiDAR	3 V	3.3 V	3.6 V
4	VCC	Alimentación	Alimentación positiva	4.5 V	5 V	5.5 V

Cuadro 18: Parámetros de conexión del LiDAR FHL-LD20

Velocidad en baudios	Longitud de los datos	Bits de parada	Bit de paridad	Control de flujo
230400	8 bits	1	N/A	N/A

Cuadro 19: Parámetros de transmisión UART

Formato de paquete

Cuando el sensor alcanza un estado de operación estable, comienza a enviar automáticamente paquetes de datos de medición sin requerir ninguna instrucción. En el Cuadro 20 se detalla la estructura general de estos paquetes de medición y el significado de cada campo.

Carácter de inicio	VerLen	Velocidad del radar		Ángulo de inicio		Data	Ángulo final		Marca de tiempo		Verificación CRC
54H	2CH	LSB	MSB	LSB	MSB	...	LSB	MSB	LSB	MSB	1 Byte

↓

Punto de medición 1		Punto de medición 2		...	Punto de medición 12		
Valor distancia 1	Intensidad	Valor distancia 2	Intensidad	...	Valor distancia 12	Intensidad	
LSB	MSB	1 Byte	LSB MSB	1 Byte	...	LSB MSB	1 Byte

Cuadro 20: Estructura de un paquete de medición

- Carácter de inicio (1 *byte*): Valor fijo de 0x54, señala el inicio de un paquete.
- VerLen (1 *byte*): Valor fijo de 0x2C, especifica que cada paquete contiene 12 puntos de medición.
- Velocidad del radar (2 *bytes*): Representa la velocidad del radar en grados por segundo.
- Ángulo de inicio (2 *bytes*): Indica el ángulo de inicio en unidades de 0.01 grados.

- **Data (36 bytes):** Contiene la información de 12 puntos de medición, cada uno de 3 bytes. Los primeros 2 bytes de cada punto indican el valor de distancia en milímetros, y el tercer byte refleja la intensidad de la señal de reflexión; los valores más altos indican una mayor intensidad.
- **Ángulo final (2 bytes):** Señala el ángulo de finalización de la medición, en unidades de 0.01 grados.
- **Marca de tiempo (2 bytes):** Representa el tiempo en milisegundos en el que se capturaron los datos.
- **Verificación CRC (1 byte):** Byte utilizado como *checksum* para asegurar la integridad de todos los datos anteriores que forman un paquete.

8.2. Lectura de datos

La integración de microcontroladores y software de análisis es fundamental para el desarrollo de sistemas de captura y procesamiento de datos en aplicaciones de sensores. En esta sección, se describe el proceso de lectura y decodificación de datos del sensor FHL-LD20, utilizando un microcontrolador ESP32 y plataformas de software como Matlab y Python. También, se presenta la aplicación desarrollada para la recolección e interpretación de datos del sensor, proporcionando una herramienta útil para evaluar su precisión y confiabilidad en diversos escenarios.

8.2.1. Lectura e interpretación de datos mediante ESP32 y Matlab

Para desarrollar el prototipo inicial de un sistema de captura y análisis de datos del sensor FHL-LD20, se utilizó un microcontrolador ESP32, programado mediante la plataforma de Arduino, en combinación con el software Matlab. El microcontrolador ESP32 se encargó de la recolección de información a través de la conexión UART proporcionada por el sensor. Este primer modelo permitió realizar una evaluación preliminar del rendimiento del sensor. En la Figura 23 se muestra el proceso general de captura de datos en términos generales.

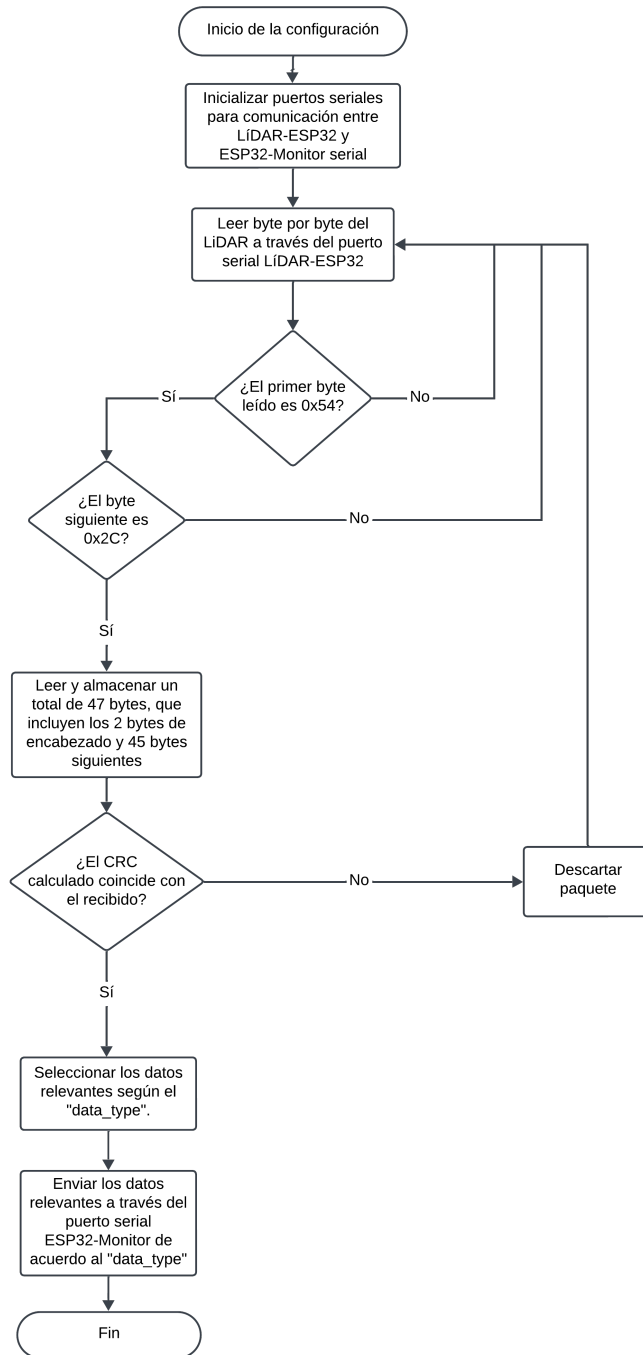


Figura 23: Diagrama de flujo general para captura de datos provenientes del sensor

El proceso de captura de datos sigue una estructura de validación en la que se espera recibir un paquete de 47 *bytes*. Cada paquete se valida mediante los dos *bytes* de encabezados específicos (0x54 y 0x2C), una vez recibido el paquete completo, se realiza una verificación de integridad utilizando un cálculo de verificación por redundancia cíclica (CRC) de 8 bits. El código opera de manera cíclica en el bucle principal, lo que permite un flujo continuo de lectura de datos del LiDAR.

En el diagrama de flujo presentado se destaca la importancia de la variable “data_type”. Esta variable define la cantidad de datos que el microcontrolador enviará a Matlab para su procesamiento. Dicha variable puede asumir uno de tres valores predefinidos: “FULL_DATA”, “RELEVANT_DATA” o “RELEVANT_DATA2”, cada uno especificando una longitud distinta para los datos a transmitir.

- “FULL_DATA”: Corresponde a un paquete completo de 47 *bytes* (94 caracteres).
- “RELEVANT_DATA”: Paquete de 30 *bytes* que excluye la velocidad del radar, los *bytes* de intensidad de la señal, los de la marca de tiempo y el *byte* de verificación CRC (60 caracteres).
- “RELEVANT_DATA2”: Paquete de 42 *bytes* que, a diferencia de “RELEVANT_DATA”, incluye los *bytes* de intensidad de la señal (84 caracteres).

La flexibilidad en el tamaño de los paquetes fue implementada para optimizar el tiempo de procesamiento en Matlab, lo cual es particularmente relevante en aplicaciones en tiempo real o cuando se manejan múltiples paquetes de datos en rápida sucesión. Al reducir la cantidad de información procesada, se logra una respuesta más rápida del sistema sin necesidad de realizar cambios significativos en el software. Cabe destacar que los datos capturados se envían como una cadena de caracteres hexadecimales a través del puerto serial.

Una vez capturada la información del sensor, se utilizó Matlab para desarrollar un programa capaz de recibir los datos transmitidos desde el microcontrolador. El software permitió obtener y decodificar múltiples lecturas consecutivas, así como graficar los resultados. Este proceso se utilizó para verificar la concordancia de las lecturas del sensor con los valores esperados, además de ofrecer una herramienta sencilla para manipular los datos recibidos. La Figura 24 muestra el proceso de recepción, decodificación y visualización de los datos obtenidos.

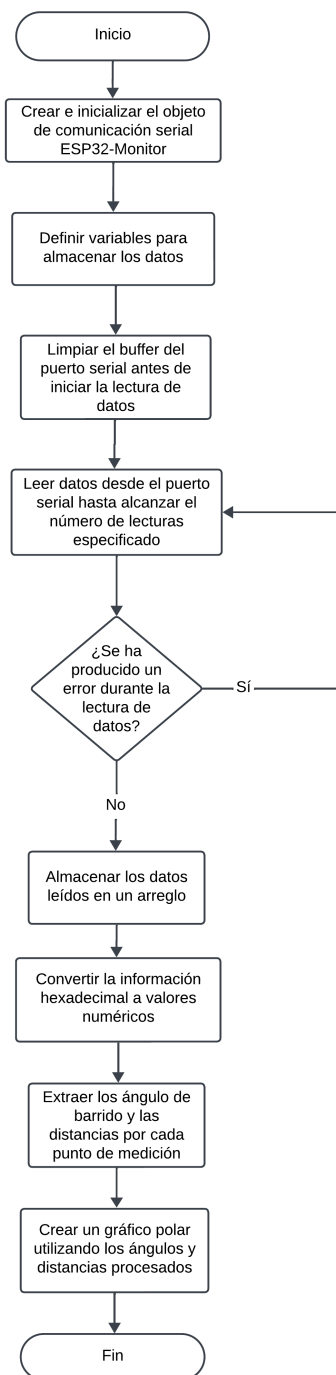


Figura 24: Diagrama de flujo general para procesamiento de datos provenientes del sensor

Como se mencionó anteriormente, el paquete de datos recibido consiste en un arreglo de caracteres que contiene información estructurada en formato hexadecimal. La conversión de datos se realiza dividiendo el paquete en segmentos y extrayendo pares de caracteres hexadecimales. Para reconstruir los valores completos de ángulos y distancias, se combinan dos partes: un *byte* de menor orden y un *byte* de mayor orden.

Por ejemplo, para el ángulo de inicio codificado en dos *bytes*, se extraen las partes de menor y mayor orden para obtener los valores hexadecimales correspondientes. Luego, se desplaza el *byte* de mayor orden a la posición correcta dentro del valor de 16 bits y se suma con el *byte* de menor orden para obtener el valor completo. De esta manera, se reconstruye el valor decimal correspondiente al ángulo de inicio medido, expresado en unidades de 0.01 grados, en el paquete de datos evaluado como se muestra en la Figura 25.

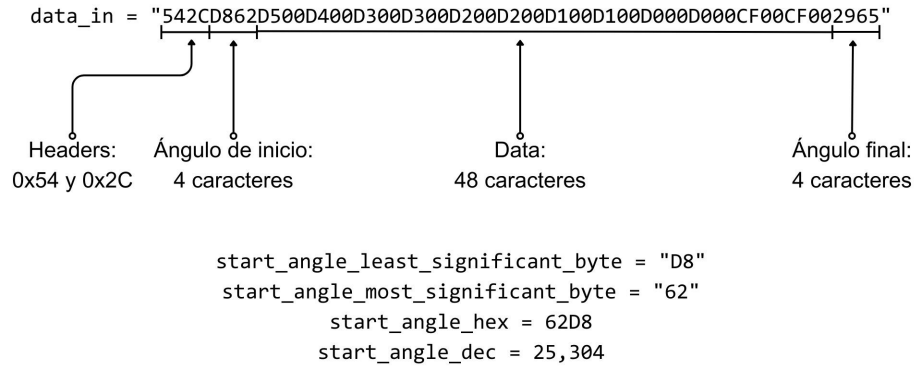
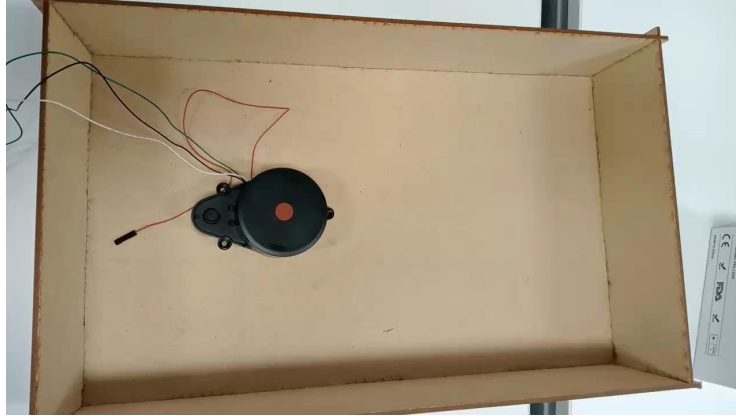


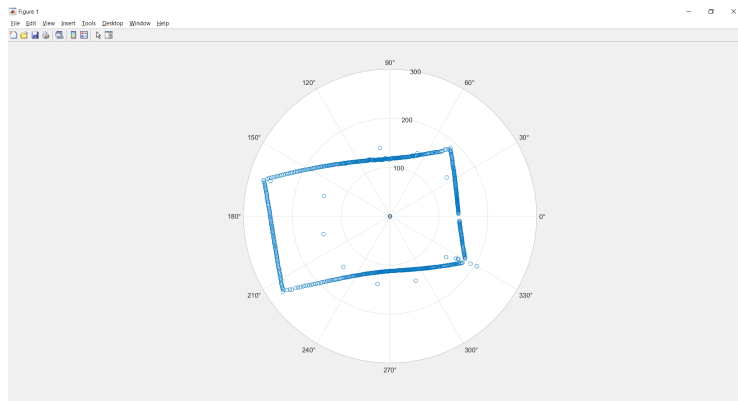
Figura 25: Ejemplificación del proceso de reconstrucción de mediciones: ángulo de inicio

Una vez que las lecturas fueron decodificadas y segmentadas en sus partes correspondientes, se calculó el ángulo de barrido para cada punto de distancia. Este cálculo se realizó determinando el paso angular, el cual fue obtenido al dividir la diferencia entre los ángulos de inicio y fin por el número de intervalos entre los puntos de medición. Este incremento angular fue sumado acumulativamente al ángulo de inicio. De esta manera, a cada punto de distancia medido se le asignaría un ángulo de barrido específico. Cabe destacar que la diferencia entre los ángulos de inicio y fin fue de aproximadamente 6° , lo que implica que cada paquete de datos cubre un barrido de esta magnitud.

Los valores de distancias y ángulos resultantes del procesamiento de datos se organizaron en una matriz de datos la cual se representó en una gráfica de coordenadas polares en Matlab para recrear la visualización generada por el LiDAR. Para verificar su funcionamiento y realizar un reconocimiento de área, se colocó el sensor FHL-LD20 dentro de una caja de 38.5×23 cm. En la Figura 26 se presenta la disposición del sensor dentro de la caja y la reconstrucción visual realizada a partir de 60 paquetes del puerto serial, es decir, 720 puntos de medición procesados o bien, una revolución completa.



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro de la caja



(b) Reconstrucción de las 70 lecturas del sensor

Figura 26: Visualización de la primera corrida del sensor: 840 puntos de medición

A partir de la Figura 26b, se identificaron distintas áreas de mejora al momento de realizar la reconstrucción. En primer lugar, aunque la forma y las proporciones generales de la caja se representaron correctamente, la reconstrucción se presenta de manera “invertida” en comparación con la disposición física observada (Figura 26a). La causa de esta discrepancia radica en que el LiDAR captura los datos en dirección horaria, mientras que los sistemas de visualización convencionales suelen interpretar los datos en sentido antihorario. Como resultado, la orientación visual de la reconstrucción difiere con lo que se observa a simple vista. Este hecho resaltó la necesidad de implementar una opción para ajustar la orientación de los puntos capturados, de modo que la reconstrucción se alinee con la disposición física y sea más intuitiva.

Otro aspecto destacable es la ligera curvatura observada en las aristas de la reconstrucción, que difiere con los bordes rectos de la caja física. Esta distorsión surgió debido a que los datos se procesaron sin considerar el ajuste para alinear los puntos obtenidos con el sistema de referencia deseado (eje central de rotación del sensor como origen). Es decir, no se aplicó una compensación adecuada para corregir los desfases entre el sistema de coordenadas en el que se capturan las mediciones (propio del LiDAR) y el sistema de coordenadas en el que se deberían de visualizar los datos (eje central). Como resultado, la reconstrucción presenta una leve deformación en comparación con la realidad física observada.

Además, se identificó un conjunto de aproximadamente 10 puntos distribuidos de forma circular que no deberían de estar presentes en la reconstrucción. Al revisar el procesamiento de datos, se determinó que estos puntos atípicos surgieron debido a un error en el cálculo del barrido angular. Cuando el ángulo de inicio era mayor que el ángulo final, se obtenía una diferencia negativa, lo que provocaba que las mediciones cercanas al cruce del punto de 0 grados se distorsionaran. Para solventar esto, se implementó una corrección en el cálculo del ángulo, añadiendo 360 grados cuando el ángulo de inicio superaba al ángulo final. Esta corrección garantizaba una transición continua entre mediciones al momento en que el sensor completaba un ciclo y cruzaba por el ángulo de 0 grados. Estos detalles no solo resaltaron la importancia de revisar cuidadosamente el procesamiento de datos, sino también la necesidad de diseñar un soporte para estabilizar y alinear adecuadamente el sensor LiDAR.

8.2.2. Lectura e interpretación de datos mediante ESP32 y Python

En lugar de desarrollar únicamente un software para obtener y procesar los datos, se decidió crear una aplicación que mejorara la experiencia del usuario al utilizar el sensor FHL-LD20. Para ello, se optó por utilizar Python 3.11 como lenguaje de programación, considerando la necesidad de un entorno más flexible y eficiente para el manejo de datos. Las principales razones por las cuales se seleccionó Python sobre Matlab, que se había usado anteriormente, fueron las siguientes:

- A diferencia de Matlab, Python es un lenguaje de código abierto y gratuito.
- Python cuenta con un ecosistema amplio, con una gran variedad de librerías y *frameworks* que facilitan la integración de diferentes funcionalidades en una misma aplicación.
- Para el desarrollo de aplicaciones de escritorio, Python ofrece múltiples frameworks como Tkinter, PyQt y Kivy, mientras que Matlab sólo dispone de App Designer para la creación de interfaces gráficas.
- Python cuenta con una comunidad de desarrolladores muy grande y activa, lo que facilita la resolución de problemas y la implementación de nuevas funcionalidades.

Cabe señalar que el código desarrollado para el ESP32, se mantuvo sin cambios, ya que mostró ser eficiente para la recolección de datos.

Ahora bien, para el desarrollo de la aplicación, se empleó CustomTkinter, una extensión moderna y estilizada de Tkinter. Esta elección no solo permitió mejorar la estética de la interfaz, sino que también ofreció una experiencia más funcional en comparación con herramientas tradicionales, como Tkinter. En la Figura 27, se presenta la interfaz gráfica nombrada “LiDAR MapViewer”, junto con las distintas opciones y paneles disponibles dentro de la aplicación. Es importante destacar que el procesamiento de datos siguió la misma estructura general que el diagrama de flujo presentado en la Figura 24. Las modificaciones específicas realizadas se detallan en el siguiente capítulo.

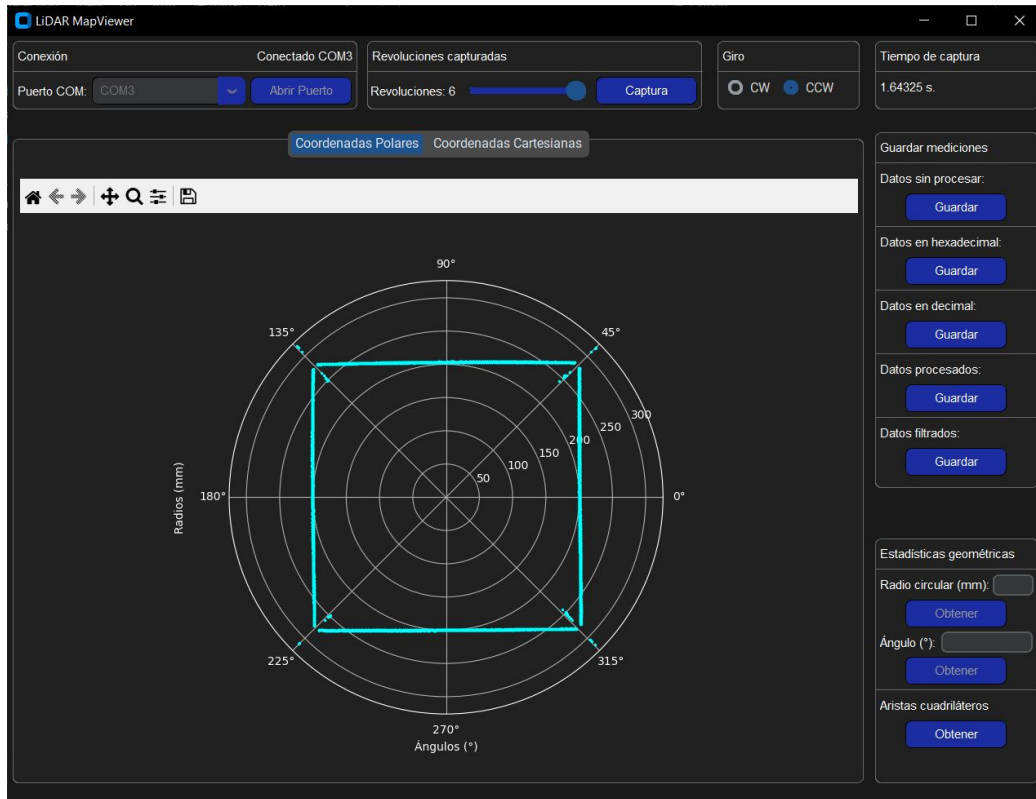


Figura 27: Vista de usuario, interfaz gráfica LiDAR MapViewer

- Panel de conexión: Este panel gestiona la conexión entre el ESP32 y el monitor a través de un puerto serial, que puede seleccionarse mediante un menú desplegable que muestra los puertos COM disponibles. La conexión se habilita mediante un botón, siempre que el puerto COM se encuentra activo y disponible.
- Panel de revoluciones capturadas: Este marco contiene los controles para seleccionar y visualizar el número de revoluciones capturadas por el LiDAR. Incluye un control deslizante que permite elegir entre 1 y 5 revoluciones, y un botón para iniciar la captura de datos.
- Panel de giro: Este panel cuenta con dos botones que permiten al usuario seleccionar la orientación del giro de los datos capturados por el LiDAR. Este selección ajusta el cálculo de los ángulos para su visualización.
- Panel de tiempo de captura: Muestra el tiempo total empleado por la interfaz para capturar, procesar y graficar todas las muestras seleccionadas por el usuario. El panel se actualiza al finalizar el proceso de captura.
- Panel de gráficos: Este marco contiene los gráficos de la interfaz, donde se visualizan los resultados de los datos capturados por el LiDAR, tanto en formato polar como cartesiano.
- Panel de guardado de mediciones: Este panel ofrece cinco opciones para almacenar distintos conjuntos de datos en archivos CSV:

- Datos sin procesar.
- Datos segmentados en hexadecimal.
- Datos segmentados en decimal.
- Datos procesados de ángulos y distancias.
- Datos filtrados de ángulos y distancias.

Cada botón permite al usuario elegir la ubicación donde se guardará la información, simplificando así la organización y el análisis de los datos recopilados.

- Panel de pruebas estadísticas: Sección en la cual se muestran los análisis estadísticos de las mediciones radiales y angulares capturadas por el sensor. Esta sección solamente aplica para reconstrucciones de entornos circulares. Además, se ofrece un botón con el cual se pueden calcular métricas para reconstrucciones de entornos cuadrados/rectangulares.

Calibración del LiDAR FHL-LD20

En este capítulo se describe la calibración del sensor LiDAR FHL-LD20, un proceso para corregir desviaciones sistemáticas en las lecturas, derivadas de factores inherentes del sensor, permitiendo que las mediciones reflejen con mayor fidelidad las dimensiones reales del entorno. La calibración no solo minimiza discrepancias en distancia y ángulo, aspectos esenciales en aplicaciones como la navegación robótica y el mapeo, sino que también establece criterios de evaluación claros y parámetros clave para mejorar el procesamiento de datos. Este proceso resulta fundamental para garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones, alineándolas con un estándar o referencia conocida. Al combinarse con la caracterización del sensor, este procedimiento sienta las bases para un desempeño más robusto en filtros y algoritmos avanzados, optimizando la calidad de las mediciones y su interpretación.

9.1. Desarrollo de plataforma física para pruebas y calibración del LiDAR FHL-LD20

La plataforma para pruebas preliminares se diseñó utilizando el software de Autodesk Inventor 2024. La estructura consistía en una base cuadrada de 400×400 mm sobre la cual se montaban cuatro paredes de 70 mm de altura de dos clases. Como se muestra en la Figura 28a, la primera clase de pared presentaba divisiones escalonadas cada 10 mm, lo que permitía sujetar otras paredes y brindar modularidad a la plataforma. Esta pared también contaba con dos ranuras: una para deslizar y ajustar su posición sobre la plataforma, y otra para facilitar el paso de los cables de conexión del sensor. La segunda, en cambio, era una pieza sin divisiones (ver Figura 28b), diseñada para proporcionar soporte estructural adicional y cerrar la plataforma.



(a) Pared modular con divisiones y ranuras

(b) Pared lisa de soporte estructural

Figura 28: Vista frontal de las dos clases de paredes laterales que componen la plataforma de pruebas

En la Figura 29 se observa que la base de la plataforma fue cubierta con una cuadrícula milimetrada en la que se marcaron cuatro líneas diagonales a 45, 135, 225 y 315 grados. Esto se realizó con el objetivo de proporcionar referencias visuales precisas de las dimensiones de la plataforma para el montaje de las paredes y la alineación exacta del sensor en el espacio. Además, se diseñó un soporte para sujetar y nivelar el sensor, incorporando dos patrones radiales que simulaban una brújula (ver Figura 30). Estos patrones se ubicaron a 135 y 225 grados desde el centro ideal del sensor, con un desplazamiento de 30 mm. Esta disposición permitió alinear el LiDAR correctamente, ya que, al estar su centro bloqueado visualmente, los patrones desplazados proporcionaban puntos de referencia para centrarlo con precisión, teniendo en cuenta la distancia radial de 30 mm y las diagonales de la base.

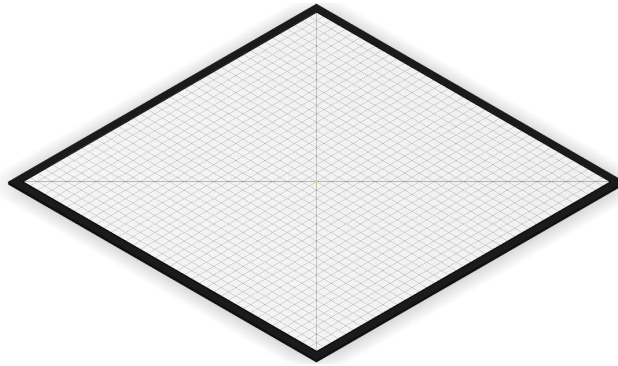


Figura 29: Vista isométrica de la base de la plataforma de pruebas

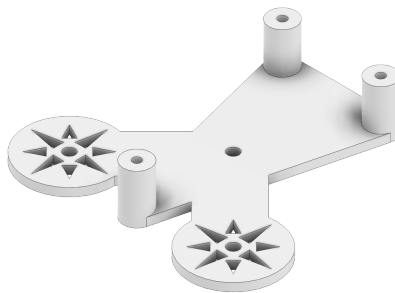


Figura 30: Vista isométrica del soporte para el LiDAR FHL-LD20

Las referencias visuales en la cuadrícula y las paredes de la plataforma permitieron comparar las lecturas obtenidas por el sensor con las dimensiones conocidas de la plataforma, ayudando a identificar cualquier desviación en las lecturas y permitiendo realizar ajustes en

la orientación del sensor. Este escenario controlado aseguraba que cada medición del sensor fuera consistente y replicable en diversas pruebas. En la Figura 31 se presenta el diseño del ensamble final de la plataforma de pruebas, mientras que en la Figura 32 se muestra la plataforma física fabricada junto con una reconstrucción visual del entorno, generada a partir de las lecturas del LiDAR tras el proceso de calibración descrito en la Sección 9.2.

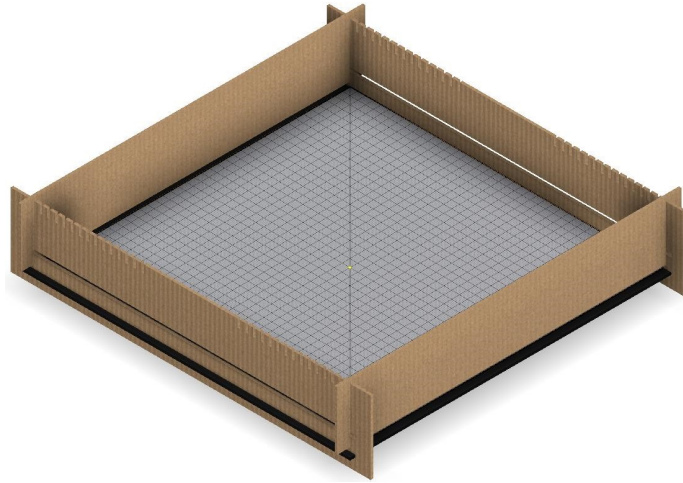


Figura 31: Vista isométrica de la plataforma de pruebas

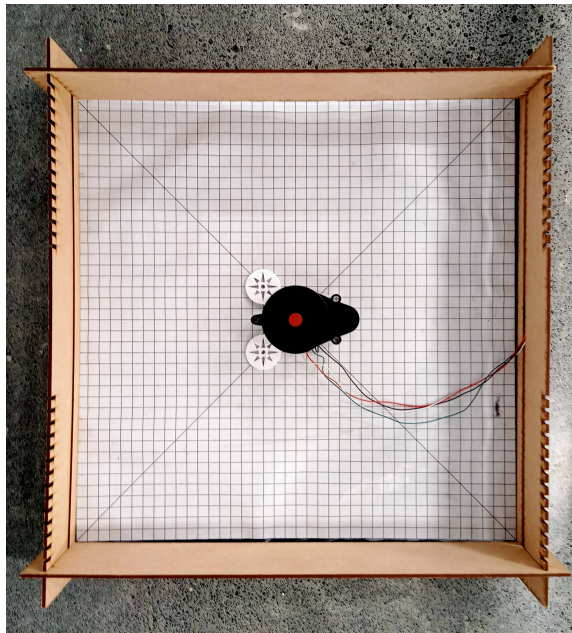


Figura 32: Vista superior de la plataforma de pruebas

Para asegurar una detección eficiente y minimizar el ruido generado por componentes estructurales de los agentes robóticos donde se instalará el sensor, se definió un rango mínimo de operación de 15 cm. Considerando un robot móvil como el Pololu 3pi+, permitir que el sensor opere a distancias menores podría hacer que registre elementos de su propia es-

estructura, afectando negativamente la precisión de las mediciones. Además, dado que es poco probable encontrar obstáculos relevantes a menos de 15 cm, este límite permite enfocar la detección en elementos que realmente impacten la navegación y mejoren la maniobrabilidad del robot.

9.2. Calibración de las mediciones del LiDAR FHL-LD20

En la primera reconstrucción realizada (Figura 26), se observaron deformaciones en las aristas de la caja, que no coincidían con los bordes rectos de la caja física. Estas deformaciones fueron causadas por la falta de corrección angular debida al desplazamiento físico del emisor/receptor del láser dentro de la carcasa. Este desplazamiento implica que el punto exacto desde donde se emite el láser y donde el sensor recoge las reflexiones está ligeramente descentrado con respecto al eje de rotación del sensor.

Cuando el láser no se emite desde el centro del círculo ideal que describe el barrido del LiDAR, se produce un desfase que afecta la precisión angular. Sin embargo, este desplazamiento interno no afecta la distancia medida, ya que sigue siendo una medición directa entre el sensor y el objeto. La luz viaja y vuelve directamente, similar a cómo se usaría una regla para medir la distancia en línea recta. El problema radica en que, un desfase angular interno provoca que el punto aparezca en una ubicación incorrecta en el plano, es decir, más a la izquierda o derecha de su verdadera posición.

El giro del sensor sobre un eje para medir diferentes ángulos genera inconsistencias cuando el emisor/receptor del láser está desplazado del centro de rotación. En este caso, los ángulos registrados no representan con precisión la posición real de los objetos en el entorno. Para abordar este error, la documentación del fabricante sugiere realizar una corrección basada en el código fuente proporcionado [25]. En este proceso, se utilizan dos valores ajustados: “x_val” y “y_val”, que incorporan los desplazamientos físicos del emisor/receptor en los ejes X y Y. Estos valores no representan las coordenadas cartesianas de los puntos medidos, sino que funcionan como parámetros de ajuste para calcular y corregir el error angular causado por el desfase interno del sensor.

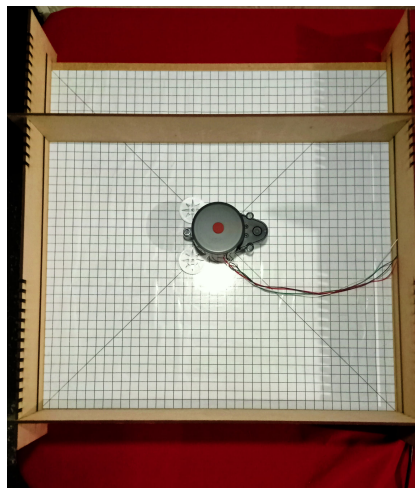
$$\begin{aligned}
 x_val &= distancia_radial + x_offset \\
 &\text{donde:} \\
 x_offset &= 5.9
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 x_val &= distancia_radial \times y_factor + y_offset \\
 &\text{donde:} \\
 y_offset &= -18.975571 \\
 y_factor &= 0.11923
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

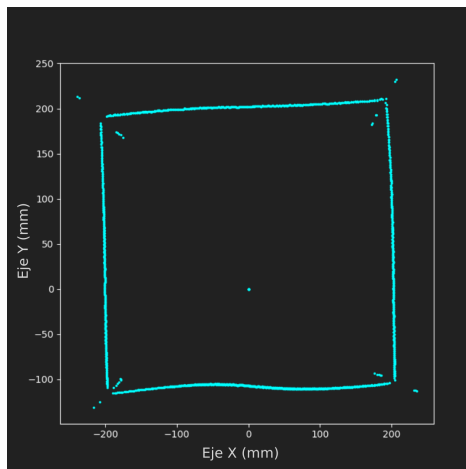
En la Ecuación 5, el valor ajustado “y_val” utiliza una constante “y_factor” de 0.11923. Aunque la documentación no especifica la razón exacta de este valor, se puede inferir que su

propósito era corregir la proyección angular de las mediciones. Probablemente compensando una inclinación natural del sensor o representando un ajuste empírico destinado a mejorar la precisión de las mediciones. A partir de los valores ajustados, se calcula un ángulo de corrección usando la función arcotangente de la relación “y_val” sobre “x_val”. Este ángulo de corrección refleja cuánto debe sumarse o restarse al ángulo original para compensar el desplazamiento interno del sensor.

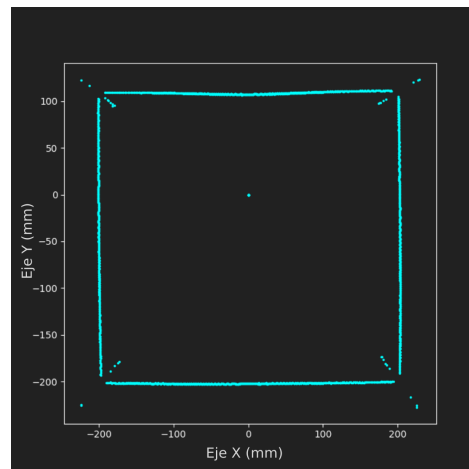
Si el sistema utiliza coordenadas en sentido antihorario, el ángulo se invierte (restándole 360 grados) y luego se suma el ángulo de corrección para obtener el valor final. En caso contrario, el ángulo de corrección se resta directamente del ángulo original. La Figura 33, muestra la disposición del sensor dentro de la caja, junto con una comparación de la reconstrucción visual obtenida a partir de tres revoluciones completas capturadas, utilizando el ángulo sin y con corrección.



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro de la caja



(b) Reconstrucción de tres revoluciones completas capturadas sin ángulo de corrección



(c) Reconstrucción de tres revoluciones completas capturadas con ángulo de corrección

Figura 33: Comparación de la reconstrucción con y sin ángulo de corrección: tres revoluciones completas capturadas

9.3. Precisión del LiDAR FHL-LD20 después del proceso de calibración

Para verificar la calibración del sensor, se colocó en el centro de la plataforma utilizando las brújulas incluidas en el soporte para asegurar su alineación. Una vez posicionado, se realizó una captura de tres revoluciones completas y se compararon los valores medidos de las aristas con los valores nominales esperados. Se realizó un análisis de la reconstrucción obtenida empleando como escenario la plataforma de pruebas preliminares. Este análisis incluyó la determinación de regresiones lineales en las aristas detectadas y el cálculo de diversas métricas para medir la fidelidad de las mediciones realizadas por el sensor. El proceso para evaluar la precisión del sensor para una caja de 400×400 mm se detalla a continuación.

En primer lugar, se aplicó un filtro para seleccionar los puntos más cercanos a las aristas esperadas, utilizando un intervalo de tolerancia de ± 5 mm. Luego, se excluyó una franja de 8 mm alrededor de los bordes de la caja para minimizar distorsiones relacionadas con el efecto de las esquinas, donde el ángulo de incidencia del haz sobre la superficie dificulta la detección precisa de la geometría. Estas áreas generan reflexiones difusas que alteran las mediciones del sensor (ver Sección 10.3.2). Tras el filtrado, se procedió a obtener la regresión lineal para cada conjunto de puntos que definía una arista de la caja reconstruida. Como se muestra en las Figuras 34, las aristas horizontales se ajustaron los valores del eje Y en función de los del eje X, mientras que para las aristas verticales se invirtió esta relación, ajustando los valores del eje X en función de los del eje Y (ver Figura 35). Este procedimiento evitó pendientes tendientes a infinito en las aristas verticales, generando pendientes cercanas a cero que facilitan su interpretación. De este modo, se logró una representación más clara y consistente de las características geométricas de la caja reconstruida.

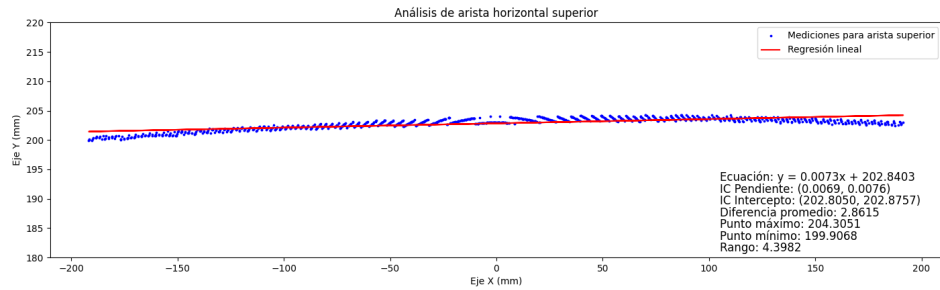
A partir de los puntos filtrados y las regresiones obtenidas, se calcularon las siguientes métricas para cada arista:

- Ecuación de la recta: Pendiente e intercepto obtenidos a partir del ajuste lineal.
- Intervalos de confianza (IC): Para la pendiente e intercepto, se calcularon intervalos de confianza del 95 %, proporcionando una medida de la incertidumbre en la estimación de los parámetros de la recta.
- Diferencia promedio. Media de las diferencias entre los puntos detectados y el valor real esperado, proporcionando una medida del error sistemático del sensor.
- Medición máxima y mínima: Los valores extremos detectados en cada conjunto de puntos que indican la variabilidad en las mediciones.
- Rango: Diferencia entre el valor máximo y mínimo, lo que refleja la dispersión de las mediciones.

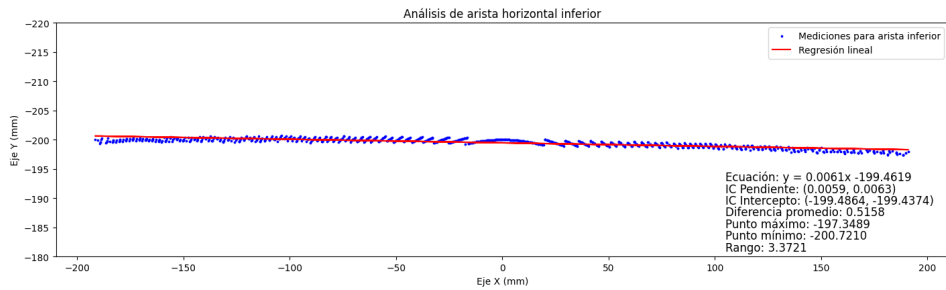
Para evaluar la rectitud de las aristas, se analizaron las pendientes obtenidas a partir del ajuste lineal. Los valores obtenidos muestran desviaciones mínimas respecto a la horizontalidad o verticalidad ideal, evidenciando una inclinación prácticamente despreciable.

Por ejemplo, la pendiente máxima observada para las aristas horizontales fue de 0.0073 (ver Figura 35a), lo que corresponde a un ángulo de inclinación aproximado de 0.42° respecto al eje horizontal, mientras que la máxima para las aristas verticales fue de 0.0077, con un ángulo de inclinación de 0.44° respecto al eje vertical (ver Figura 35b). Estas inclinaciones son insignificantes en comparación con la escala de la plataforma (400×400 mm) y se encuentran dentro de los márgenes atribuibles a errores en las herramientas de medición, así como a ligeras imprecisiones experimentales durante la orientación del sensor.

Los intervalos de confianza calculados para estas pendientes presentan rangos estrechos, reflejando una alta consistencia en las mediciones y una baja variabilidad entre los puntos analizados. Las magnitudes de las pendientes, todas cercanas a cero, corroboran que las aristas reconstruidas se aproximan con gran precisión a la geometría ideal de líneas rectas. Estos resultados demuestran que el sistema es capaz de capturar la rectitud esperada con un nivel de precisión altamente satisfactorio.

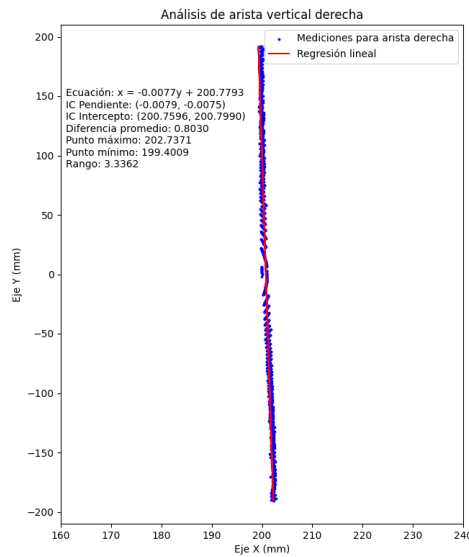


(a) Análisis de arista horizontal superior

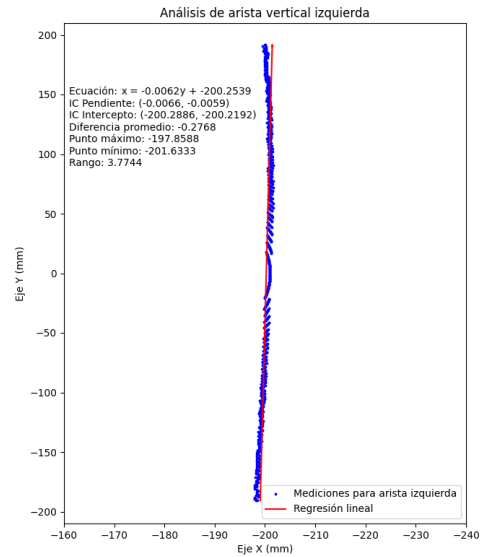


(b) Análisis de arista horizontal inferior

Figura 34: Análisis de la reconstrucción realizada para las aristas horizontales de una caja de 400×400 mm: tres revoluciones completas capturadas



(a) Análisis de arista vertical derecha



(b) Análisis de arista vertical izquierda

Figura 35: Análisis de la reconstrucción realizada para las aristas verticales de una caja de 400×400 mm: tres revoluciones completas capturadas

El intercepto calculado resulta útil para evaluar el alineamiento general del sensor con respecto a las posiciones esperadas. En todos los casos, se observan ligeras desviaciones en el intercepto que oscilaban entre 0.3959 mm y 2.4565 mm con respecto a las dimensiones esperadas de ± 200 mm, lo cual es relativamente bajo. El análisis de los intervalos de confianza de la pendiente y el intercepto proporciona una medida de la fiabilidad de estos parámetros. Al mostrar rangos estrechos, se demuestra una fuerte consistencia en las mediciones, lo cual refuerza la confiabilidad de las regresiones lineales obtenidas.

El rango de las mediciones, que varió entre 3.8049 mm y 4.4322 mm para las diferentes aristas, refleja una dispersión controlada. La diferencia promedio entre las mediciones registradas y el valor real esperado, inferior a 3 mm, confirma que la dispersión de las mediciones se encuentra dentro de los límites de precisión indicados en la Sección 10.3.1. En resumen, las métricas analizadas demuestran que el sensor presenta una buena precisión general. A pesar que se observen pequeñas desviaciones, los errores están por debajo de los 5 mm, lo cual es aceptable para la mayoría de las aplicaciones, en especial para navegación autónoma. En la Figura 36 se muestra la reconstrucción de la plataforma de pruebas junto con los ajustes lineales. Se destaca que la inclinación de los ajustes lineales en la reconstrucción es despreciable para las dimensiones de la propia plataforma.

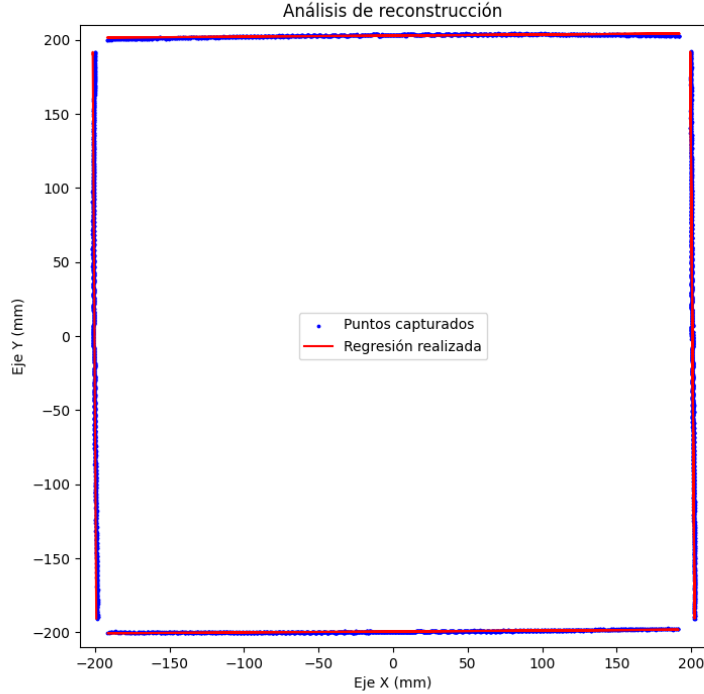


Figura 36: Vista superior de la plataforma de pruebas reconstruida con los ajustes lineales

En la Sección 10 se detallan pruebas adicionales que complementan el proceso de calibración, proporcionando información clave para el posprocesamiento de los datos. Estas pruebas permiten analizar en mayor profundidad la precisión y consistencia del sensor en diferentes escenarios, lo que resulta esencial para su correcta calibración posprocesamiento. A partir de los resultados descritos en los párrafos anteriores y de las pruebas realizadas en la siguiente sección, se definieron los criterios de evaluación para la calibración del sensor:

- Exactitud al reconstruir las dimensiones de objetos calibrados (escenarios circulares o plataforma de pruebas): Los valores reconstruidos deben coincidir con las dimensiones nominales de referencia, con desviaciones menores a ± 5 mm.
- Diferencia entre la distancia medida y la distancia real: El error promedio debe mantenerse por debajo de 3 mm, conforme a los límites de precisión indicados en la Sección 10.
- Variabilidad en las mediciones realizadas en condiciones idénticas: La dispersión debe ser mínima, con un rango de variabilidad inferior a ± 5 mm en mediciones repetidas en las mismas condiciones.
- Consistencia de las pendientes en las aristas reconstruidas: Para el caso de escenarios cuadrados/rectangulares, al centrar correctamente el LiDAR utilizando su soporte, las pendientes obtenidas de las regresiones deben ser cercanas a cero, reflejando la rectitud esperada de la geometría.

- Análisis de la dispersión angular en puntos de transición geométrica: Los valores mínimos, máximos y promedio de las mediciones angulares deben alinearse con los valores teóricos esperados, con una variabilidad inferior a $\pm 3^\circ$ (ver Sección 10.3.2).

Estos criterios resultan relevantes para evaluar la capacidad del sensor en escenarios que abarcan tanto geometrías simples como aquellas con transiciones abruptas. Cabe señalar que la variabilidad en las mediciones indicadas en los criterios, con márgenes de ± 3 mm, ± 5 mm o $\pm 3^\circ$, son prácticamente despreciables en la aplicación de navegación autónoma dentro de un espacio de trabajo como lo puede ser el Robotat (4.8×3.8 m) o en el rango mínimo de medición establecido de 15 cm (ver Sección 10.2). Sin embargo, se recomienda implementar técnicas de posprocesamiento, como el suavizado de datos o algoritmos de compensación geométrica, para mitigar las dispersiones en las mediciones. Dichas técnicas deben considerar la variabilidad identificada en esta y la siguiente sección, tanto para las mediciones radiales como para las angulares, permitiendo así compensar o mitigar dicha variabilidad y generando mejores aproximaciones del entorno.

Caracterización del LiDAR FHL-LD20

En este capítulo se describe la caracterización del sensor LiDAR FHL-LD20, un procedimiento diseñado para evaluar y modelar la confiabilidad de sus mediciones bajo condiciones reales de operación. Este análisis se centra en las variaciones presentes en las mediciones de distancia y ángulo registradas por el sensor. Proporciona, además, una comprensión detallada de los parámetros de incertidumbre asociados, los cuales facilitan su integración en algoritmos de percepción y navegación autónoma, como el filtro de Kalman extendido (EKF). Este proceso permite validar las especificaciones proporcionadas por el fabricante, que pueden diferir del desempeño real en campo. Además, resulta clave para adaptar el sensor a las condiciones específicas de la aplicación, identificar posibles limitaciones y optimizar su configuración para maximizar su rendimiento en la implementación final.

10.1. Depuración de mediciones nulas en el LiDAR FHL-LD20

Como se describe en la Sección 9.2, el proceso de calibración utiliza las distancias en formato decimal, para calcular el ángulo de corrección, el cual ajusta la posición angular de los puntos medidos por el LiDAR. En el diagrama de flujo (Figura 37), se puede apreciar que el procesamiento depende de si la distancia medida es mayor a cero. Cuando es mayor, se calculan tanto los valores de ajuste como el ángulo de desplazamiento real. Una vez determinado el ángulo real, se actualiza el valor del ángulo de corrección antiguo por el más reciente.

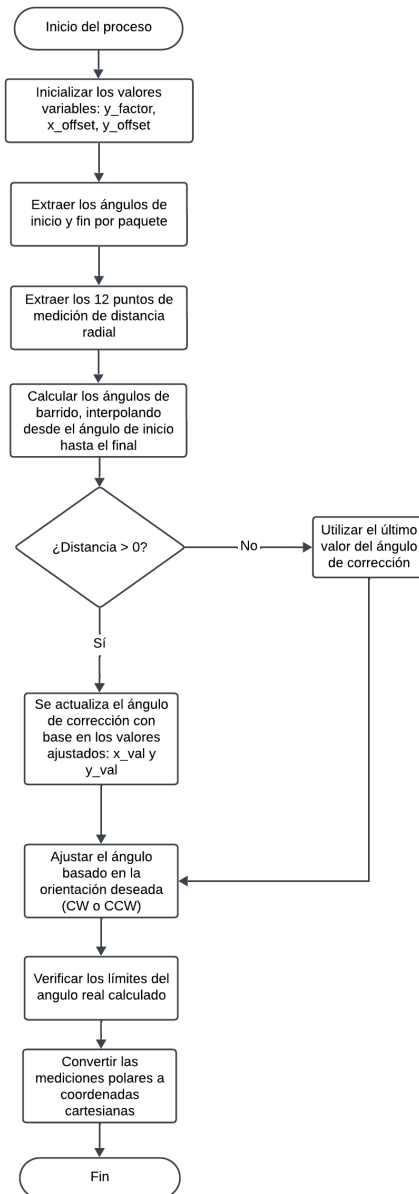
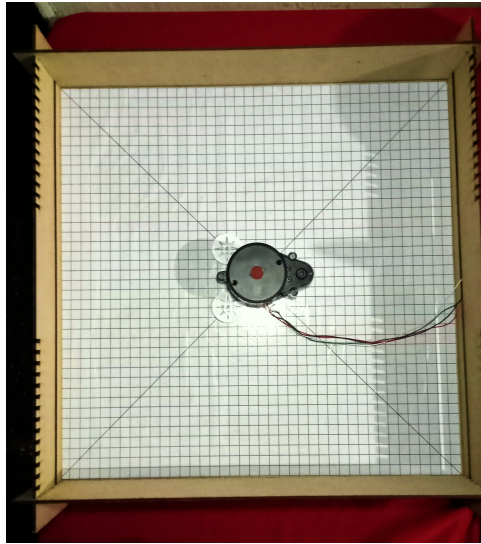


Figura 37: Diagrama de flujo general para procesamiento de datos en formato decimal

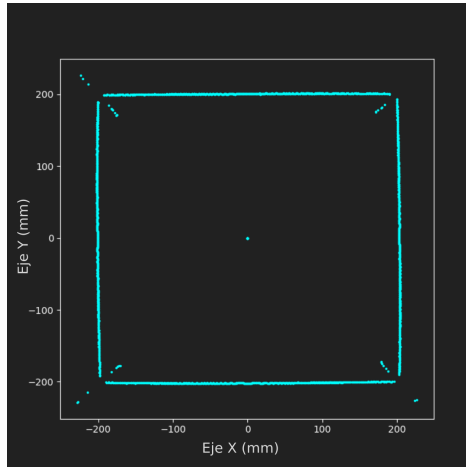
En caso de que la distancia medida sea igual a cero, no se recalculan los valores de ajuste, ya que la medición carece de información para ese punto. En su lugar, se reutiliza el último ángulo de corrección calculado, para ajustar el ángulo real de esa medición nula. Este procedimiento garantiza que incluso estas mediciones mantengan una continuidad angular coherente respecto a las anteriores, evitando distorsiones en la reconstrucción del entorno. Sin embargo, incluir estas mediciones nulas en los gráficos de coordenadas polares y cartesianas resulta innecesario, ya que, físicamente, el sensor no es capaz de registrar mediciones justo en su eje de rotación.

Estos puntos añaden cierta confusión visual al interpretar el entorno capturado. Por

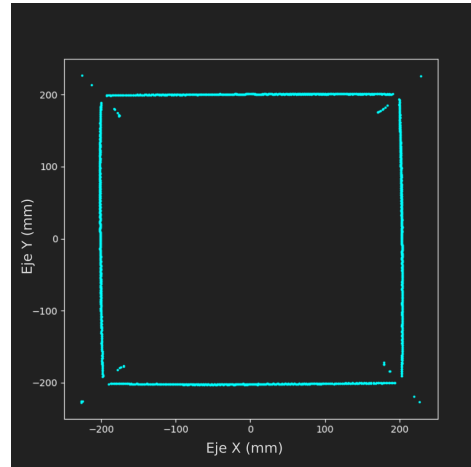
esta razón, se optó por filtrar las mediciones cuya distancia radial fuese cero. Al eliminar estos puntos en la generación de los gráficos, se preservan solo las distancias que aportan información relevante sobre el entorno. Este filtrado mejora la claridad y precisión de la representación de los objetos detectados, lo cual mejora la interpretación de los datos capturados. En la Figura 38 se muestra la comparación antes y después de depurar las mediciones nulas capturadas.



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro de la caja

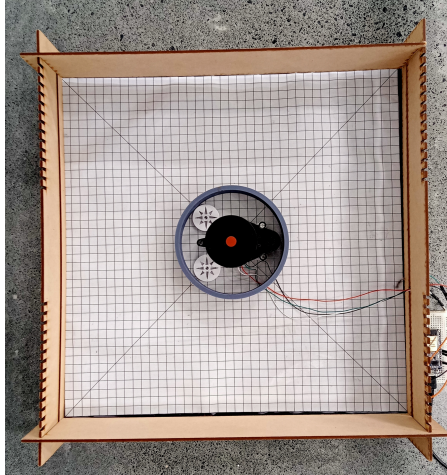


(b) Reconstrucción de tres revoluciones completas capturadas sin filtro de mediciones nulas

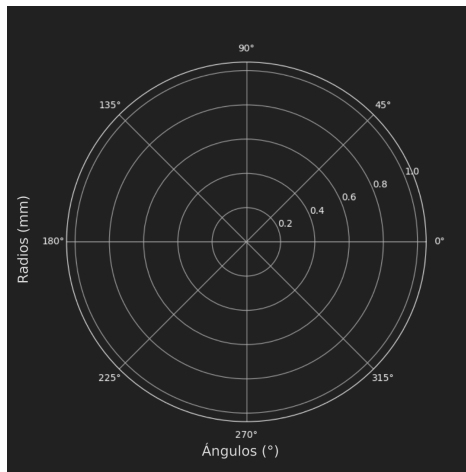


(c) Reconstrucción de tres revoluciones completas capturadas con filtro de mediciones nulas

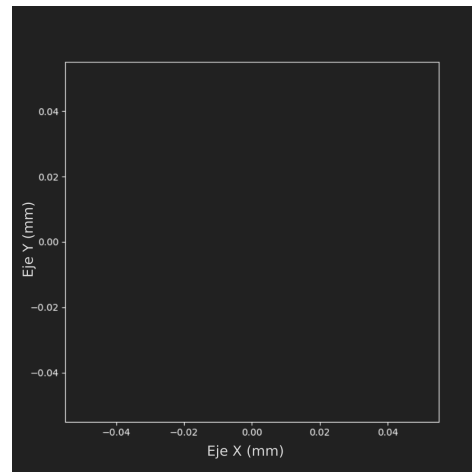
Figura 38: Comparación de la reconstrucción con y sin filtro de mediciones nulas: tres revoluciones completas capturadas



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 60 mm de radio



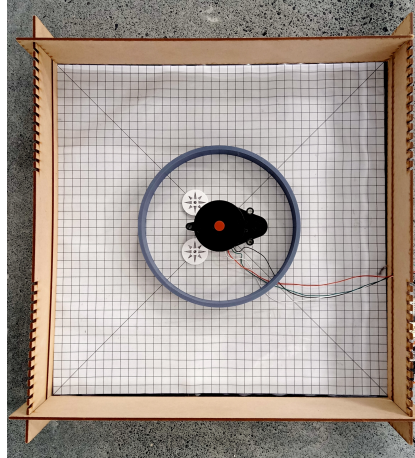
(b) Reconstrucción en coordenadas polares de tres revoluciones completas capturadas en entorno circular: 60 mm de radio



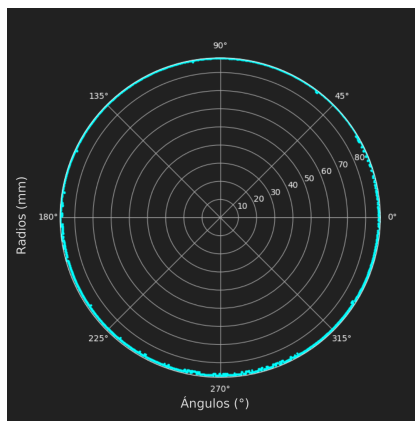
(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de tres revoluciones completas capturadas en entorno circular: 60 mm de radio

Figura 40: Reconstrucciones vacías de tres revoluciones completas capturadas en entorno circular: 60 mm de radio

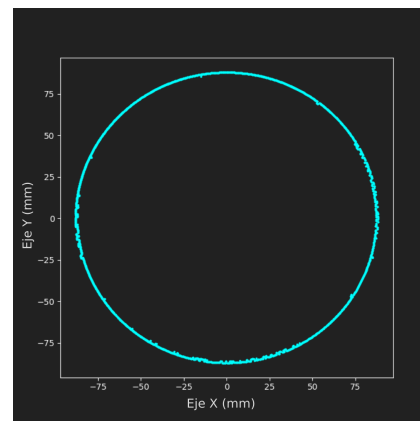
Se llevaron a cabo pruebas adicionales utilizando los contornos circulares de 70, 80, 90 y 100 mm de radio (ver Figuras 71 y 72 en Anexos 15.1). El entorno circular de 90 mm de radio fue el primero en mostrar indicios de distancias válidas en la reconstrucción. Aunque se logró visualizar una geometría circular, esta presentó irregularidades. Como se observa en la Figura 41, existen variaciones en la distribución de los puntos capturados.



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular:
90 mm de radio



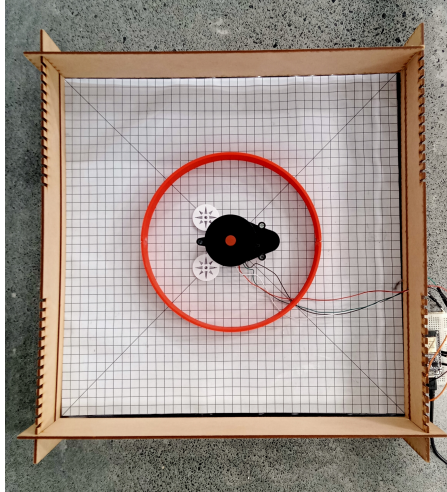
(b) Reconstrucción en coordenadas polares de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 90 mm de radio



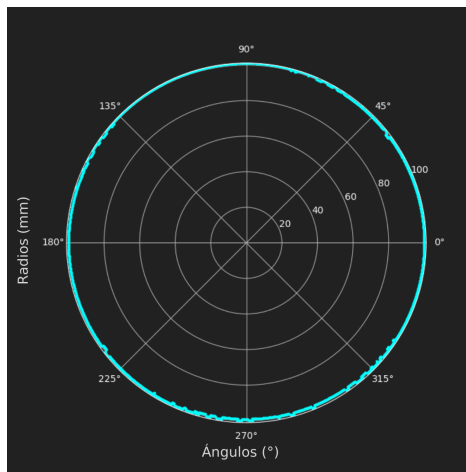
(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 90 mm de radio

Figura 41: Reconstrucción del entorno circular de 90 mm de radio con tres revoluciones completas capturadas

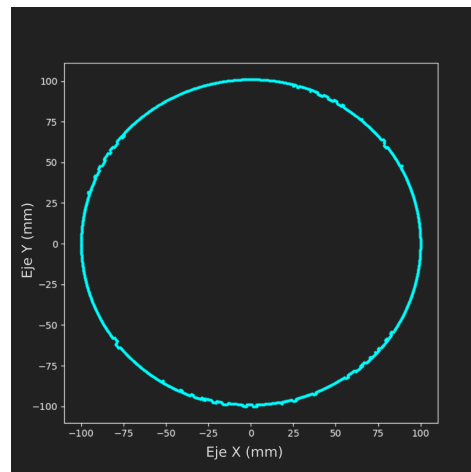
Al realizar la reconstrucción del entorno de 100 mm de radio, se evidenció una geometría más continua y mejor ajustada a la figura esperada. Sin embargo, todavía se observaron ciertas variaciones en la continuidad de la geometría. Al analizar el acabado superficial de los escenarios circulares impresos, se identificó que la rugosidad inherente en las piezas fabricadas pudo influir en la dispersión de las mediciones. Por esta razón, se decidió emplear un material diferente en las pruebas subsecuentes, con el objetivo de minimizar este efecto y mejorar la calidad de las mediciones capturadas. Cabe destacar que, aunque las especificaciones del fabricante indicaban un rango mínimo de medición de 100 mm, el entorno de 90 mm de radio, pese a estar por debajo de este umbral, fue capturado con notable precisión.



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 100 mm de radio



(b) Reconstrucción en coordenadas polares de tres revoluciones completas capturadas en entorno circular: 100 mm de radio



(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de tres revoluciones completas capturadas en entorno circular: 100 mm de radio

Figura 42: Reconstrucción del entorno circular de 100 mm de radio con tres revoluciones completas capturadas

Para garantizar una detección eficiente y reducir el ruido causado por los componentes estructurales de los agentes robóticos donde se integrará el sensor, como es el caso del Pololu 3pi+, se ha establecido un rango mínimo de medición de 15 cm. A distancias inferiores a esta, el sensor podría captar partes del propio robot, lo que afectaría negativamente la precisión de las mediciones. Además, dado que la probabilidad de encontrar obstáculos relevantes a menos de 10 cm en el entorno de operación es baja, establecer este límite permite enfocarse en la detección de obstáculos que realmente impacten en la navegación del agente robótico.

10.3. Estimación de las varianzas del sensor

En aplicaciones de mapeo de entornos con agentes robóticos móviles, la localización del robot depende de mediciones de distancia y ángulo hacia puntos de referencia fijos (*landmarks*). Describir cómo un sensor de distancia, como un LiDAR, mide su posición relativa con respecto a estos puntos resulta esencial para construir un mapa coherente y actualizar la posición del robot en función de sus observaciones. Este enfoque permite corregir errores acumulados de odometría y reducir la incertidumbre en la estimación de posición, lo que posibilita que los agentes robóticos se localicen y mapeen su entorno de manera precisa y confiable [17]. Para modelar matemáticamente las observaciones de un sensor de distancia equipado en un agente robótico, se emplea la Ecuación (6).

$$z = h(x, p_i) \quad (6)$$

donde $x = (x_v, y_v, \theta_v)^T$ representa el estado del agente robótico, con x_v y y_v como sus coordenadas en el sistema global y θ_v como su orientación. Mientras que $p_i = (x_i, y_i)^T$ denota la posición conocida del i -ésimo punto de referencia en el entorno. Para modelar la incertidumbre en las mediciones de distancia y ángulo, la Ecuación (7) extiende el modelo de observación, añadiendo un vector de ruido que refleja los errores en estas mediciones.

$$z = h(x, p_i) = \begin{pmatrix} \sqrt{(y_i - y_v)^2 + (x_i - x_v)^2} \\ \tan^{-1} \left(\frac{y_i - y_v}{x_i - x_v} \right) - \theta_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_r \\ w_\beta \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} w_r \\ w_\beta \end{pmatrix} \sim N(0, W), W = \begin{pmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

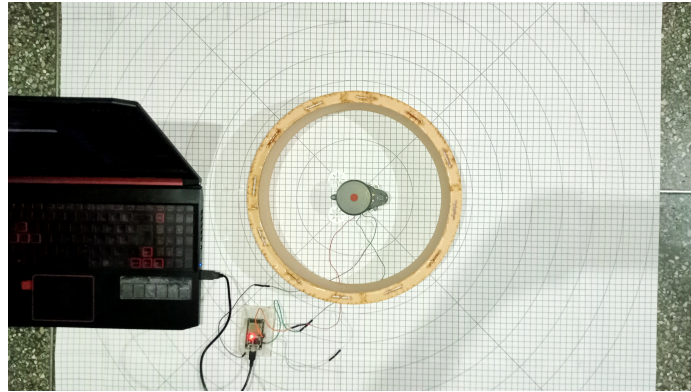
Esta ecuación describe cómo el sensor mide la distancia r y el ángulo β al punto de referencia p_i , incorporando un vector de ruido en las mediciones. Este modelo asume que los errores w_r y w_β siguen una distribución Gaussiana con media cero y varianza conocida en las mediciones de distancia y ángulo, respectivamente. En la Ecuación 8 se especifica la matriz de covarianza W , en la cual σ_r^2 representa la varianza del error en la distancia y σ_β^2 la varianza del error en el ángulo. Esta matriz de covarianza refleja que las observaciones del sensor están sujetas a una incertidumbre inherente.

Para estimar las varianzas σ_r^2 y σ_β^2 se llevaron a cabo dos experimentos con el sensor LiDAR FHL-LD20. El primero se centró en evaluar la varianza asociada a las mediciones de distancia, mientras que el segundo se enfocó en analizar las mediciones angulares. Ambos experimentos fueron diseñados para proporcionar una comprensión más profunda del rendimiento del sensor y su precisión en condiciones de operación.

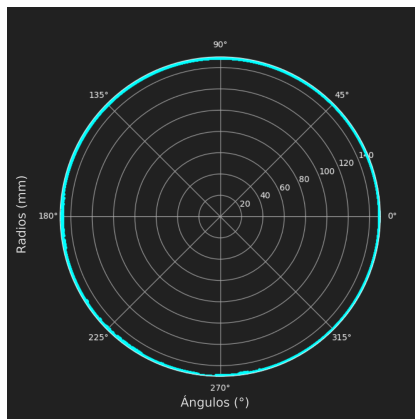
10.3.1. Estimación de la varianza asociada a las mediciones de distancia del sensor

Para el primer experimento, se diseñaron ocho círculos concéntricos con radios de 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 mm, todos con una altura de 70 mm. Estos círculos

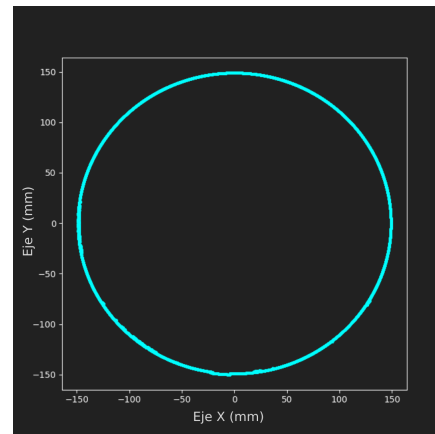
fueron fabricados en MDF y recubiertos con una capa uniforme de cartón de 1 mm de grosor. Además, se imprimió una cuadrícula de 1.2×1.2 metros, dividida en intervalos de un centímetro. Esta cuadrícula incluía una serie de círculos concéntricos con los radios mencionados y líneas diagonales que cruzaban su centro, creando un sistema de referencia radial. En conjunto, este diseño ofreció un entorno controlado para analizar las mediciones en coordenadas polares y cartesianas.



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 149 mm de radio

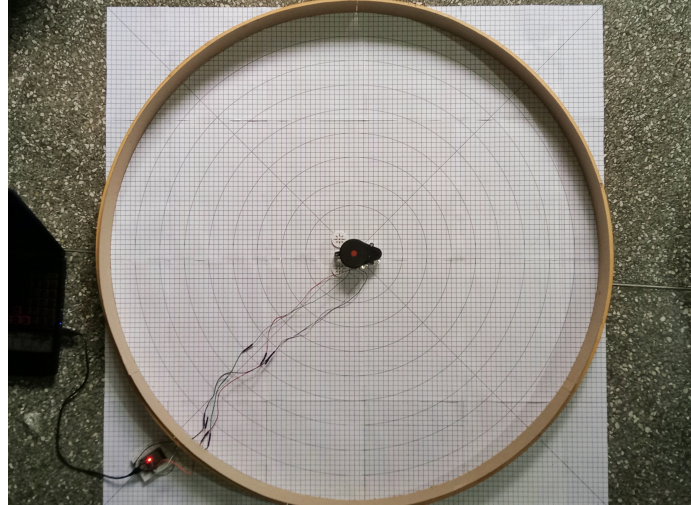


(b) Reconstrucción en coordenadas polares de entorno circular: 149 mm de radio

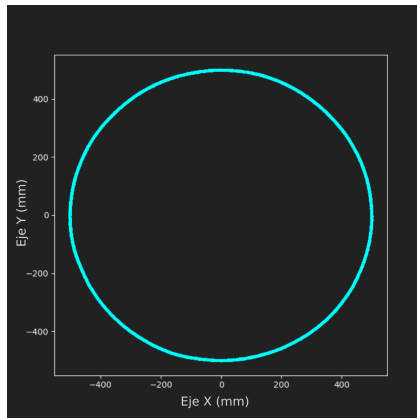


(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 149 mm de radio

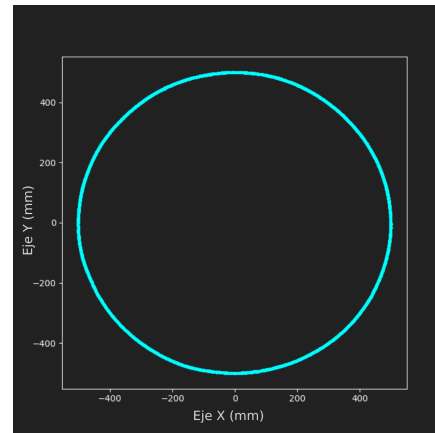
Figura 43: Reconstrucción con 180 revoluciones completas capturadas del entorno circular: 149 mm de radio



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 499 mm de radio



(b) Reconstrucción en coordenadas polares de entorno circular: 499 mm de radio



(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 499 mm de radio

Figura 44: Reconstrucción del entorno circular de 499 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas

Como se muestra en las Figuras 43 y 44, el sensor se posicionó en el centro de la cuadrícula y se alineó concéntricamente uno de los círculos fabricados, utilizando las líneas radiales como guía. Con esta disposición se esperaba que el sensor registrara mediciones uniformes a lo largo de todo el perímetro del círculo. Después de capturar un total de 180 revoluciones, equivalente a 129,600 puntos de medición, y repetir diez veces las mediciones, fue posible establecer el promedio, varianza muestral y sesgo asociados con las distancias medidas por el sensor para cada círculo. El análisis de los datos obtenidos con los ocho círculos permitió evaluar la precisión del sensor a distintas distancias, proporcionando una base sólida para caracterizar la variabilidad en las mediciones y determinar la varianza asociada en cada caso.

Los resultados del experimento se presentan en el Cuadro 21, donde se muestran las varianzas calculadas para cada uno de los ocho radios evaluados. En todos los casos, se verificó que las mediciones se ajustaran a una distribución gaussiana normal (ver Figuras 85 a 87 en Anexos 15.2), lo que respalda la validez del modelo de ruido asumido para las

observaciones del sensor (Sección 10.3). Además, se observó que, a medida que aumentaba la distancia de los radios, también se incrementaba la varianza en las mediciones, indicando una disminución gradual en la exactitud del sensor. Para caracterizar esta relación, se realizó un ajuste lineal de los datos, como se muestra en la Figura 45, lo que permitió describir la variación de la varianza en función de la distancia. Es importante señalar que el valor esperado para cada medición resultó ser 1 mm menor que el radio del círculo evaluado debido al grosor del recubrimiento de cartón.

Radio real (mm)	Promedio de mediciones capturadas (mm)	Sesgo (mm)	Varianza muestral (mm ²)
499	499.2150	-0.7850	2.4503
449	448.5695	-0.4306	1.4682
399	398.3953	-0.6047	1.3529
349	348.0344	-0.9656	1.0317
299	298.0343	-0.9657	0.5360
249	249.1742	0.1742	0.5493
199	199.9887	0.9895	0.4950
149	148.9746	-0.0254	0.0970

Cuadro 21: Estadísticas de precisión: valores promedio de distancia, sesgo y varianza muestral obtenidos para cada radio tras las diez corridas realizadas

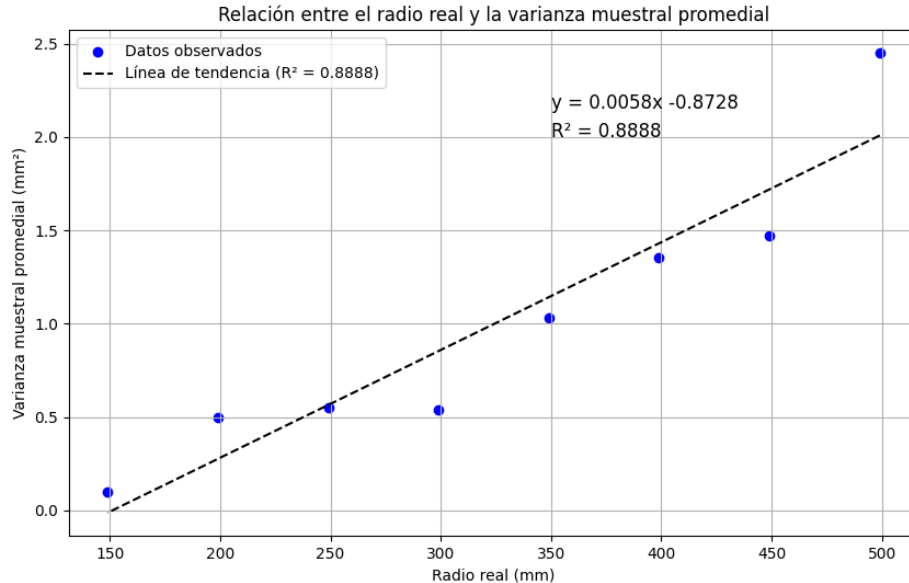


Figura 45: Ajuste lineal para la variación de la varianza en función de la distancia

En la Figura 46, se aprecia que para el primer círculo, con un radio real de 149 mm, la variabilidad de los puntos medidos fue relativamente baja (± 1 mm), con una notable concentración de mediciones cercanas al valor esperado (149 mm). Sin embargo, al aumentar el radio medido, la dispersión de los puntos incrementó hasta ± 4 mm sobre el valor esperado

(499 mm), reflejando una mayor variabilidad en las mediciones (ver Figura 47). En cuanto al sesgo o *bias*, la Figura 48 demuestra que no se identificó una tendencia clara, ya que este oscilaba entre aproximadamente -0.9657 mm y 0.9895 mm. Es importante destacar que la varianza muestral, promedio y sesgo reportados en el Cuadro 21 representan los promedios obtenidos en las diez corridas realizadas, proporcionando así una estimación robusta de las mediciones en cada radio. Para una comprensión más detallada de los resultados, en los Anexos 15.2 se encuentran las estadísticas completas de cada corrida realizada.

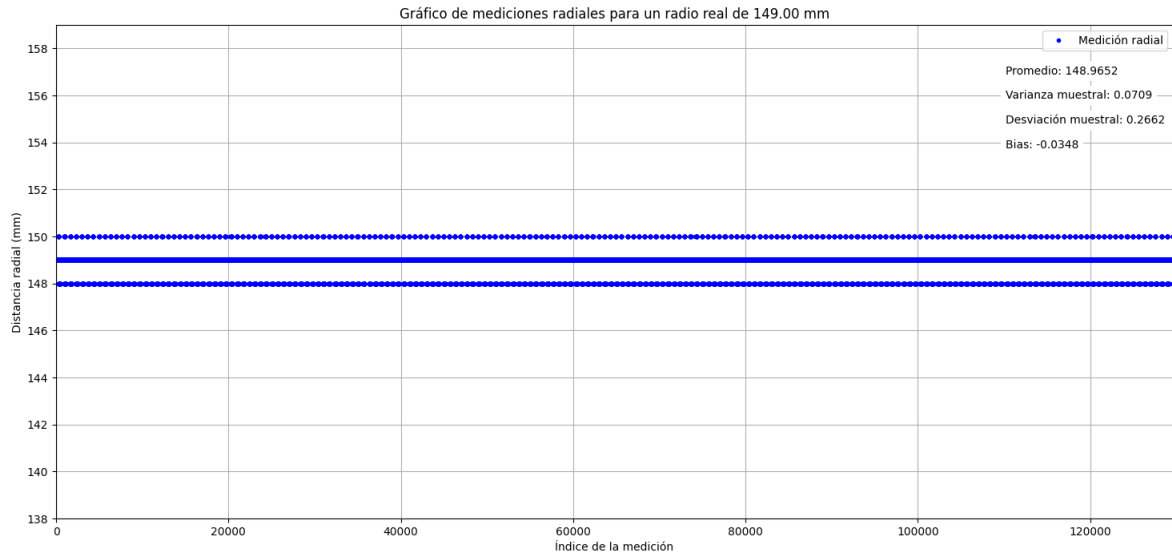


Figura 46: Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 149 mm

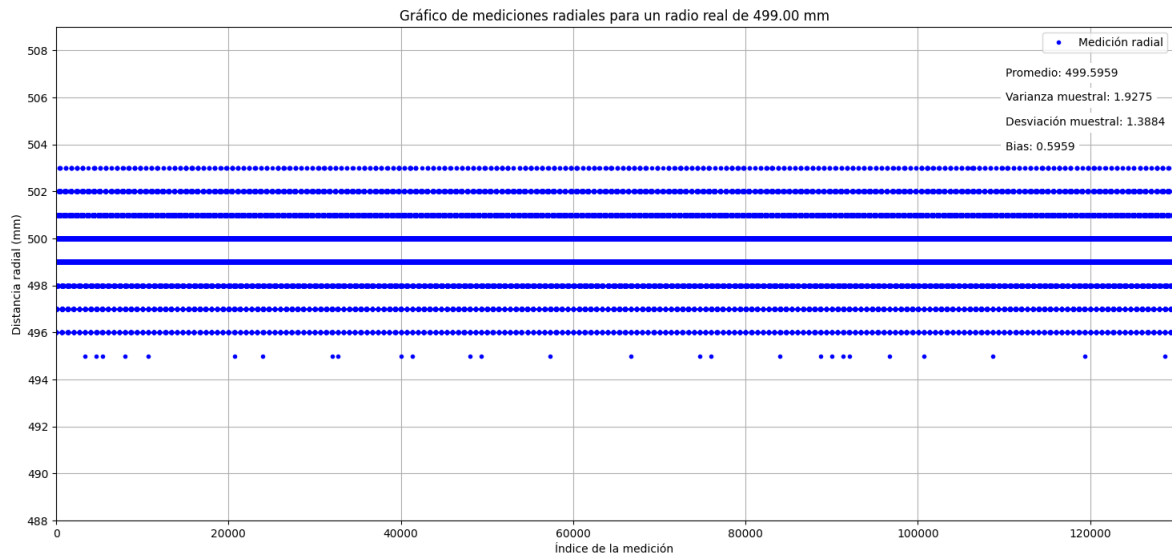


Figura 47: Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 499 mm

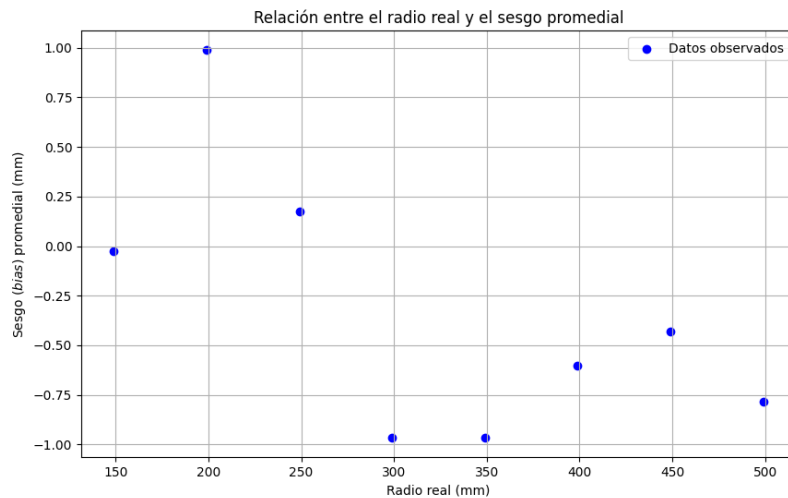


Figura 48: Variación del sesgo en función de la distancia

10.3.2. Dispersión de las mediciones angulares del sensor

En el segundo experimento, se utilizó el mismo conjunto de círculos del ensayo anterior, añadiendo un noveno círculo de 70 mm de radio, diseñado específicamente para obstruir parcialmente el campo de visión del sensor. Como se muestra en las Figuras 50 y 51, el sensor se mantuvo estático en el centro de la cuadrícula de referencia, mientras se colocaron dos círculos: uno externo, correspondiente a uno de los círculos previamente utilizados, y el círculo de obstrucción visual, con una apertura aproximada de 40° (ver Figura 49). Además,

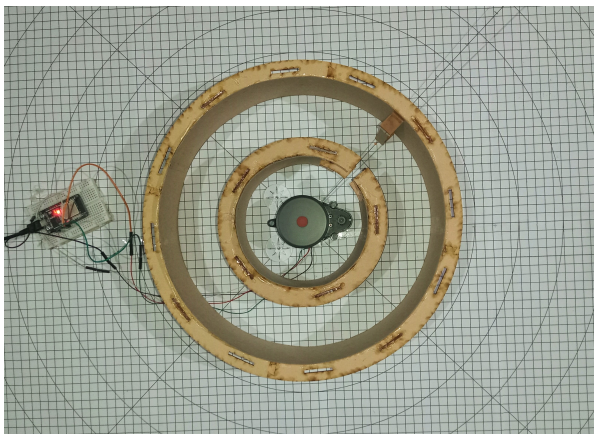
se situó un arco circular con un radio 20 mm menor al del círculo externo, abarcando un rango angular de 5°. Esta disposición permitió evaluar cómo las mediciones angulares del sensor respondían a los cambios geométricos entre el círculo y el arco dentro del área de apertura, enfocando la medición hacia el arco situado frente al círculo externo. Cabe señalar que el arco fue colocado arbitrariamente entre los 42° y 47°, respecto al eje horizontal positivo, definiendo así los puntos de transición teóricos para el análisis.



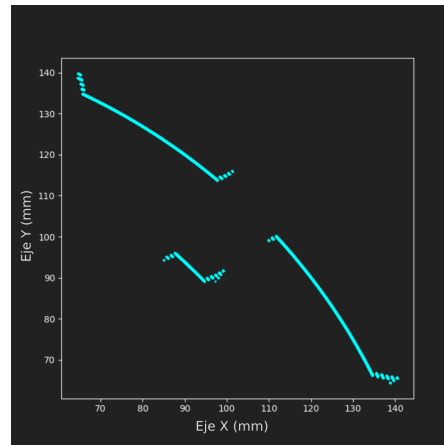
(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del círculo de obstrucción visual: 70 mm de radio, vista isométrica frontal

(b) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del círculo de obstrucción visual: 70 mm de radio, vista isométrica trasera

Figura 49: Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del círculo de obstrucción visual con apertura de aproximadamente 40°

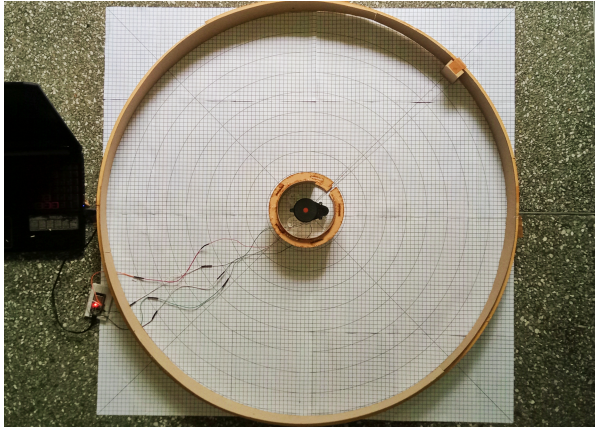


(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 149 mm de radio con arco

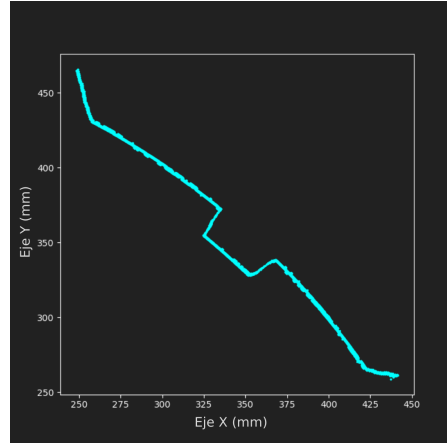


(b) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 149 mm de radio con arco

Figura 50: Reconstrucción del entorno circular de 149 mm de radio con arco, 180 revoluciones completas capturadas



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 499 mm de radio con arco



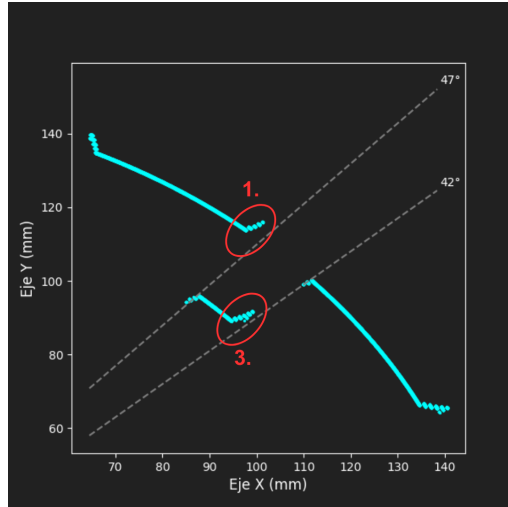
(b) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 499 mm de radio con arco

Figura 51: Reconstrucción del entorno circular de 499 mm de radio con arco, 180 revoluciones completas capturadas

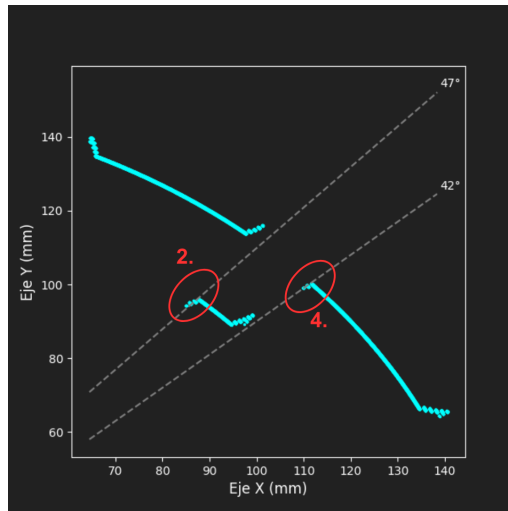
Como se observa en la Figura 52, para evaluar el comportamiento del sensor en estas transiciones, se tomaron cuatro puntos de referencia principales:

1. La última medición registrada del círculo externo antes de iniciar el arco.
2. La primera medición correspondiente al inicio del arco.
3. La última medición antes de finalizar el arco.
4. La primera medición del círculo externo tras concluir el arco.

Estos puntos representaron instantes determinantes en las transiciones geométricas, sirviendo como base para analizar la dispersión de las mediciones angulares.



(a) El óvalo rojo muestra la ubicación de dos puntos de referencia y su número de identificación



(b) El óvalo rojo muestra la ubicación de dos puntos de referencia y su número de identificación

Figura 52: Cuatro puntos de referencia principales en las transiciones de geometría

Los resultados del experimento se presentan en los Cuadros 32 y 33 en Anexos 15.3, donde se detallan los rangos de los valores experimentales en los puntos de transición (42° y 47° , respectivamente), para cada uno de los ocho escenarios evaluados, tras capturar 1080 mediciones por ángulo. Al analizar la distribución de estos datos, se determinó que las mediciones angulares seguían una distribución normal (ver Anexos 33a), lo que hace que la varianza tradicional no sea la métrica más adecuada para representar la dispersión observada. Por ello, en las Figuras 53 a 56 se presentan únicamente los valores mínimo, máximo y promedio de las mediciones angulares en los puntos de referencia. Adicionalmente, en los Figuras 94) a 103 en Anexos 15.3 se incluyen gráficos que muestran las desviaciones angulares respecto a los valores esperados (deltas de variación) para cada transición.

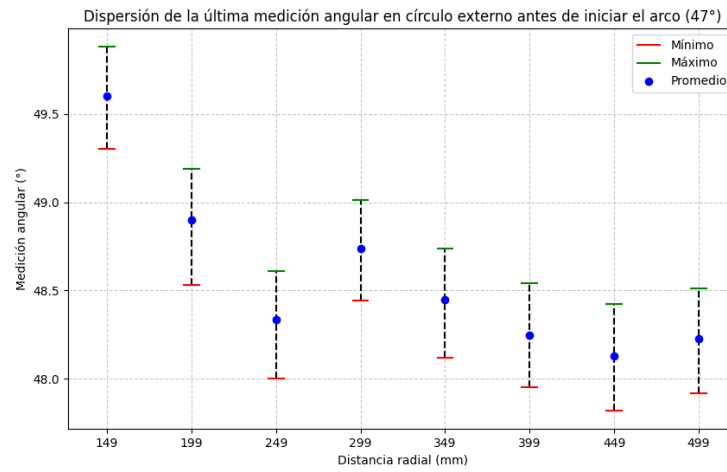


Figura 53: Dispersión angular en la última medición del círculo externo antes del arco a diferentes distancias radiales

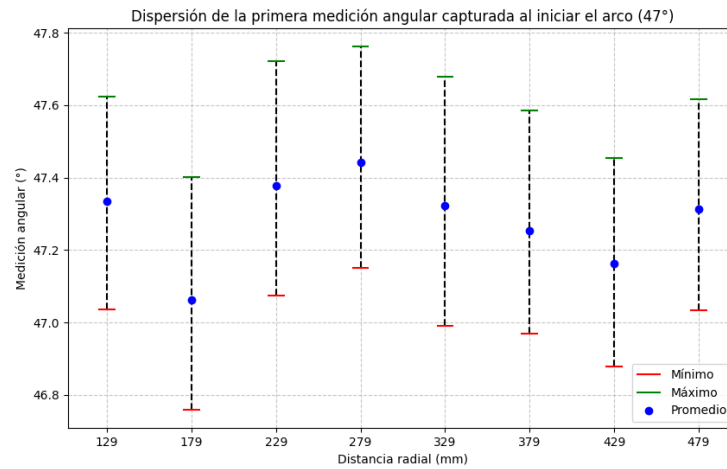


Figura 54: Dispersión angular en la primera medición correspondiente al inicio del arco a diferentes distancias radiales

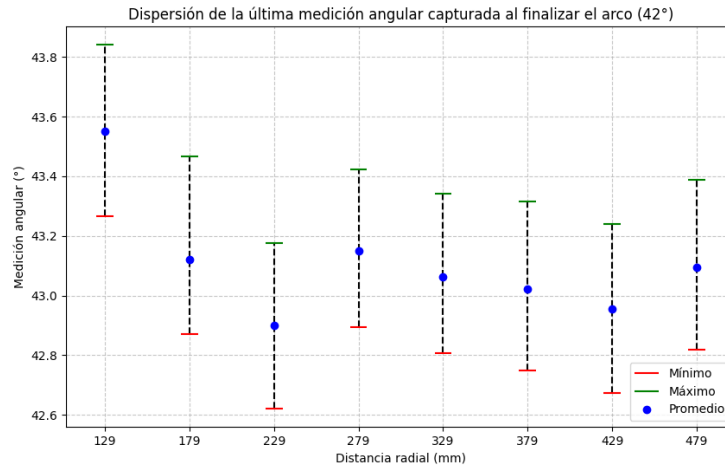


Figura 55: Dispersión angular en la última medición justo antes de finalizar el arco a diferentes distancias radiales

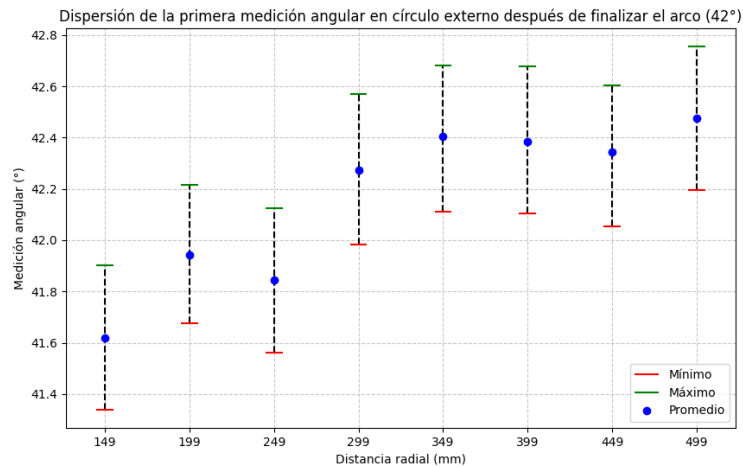


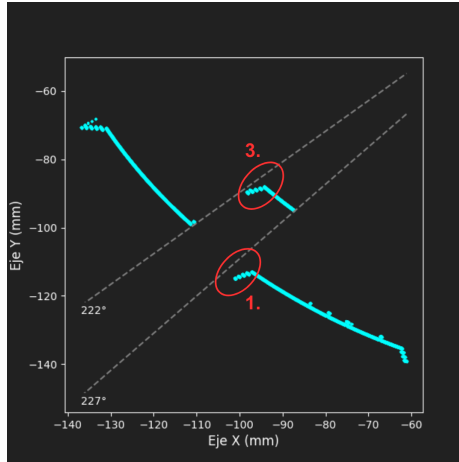
Figura 56: Dispersión angular en la primera medición del círculo externo tras concluir el arco. a diferentes distancias radiales

Al analizar los cuatro puntos de referencia, se identificó una mayor dispersión en la última medición del círculo externo antes de iniciar el arco a 47° , y en la última medición del arco antes de regresar al círculo a 42° (ver Figura 52a). En estos puntos, las mediciones presentaron oscilaciones de entre 0.6210° a 2.8817° respecto a sus valores teóricos. En contraste, el primer punto del arco a 47° y la primera medición del círculo externo tras finalizar el arco a 42° (ver Figura 52b) mostraron una dispersión considerablemente menor, con fluctuaciones que variaron entre -0.6610° a 0.7625° respecto a los valores teóricos esperados (ver Cuadro 22).

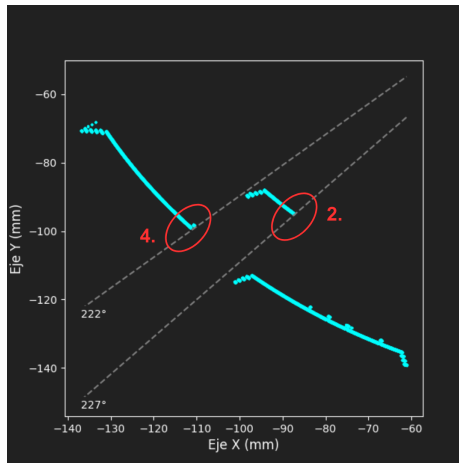
Ubicación de la medición obtenida	Valor teórico (°)	Mínimo local (°)	Diferencia con valor teórico (°)	Máximo local (°)	Diferencia con valor teórico (°)	Mínima diferencia global con valores teóricos (°)	Máxima diferencia global con valores teóricos (°)
Última medición registrada del círculo externo antes de iniciar el arco	47	47.8190	0.8190	49.8817	2.8817	0.6210	2.8817
Última medición antes de finalizar el arco.	42	42.6210	0.6210	43.8413	1.8413		
Primera medición correspondiente al inicio del arco	47	46.7588	-0.2412	47.7625	0.7625	-0.6610	0.7625
Primera medición del círculo externo tras concluir el arco.	42	41.3390	-0.6610	42.7551	0.7551		

Cuadro 22: Resumen de extremos locales y globales respecto al valor teórico

Para verificar este comportamiento, se repitió el experimento variando la posición del arco, ubicándolo a 222° con respecto al eje horizontal positivo. Al igual que el caso anterior, los resultados mostraron una mayor dispersión en la última medición del círculo externo antes del inicio del arco a 227° , así como en la última medición registrada del arco antes de regresar al círculo externo en 222° (ver Figura 57a). Estas mediciones oscilaron entre 0.5004° y 2.3290° respecto a los valores teóricos. Por el contrario, las mediciones correspondientes al primer punto del arco a 227° y al primer punto del círculo externo tras finalizar el arco a 222° (ver Figura 57b) presentaron una dispersión significativamente menor, con variaciones que se encontraron entre -0.9577° y 0.5750° en relación con los valores teóricos esperados (ver Cuadro 23). En las Figuras 58 a 61 se presentan únicamente los valores mínimo, máximo y promedio de las mediciones angulares en los puntos de referencia.



(a) El óvalo rojo muestra la ubicación de dos puntos de referencia y su número de identificación



(b) El óvalo rojo muestra la ubicación de dos puntos de referencia y su número de identificación

Figura 57: Cuatro puntos de referencia principales en las transiciones de geometría

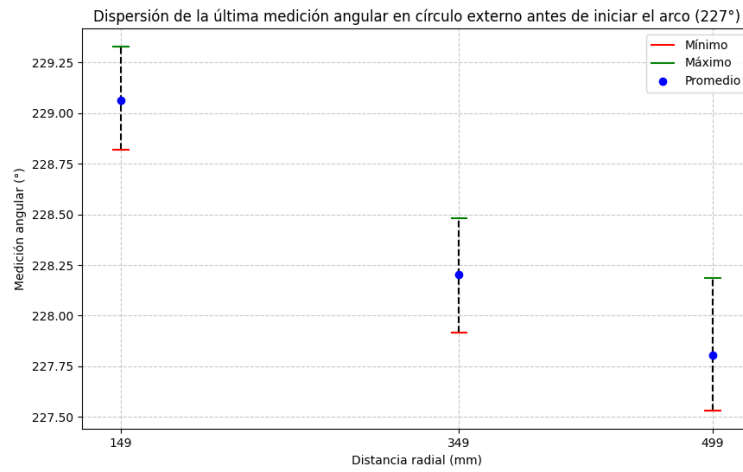


Figura 58: Dispersión angular en la última medición del círculo externo antes del arco a diferentes distancias radiales

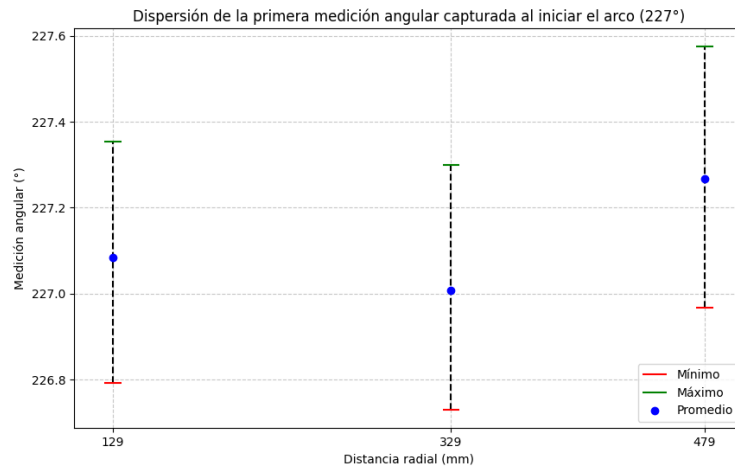


Figura 59: Dispersión angular en la primera medición correspondiente al inicio del arco a diferentes distancias radiales

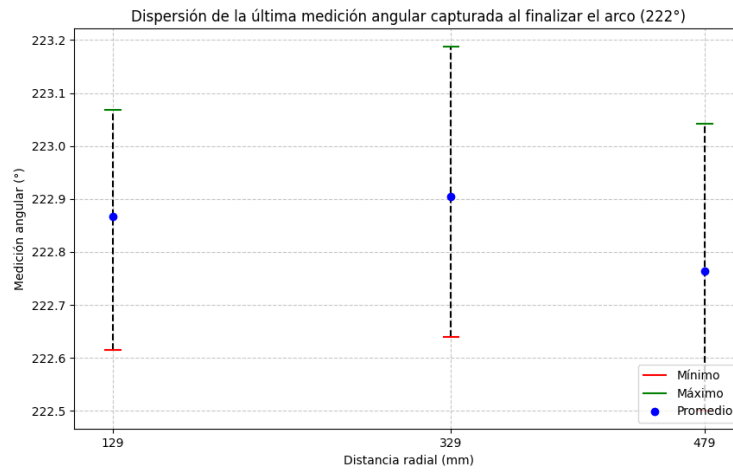


Figura 60: Dispersión angular en la última medición justo antes de finalizar el arco a diferentes distancias radiales

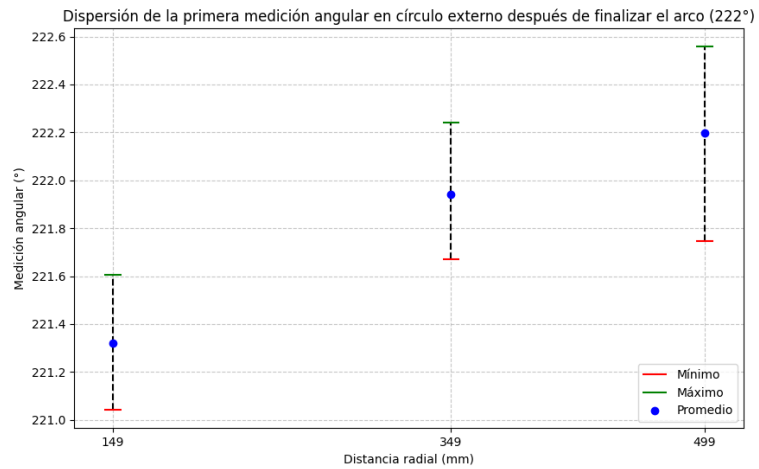


Figura 61: Dispersión angular en la primera medición del círculo externo tras concluir el arco. a diferentes distancias radiales

Ubicación de la medición obtenida	Valor teórico (°)	Mínimo local (°)	Diferencia con valor teórico (°)	Máximo local (°)	Diferencia con valor teórico (°)	Mínima diferencia global con valores teóricos (°)	Máxima diferencia global con valores teóricos (°)
Última medición registrada del círculo externo antes de iniciar el arco	227	227.5307	0.5307	229.3290	2.3290	0.5004	2.3290
Última medición antes de finalizar el arco.	222	222.5004	0.5004	223.1877	1.1877		
Primera medición correspondiente al inicio del arco	227	226.7304	-0.2696	227.5750	0.5750	-0.9577	0.5750
Primera medición del círculo externo tras concluir el arco.	222	221.0423	-0.9577	222.5588	0.5588		

Cuadro 23: Resumen de extremos locales y globales respecto al valor teórico para ángulos a 222° y 227°, respecto del eje horizontal positivo

Al analizar las reconstrucciones de cada caso en los cuatro puntos de referencia, se observó la presencia de ciertas “colas” en las mediciones durante las transiciones de geometría, afectando principalmente las últimas lecturas previas al cambio geométrico. Estas señales residuales, conocidas técnicamente como reflexiones difusas de bordes [28], se originan por la interacción del LiDAR con transiciones abruptas, donde los bordes de las superficies generan reflexiones parciales del haz infrarrojo, dando lugar a múltiples ecos al recibir la señal. Este fenómeno incrementó la dispersión en las transiciones geométricas, especialmente en las mediciones finales antes del cambio geométrico.

Estas “colas” en la reconstrucción del entrono representan el resultado de un procesamiento incompleto por parte del sensor. Además, la consistencia de este fenómeno en las mediciones confirma que no se trata de un error aleatorio, sino de un comportamiento sistemático inherente de la interacción del sensor con los cambios geométricos. Para reducir estos efectos, se recomienda emplear técnicas de posprocesamiento, como el suavizado de datos o la compensación geométrica mediante algoritmos avanzados de reconstrucción basados en geometrías primitivas [29].

Evaluación conceptual para la futura integración del LiDAR FHL-LD20 en agentes robóticos

En este capítulo se presentan modelos 3D que ilustran posibles montajes del sensor FHL-LD20 en los robots de tracción diferencial Pololu 3pi+. Estos montajes son propuestas conceptuales que exploran cómo podría integrarse el sensor, considerando aspectos como tamaño, espacio disponible, operatividad y limitaciones inherentes a cada configuración. Cada diseño ofrece ventajas y desventajas específicas para su aplicación en tareas de navegación autónoma y mapeo de entornos. Los modelos se han desarrollado respetando las dimensiones, la forma y las características físicas tanto del sensor como del robot, para proporcionar una visión realista de su posible implementación.

11.1. Montaje frontal del sensor FHL-LD20

Antes de diseñar el primer montaje del sensor, se evaluó la capacidad del Pololu 3pi+ para desplazarse sobre la plataforma del ecosistema Robotat con el LiDAR instalado pero inactivo. Para ello, se realizaron pruebas de movimiento básico hacia adelante y hacia atrás a una velocidad de 50 rpm, con el propósito de verificar que la masa del LiDAR no generara una carga adicional significativa en los motores, evitando así un posible desgaste prematuro en las cajas reductoras del robot. Durante las trayectorias realizadas, el sensor permaneció estático, y el agente robótico demostró ser capaz de moverse sin impedimentos. Además, se comprobó que el soporte y el sensor no afectaban la visualización de los marcadores pasivos del sistema de detección de movimiento.

Tras confirmar que el agente robótico podía soportar la carga del sensor sin comprometer su funcionamiento, se procedió al diseño de diversas configuraciones de montaje para integrar el sensor de manera estable al robot. La Figura 62 presenta el diseño del montaje frontal.

Este diseño posiciona el sensor FHL-LD20 en la parte delantera del Pololu 3pi+, utilizando separadores ME de latón de 20 mm y 6 mm de altura para su fijación. Como se muestra en la Figura 63, el soporte incorpora una pared con voladizo que permite la colocación del marcador pasivo, facilitando su detección. Dicha ubicación sobre el sensor asegura su visibilidad sin interferencias, incluso cuando el robot se encuentra en movimiento. Además, el diseño aprovecha la altura del agente para garantizar que las paredes en los entornos donde se ponga a prueba no necesiten ser demasiado altas.

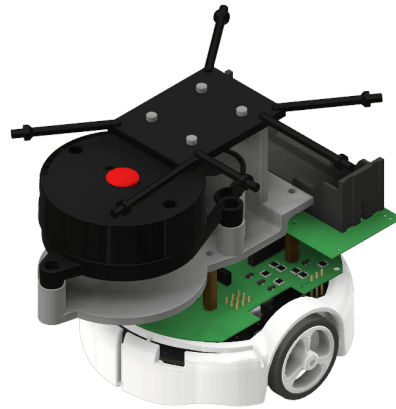


Figura 62: Vista isométrica del montaje frontal del sensor FHL-LD20 en Pololu 3pi+

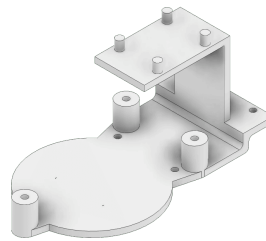


Figura 63: Vista isométrica del soporte para el montaje frontal del sensor FHL-LD20

Sin embargo, esta configuración presenta limitaciones en cuanto al campo de visión del sensor. La pared trasera que sostiene el marcador obstruye la visión hacia atrás, reduciendo la capacidad del LiDAR para realizar mapeos completos. Adicionalmente, el desplazamiento del centro de gravedad hacia adelante puede comprometer la estabilidad del robot durante giros rápidos o maniobras bruscas, lo que podría afectar su desempeño en tareas que requieran cambios frecuentes de dirección.

Otro aspecto a considerar es la vulnerabilidad del sensor en esta posición. Al estar ubicado en la parte frontal, el LiDAR está más expuesto a posibles daños durante colisiones, especialmente si no se implementan protecciones adicionales. Aunque esta ubicación facilita el acceso al sensor y permite un montaje directo, es importante evaluar el riesgo de impacto sobre el sensor si no se considera el desfase respecto al centro del agente robótico. Por

último, la fabricación del soporte presenta desafíos en su manufactura debido a la geometría empleada. Como se muestra en la Figura 64, el soporte cuenta con dos voladizos los cuales se podrían capturar únicamente empleando soportes al momento de imprimir la pieza 3D.

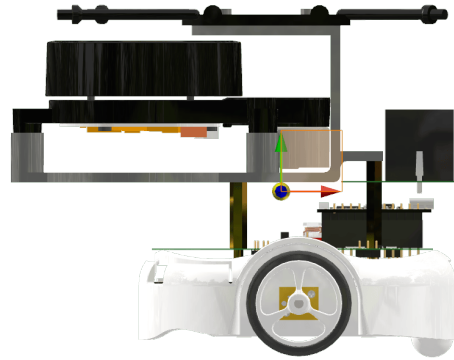


Figura 64: Ubicación del centro de gravedad del montaje realizado

11.2. Montaje superior del sensor FHL-LD20

Como se observa en la Figura 65, en esta configuración, el sensor se ubica sobre el Pololu 3pi+. Nuevamente, la estructura utiliza separadores M3, alcanzando una altura de 40 mm desde la placa de expansión del robot. Esta configuración optimiza el campo de visión del LiDAR, permitiéndole capturar datos de forma completa sin interferencias de otros componentes del robot. La elevación también deja el espacio frontal libre, lo que facilita la integración de módulos adicionales como cámaras o sensores para tareas avanzadas de navegación autónoma.

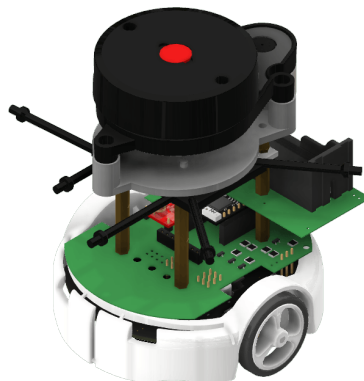


Figura 65: Vista isométrica del montaje superior del sensor FHL-LD20 en Pololu 3pi+

Un beneficio importante de esta disposición es la estabilidad relativa que proporciona. Como se muestra en la Figura 66, el centro de gravedad permanece más cercano al chasis que en el montaje frontal, mejorando la estabilidad del robot en giros rápidos o movimientos acelerados. Esta característica es clave para aplicaciones donde se requieran maniobras ágiles y precisas, especialmente en superficies uniformes. No obstante, esta configuración también tiene desventajas notables.

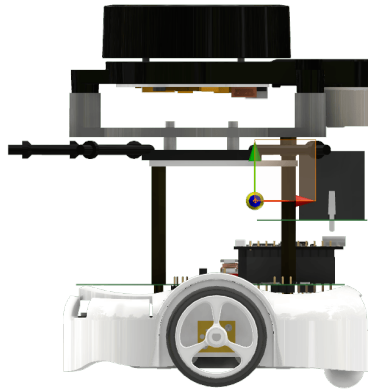


Figura 66: Ubicación del centro de gravedad del montaje realizado

Al contar con una mayor altura se incrementa la susceptibilidad del robot a volcarse en superficies irregulares o desniveladas, limitando su aplicación en ciertos entornos [30]. Además, la elevación del sensor podría generar oscilaciones o vibraciones adicionales durante el movimiento, afectando la precisión de las mediciones del LiDAR. Este efecto debe ser mitigado con ajustes mecánicos o algoritmos de compensación en el procesamiento de datos.

Finalmente, esta configuración requiere que los entornos evaluados cuenten con paredes más altas para garantizar un mapeo efectivo. Si bien el diseño es adecuado para áreas abiertas y controladas, puede ser menos práctico en espacios con restricciones de altura o donde la estabilidad sea crítica. En general, el montaje superior es una opción versátil para tareas de exploración en entornos amplios donde el rango completo del sensor sea una prioridad. Junto a esto, a diferencia del caso anterior, el soporte empleado para la sujeción del LiDAR es fácil de manufacturar debido a su geometría (ver Figura 67). Además que mantiene el marcador pasivo en una ubicación visible para el sistema de detección por debajo del LiDAR.

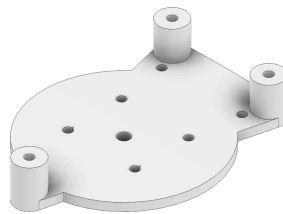


Figura 67: Vista isométrica del soporte para el montaje frontal del sensor FHL-LD20

11.3. Montaje frontal del sensor FHL-LD20 con rueda loca

Como se muestra en la Figura 68, esta propuesta adapta el montaje frontal, añadiendo una rueda loca en la parte delantera del robot para contrarrestar el desplazamiento del centro de gravedad hacia adelante, proporcionando mayor estabilidad en superficies irregulares o durante movimientos bruscos (ver Figura 69). La rueda loca mejora el equilibrio general del sistema y permite un funcionamiento más estable al transportar el sensor en terrenos poco uniformes.

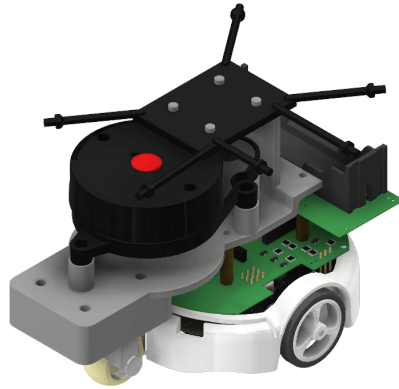


Figura 68: Vista isométrica del montaje superior del sensor FHL-LD20 en Pololu 3pi+

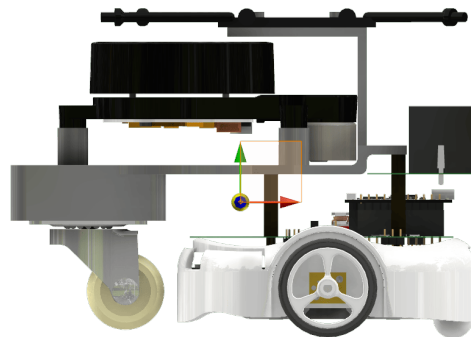


Figura 69: Ubicación del centro de gravedad del montaje realizado

Al igual que para el primer montaje, una ventaja importante de este diseño es que mantiene el marcador pasivo en una ubicación visible para el sistema de detección. Esto garantiza que se siga detectando al robot sin interferencias, lo que es esencial en experimentos de navegación en entornos controlados. La estabilidad adicional proporcionada por la rueda loca hace que esta configuración sea adecuada para tareas en terrenos irregulares, donde los montajes anteriores podrían presentar dificultades. Sin embargo, el uso de una rueda loca

introduce ciertas limitaciones.

El diseño aumenta ligeramente el tamaño del robot, reduciendo su maniobrabilidad en espacios reducidos y complicando los giros rápidos. Además, una rueda loca tradicional podría generar fricción adicional durante los giros sobre su propio eje, afectando la precisión y la fluidez de las maniobras. Por esta razón, se recomienda explorar el uso de una rueda loca con bola, la cual proporciona menor fricción y mayor libertad de movimiento [31]. Si bien este diseño incrementa la complejidad mecánica del robot, el montaje frontal con rueda loca representa una solución práctica para aplicaciones donde la estabilidad y el desempeño en terrenos desafiantes son factores prioritarios. Es una opción robusta, especialmente para entornos donde se priorizan el equilibrio y la funcionalidad del sistema.

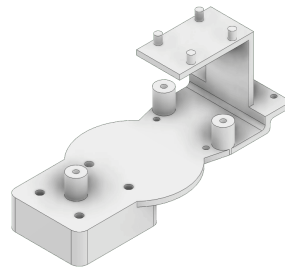


Figura 70: Vista isométrica del soporte para el montaje frontal del sensor FHL-LD20

Los montajes descritos previamente consideran el uso de la placa de expansión desarrollada por José Álvarez para ampliar las capacidades de los agentes robóticos Pololu 3pi+. Esta placa proporciona una solución viable para integrar el sensor LiDAR, aprovechando la flexibilidad en la asignación de pines del microcontrolador ESP32-S3 en el TinyS3 [32]. Los pines del bus SPI, al no inicializar el módulo correspondiente, pueden configurarse como GPIO normales, lo que permite reasignarlos a otras funciones, como UART, sin afectar el hardware existente. Además, el TinyS3 ofrece la posibilidad de remapear cualquier módulo UART a los pines disponibles mediante su matriz GPIO, lo que facilita la redirección de las conexiones del LiDAR hacia pines previamente ocupados por periféricos, como la cámara descrita en [32]. Este procedimiento se lleva a cabo únicamente a nivel de software, garantizando la compatibilidad de los pines asignados y permitiendo una integración eficiente del LiDAR sin requerir modificaciones físicas significativas en la placa de expansión.

- La evaluación y comparación de sensores de distancia tipo láser identificó al LiDAR FHL-LD20 como la opción más adecuada para futuras aplicaciones de mapeo de entornos. La selección se fundamentó en criterios críticos como la adaptabilidad y operatividad de este sensor en sistemas robóticos móviles, además de su rango de medición, precisión y dimensiones, esenciales para cumplir con los requisitos de esta aplicación.
- La herramienta de software desarrollada no solo facilitó la interpretación y visualización de los datos del sensor, sino que también se consolidó como un recurso fundamental para futuras validaciones en distintos entornos.
- La herramienta de software "LiDAR MapViewer" proporcionó un medio visual para comprender el funcionamiento del sensor y aprovechar de manera eficiente los datos que genera.
- La caracterización del sensor LiDAR FHL-LD20 permitió evaluar y modelar la confiabilidad de sus mediciones bajo condiciones reales de operación, identificando diferencias en la distribución de las mediciones: las distancias radiales presentaron una distribución normal, mientras que los ángulos siguieron una distribución uniforme.
- A partir de la caracterización del sensor se definió un rango mínimo de medición efectivo de 15 cm y se depuraron mediciones nulas asociadas a ángulos de incidencia desfavorables, mejorando la calidad de los datos.
- Las reconstrucciones del entorno ante cambios abruptos de geometría revelaron la aparición de reflexiones difusas en los bordes de transición, generadas por interacciones específicas del LiDAR con los bordes de las superficies.
- Las pruebas de calibración del sensor demostraron que los valores reconstruidos coinciden con las dimensiones nominales de referencia, mostrando desviaciones inferiores a ± 5 mm en mediciones repetidas realizadas bajo las mismas condiciones.
- A través de las pruebas de caracterización y calibración, se determinó que la diferencia entre la distancia medida promedio y la distancia real se mantuvo por debajo de 3 mm.

Además, las mediciones angulares promedio coincidieron con el valor teórico esperado, con una dispersión que no superó los $\pm 3^\circ$.

- Se verificó que el agente robótico Pololu 3pi+ soportó la carga del sensor sin comprometer su funcionamiento. Esto, junto con la integración de la placa de expansión, montajes evaluados y la herramienta de software desarrollada, confirmó que es posible integrar el sensor en el agente.

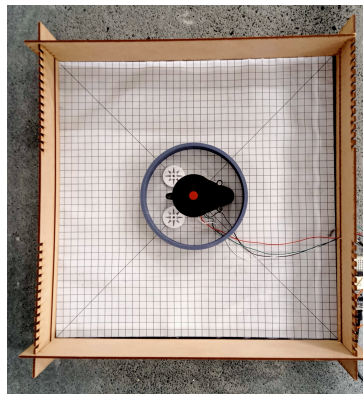
- Se sugiere la implementación de técnicas avanzadas de posprocesamiento, como el suavizado de datos o algoritmos de compensación geométrica, para reducir las dispersiones en las mediciones y mejorar la precisión en la reconstrucción de escenarios. Estas técnicas permitirían una mayor fidelidad en la representación de los entornos, optimizando la calidad de los modelos generados a partir de figuras primitivas y mejorando la eficiencia del sensor en entornos con variabilidad.
- Se propone explorar la incorporación de una rueda loca con bola en el diseño del montaje al agente robótico, ya que esta configuración reduce la fricción y ofrece una mayor libertad de movimiento. Esta mejora sería especialmente beneficiosa para el montaje del sensor en la parte frontal del agente, permitiendo una mayor estabilidad y flexibilidad en su desplazamiento, lo que podría optimizar el rendimiento del sensor y mejorar la maniobrabilidad del robot en diversos entornos.
- Se sugiere ampliar las funcionalidades de la herramienta de software para permitir la reconstrucción en tiempo real del entorno, eliminando la necesidad de intervención manual por parte del usuario.
- Se recomienda continuar con la línea de investigación en el mapeo de entornos dinámicos, aprovechando los resultados obtenidos en este trabajo como base para futuras exploraciones. La implementación de nuevas técnicas de mapeo podrían expandir las capacidades del sensor y maximizar su rendimiento en entornos más complejos y variables.

-
- [1] J. Li, W. Tang, D. Zhang, D. Fan, J. Jiang e Y. Lu, “Map Construction and Path Planning Method for Mobile Robots Based on Collision Probability Model,” *Symmetry*, vol. 15, n.º 10, 2023. DOI: 10.3390/sym15101891.
 - [2] Z. Li, B. Li, Q. Liang, W. Liu, L. Hou y X. Rong, “A quadruped robot obstacle avoidance and personnel following strategy based on ultra-wideband and three-dimensional laser radar,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 19, n.º 4, 2022. DOI: 10.1177/17298806221114705.
 - [3] X. Dai, S. Long, Z. Zhang y D. Gong, “Mobile Robot Path Planning Based on Ant Colony Algorithm With A* Heuristic Method,” *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 13, 2019. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00015.
 - [4] Y. Han, L. Zhang, H. Tan y X. Xue, “Mobile Robot Path Planning Based on Improved Particle Swarm optimization,” en *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, 2019, págs. 4354-4358. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866634.
 - [5] A. Peña, “Algoritmo de sincronización y control de sistemas de robots multiagente para misiones de búsqueda,” Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2019.
 - [6] E. Santizo, “Aprendizaje reforzado y aprendizaje profundo en aplicaciones de robótica de enjambre,” Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2021.
 - [7] D. Baldizón, “Aplicaciones prácticas para algoritmos de inteligencia y robótica de enjambre,” Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2022.
 - [8] F. Godoy, “Desarrollo y evaluación de algoritmos para el mapeo de entornos y generación de trayectorias utilizando sistemas robóticos multi-agente,” Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2023.
 - [9] J. Maderer, *Robotarium: A Robotics Lab Accessible to All*, 2017. dirección: <https://news.gatech.edu/archive/features/robotarium-robotics-lab-accessible-all.shtml>.

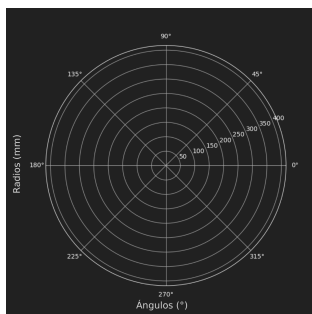
- [10] P. Barrera, *El Robotat, el hábitat donde interactúan los robots en el CIT*, 2022. dirección: <https://noticias.uvg.edu.gt/el-robotat-el-habitat-donde-interactuan-los-robots-en-el-cit/>.
- [11] C. Montoya, “Robotat: un ecosistema robótico de captura de movimiento y comunicación inalámbrica,” Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2022.
- [12] S. Thrun, W. Burgard y D. Fox, *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2005, ISBN: 0262201623.
- [13] F. Fahimi, *Autonomous Robots: Modeling, Path Planning, and Control*. Edmonton, Alberta: Springer US, 2009, ISBN: 0387095381.
- [14] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani y G. Oriolo, *Robotics Modelling, Planning and Control (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing)*. London, England: Springer London, 2009, ISBN: 1846286417.
- [15] H. Lu, S. Yang, M. Zhao y S. Cheng, “Multi-Robot Indoor Environment Map Building Based on Multi-Stage Optimization Method,” *Complex System Modeling and Simulation*, vol. 1, n.º 2, págs. 145-161, 2021. DOI: 10.23919/CSMS.2021.0011.
- [16] N. Correll, *Introduction to Autonomous Robots (Kinematics, Perception, Localization and Planning)*. Independent, 2016, ISBN: 1493773070.
- [17] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms In MATLAB (Springer Tracts in Advanced Robotics)*, Second Edition. Cham, Switzerland: Springer Cham, 2017, ISBN: 3319544128.
- [18] J. Liu, Q. Sun, Z. Fan e Y. Jia, “TOF Lidar Development in Autonomous Vehicle,” en *2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC)*, 2018, págs. 185-190. DOI: 10.1109/OGC.2018.8529992.
- [19] *STMicroelectronics Time of Flight (ToF) Sensors*, 2022. dirección: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/time-of-flight-sensors.html>.
- [20] N. Pears, Y. Liu y P. Bunting, eds., *3D Imaging, Analysis and Applications*, Second Edition. Cham, Switzerland: Springer Cham, 2020, ISBN: 3030440702.
- [21] *Pololu - 3pi+ 32U4 Robot - Standard Edition*, 2024. dirección: <https://www.pololu.com/product/3737>.
- [22] E. Peña y M. Legaspi, *UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, 2020. dirección: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>.
- [23] S. Campbell, *Basics of UART Communication*, 2016. dirección: <https://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>.
- [24] STMicroelectronics|, *VL53L0X - Time-of-Flight (ToF) ranging sensor - Datasheet (Rev 6)*, 2016. dirección: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>.
- [25] youyeetoo Tech, *LD20*, 2023. dirección: <https://wiki.youyeetoo.com/en/Lidar/LD20>.
- [26] E. Technology, *YDLIDAR T-MINI PRO- Datasheet (Rev 1.1)*, 2022. dirección: <https://static.generation-robots.com/media/ydlidar-tmini-pro-datasheet.pdf>.

- [27] R. Fatchurrahman, H. Putra, I. Joyokusumo, M. H. Habib, I. Imawati y S. P. Hadi, “Light sensor selection of Wi-MoLS (wireless modern light sensor) based on analytic hierarchy process (AHP),” en *2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE)*, 2016, págs. 152-155. DOI: 10.1109/ICIMECE.2016.7910443.
- [28] D. Damodaran, S. Mozaffari, S. Alirezaee y M. J. Ahamed, “Experimental Analysis of the Behavior of Mirror-like Objects in LiDAR-Based Robot Navigation,” *Applied Sciences*, vol. 13, n.º 5, 2023. DOI: 10.3390/app13052908.
- [29] S. Xia, D. Chen, R. Wang, J. Li y X. Zhang, “Geometric Primitives in LiDAR Point Clouds: A Review,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, págs. 685-707, 2020. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2969119.
- [30] K. Li, Y. Qian, C. Wang y M. Yang, “Forehead or Headlights – At Which Height Should LiDARs be Mounted on the Vehicle?” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 9, n.º 1, págs. 2564-2575, 2024. DOI: 10.1109/TIV.2023.3318628.
- [31] K. Shabalina, A. Sagitov y E. Magid, “Comparative Analysis of Mobile Robot Wheels Design,” en *2018 11th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 2018, págs. 175-179. DOI: 10.1109/DeSE.2018.00041.
- [32] J. Alvarez, “Desarrollo de una placa de expansión para los agentes Pololu 3Pi+ que expanda sus capacidades dentro del ecosistema Robotat,” Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2023.

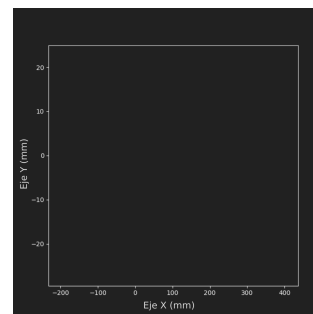
15.1. Pruebas de rango de medición mínimo



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 70 mm de radio

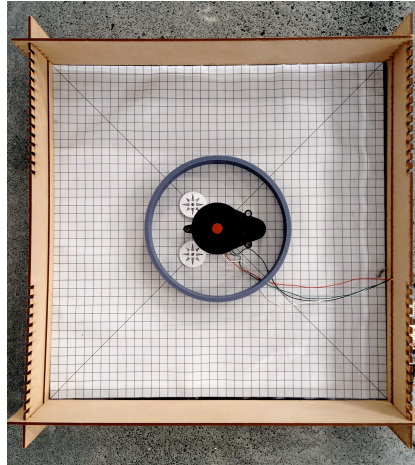


(b) Reconstrucción en coordenadas polares de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 70 mm de radio

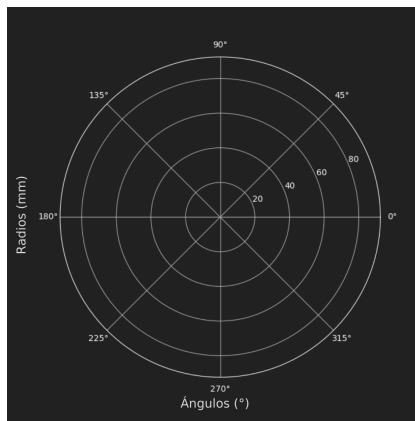


(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 70 mm de radio

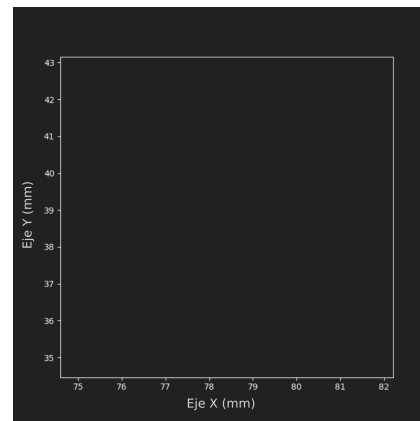
Figura 71: Reconstrucciones vacías de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 70 mm de radio



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 80 mm de radio



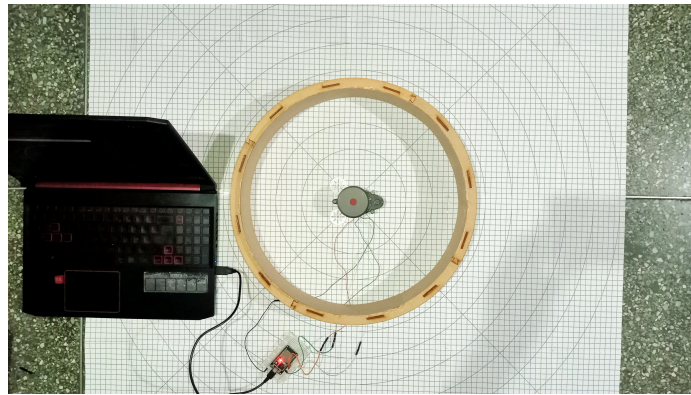
(b) Reconstrucción en coordenadas polares de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 80 mm de radio



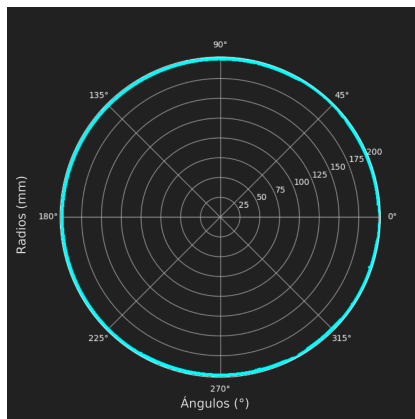
(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 80 mm de radio

Figura 72: Reconstrucciones vacías de tres revoluciones completas de lectura en entorno circular: 8 cm de radio

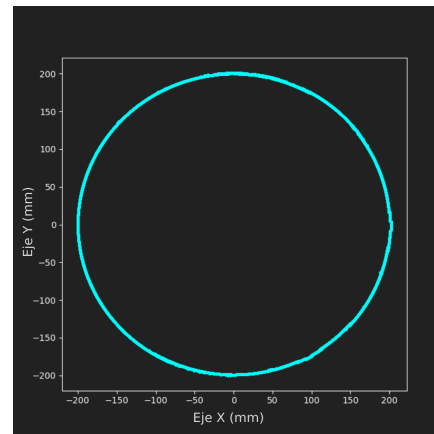
15.2. Pruebas para la estimación de la varianza asociada a las mediciones de distancia del sensor



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 199 mm de radio

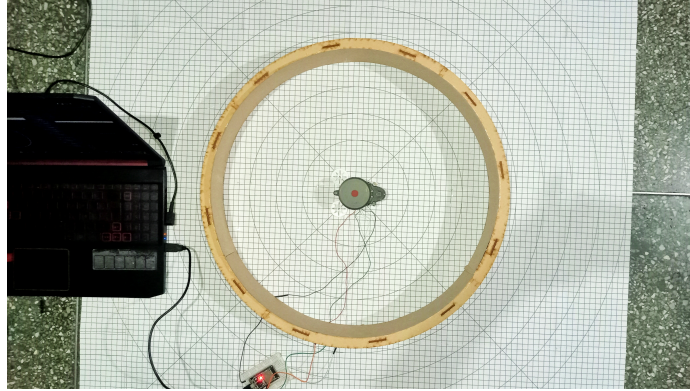


(b) Reconstrucción en coordenadas polares de entorno circular: 199 mm de radio

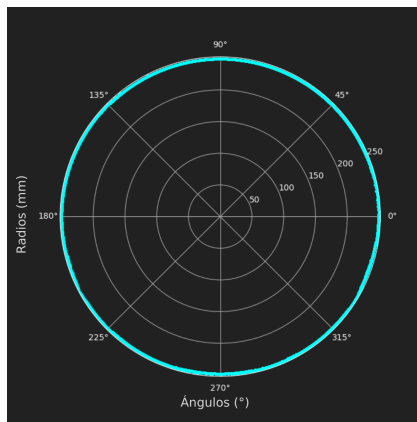


(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 199 mm de radio

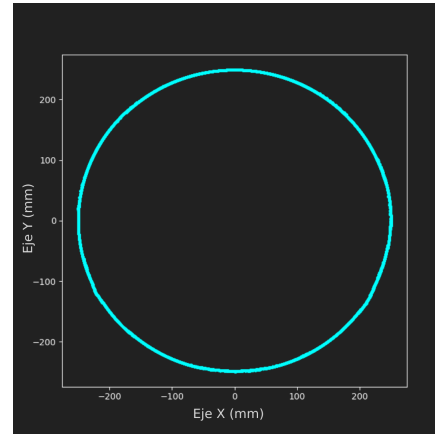
Figura 73: Reconstrucción del entorno circular de 199 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 249 mm de radio

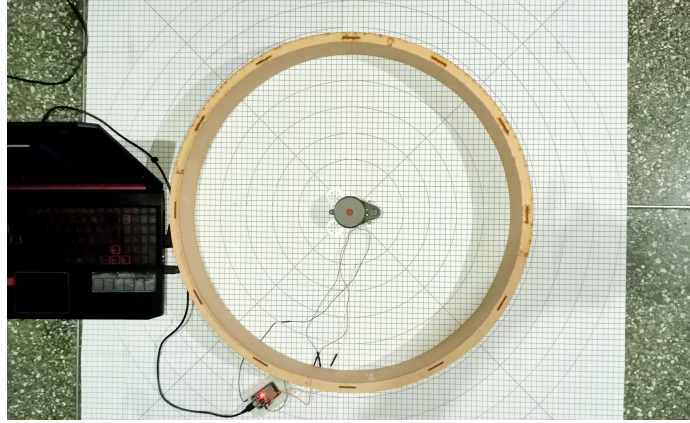


(b) Reconstrucción en coordenadas polares de entorno circular: 249 mm de radio

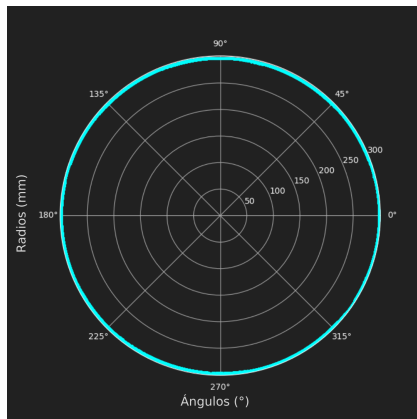


(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 249 mm de radio

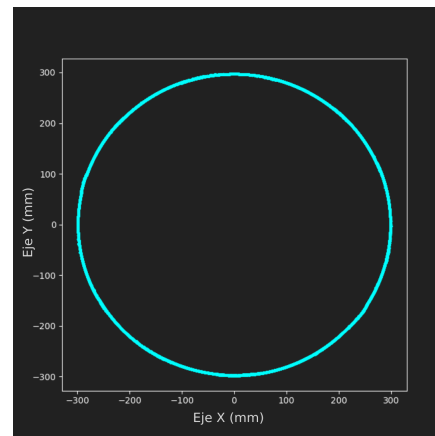
Figura 74: Reconstrucción del entorno circular de 249 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 299 mm de radio

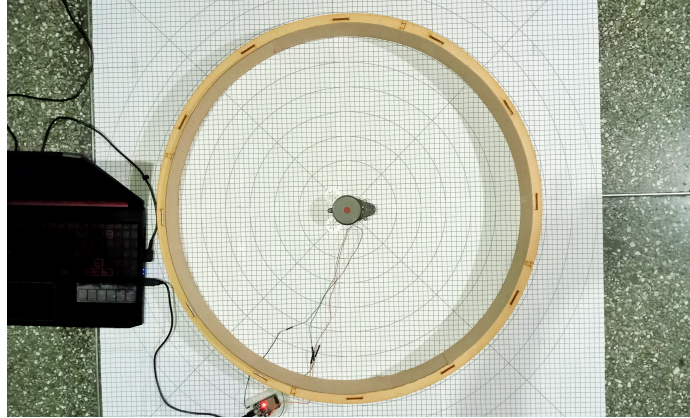


(b) Reconstrucción en coordenadas polares de entorno circular: 299 mm de radio

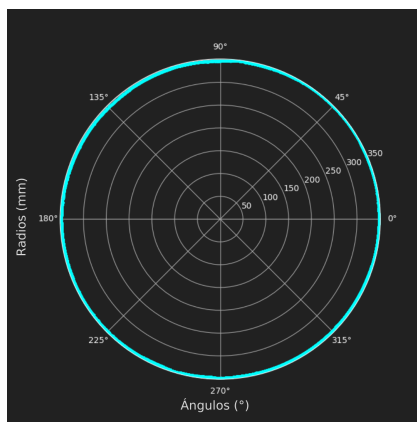


(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 299 mm de radio

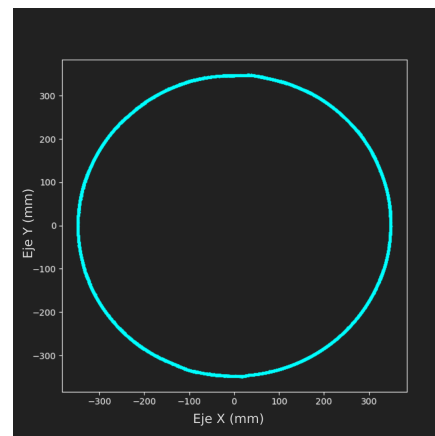
Figura 75: Reconstrucción del entorno circular de 299 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 349 mm de radio

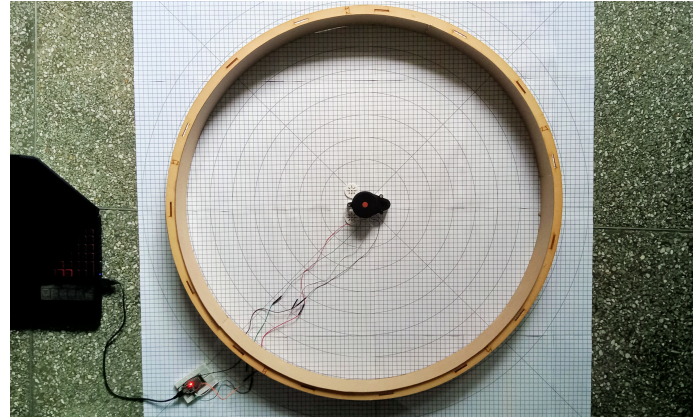


(b) Reconstrucción en coordenadas polares de entorno circular: 349 mm de radio

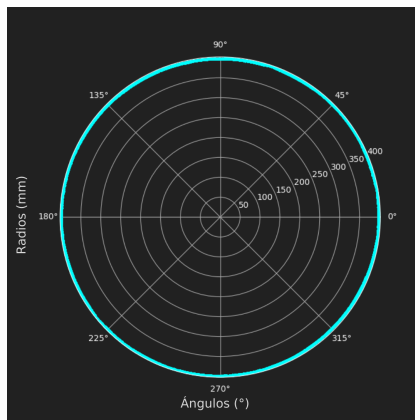


(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 349 mm de radio

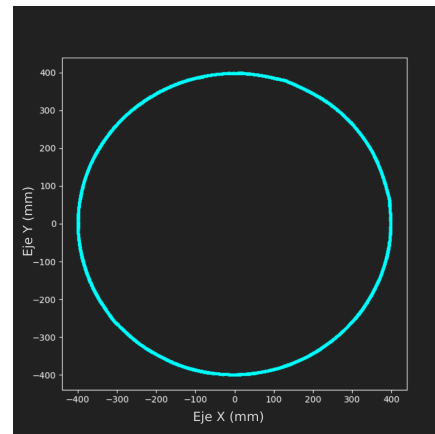
Figura 76: Reconstrucción del entorno circular de 349 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 399 mm de radio

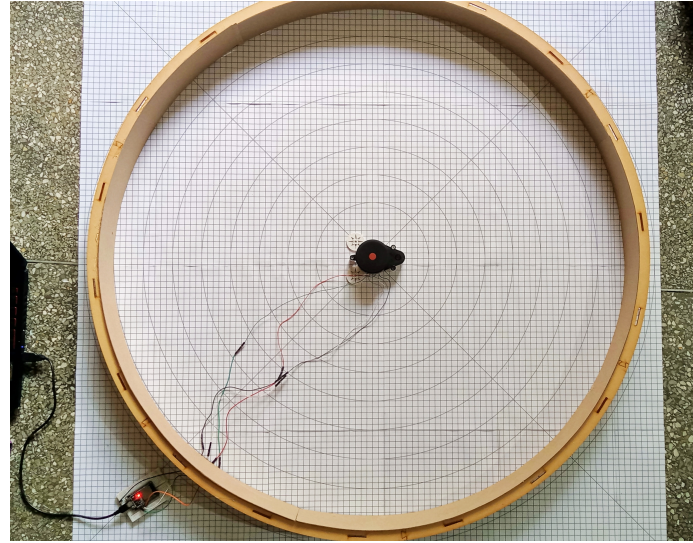


(b) Reconstrucción en coordenadas polares de entorno circular: 399 mm de radio

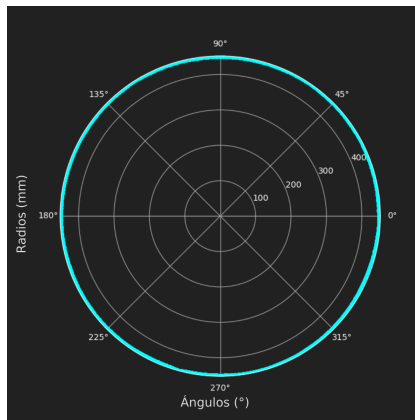


(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 399 mm de radio

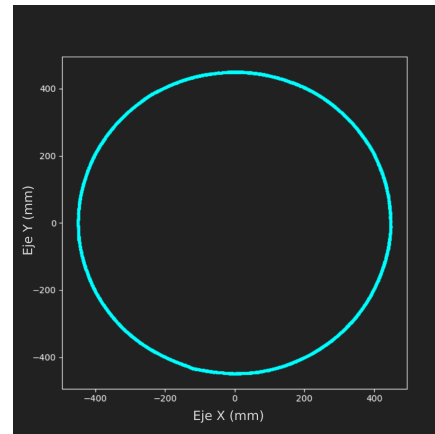
Figura 77: Reconstrucción del entorno circular de 399 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 449 mm de radio



(b) Reconstrucción en coordenadas polares de entorno circular: 449 mm de radio



(c) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 449 mm de radio

Figura 78: Reconstrucción del entorno circular de 449 mm de radio con 180 revoluciones completas capturadas

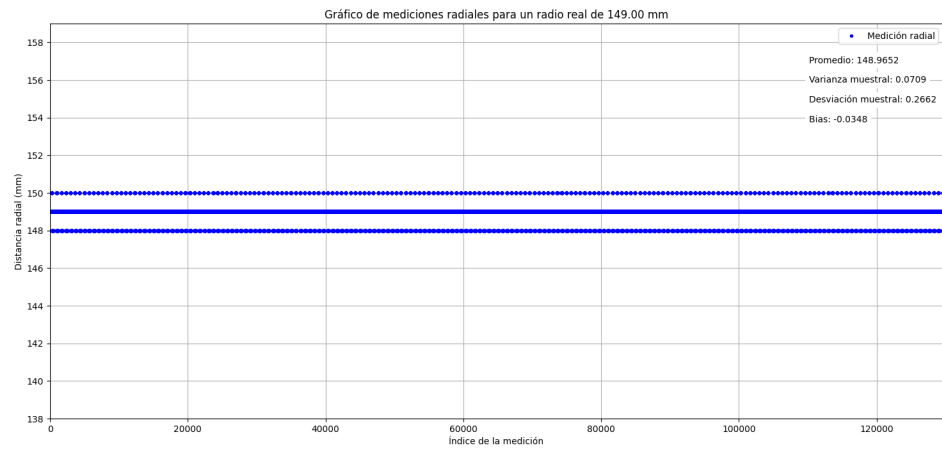


Figura 79: Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 149 mm

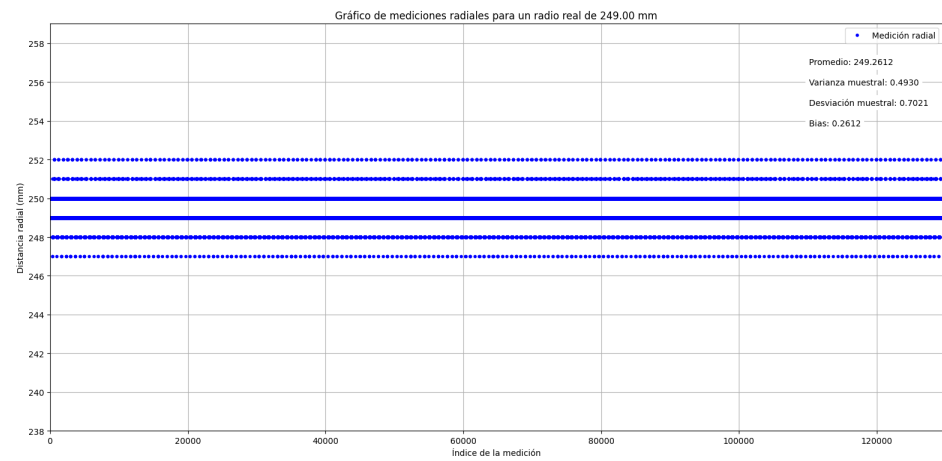


Figura 80: Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 249 mm

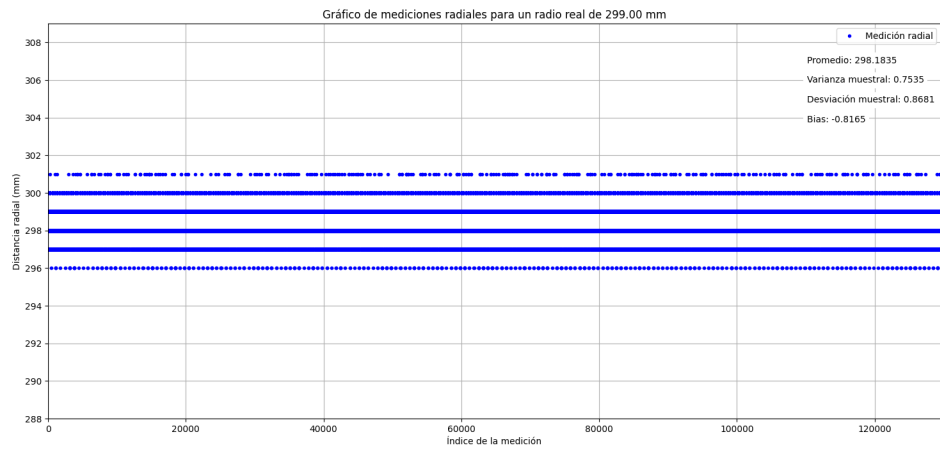


Figura 81: Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 299 mm

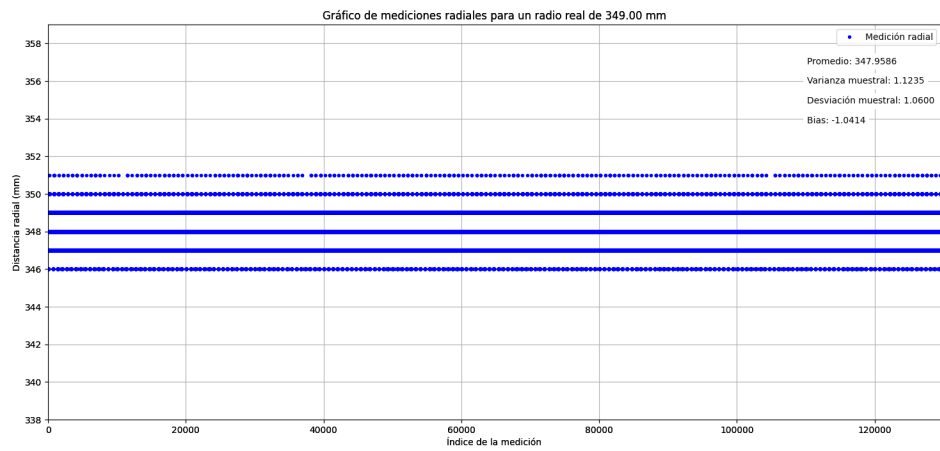


Figura 82: Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 349 mm

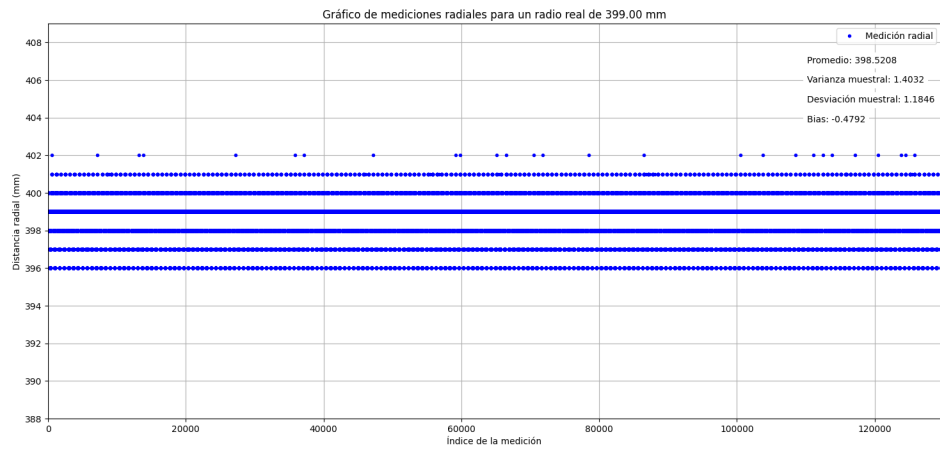


Figura 83: Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 399 mm

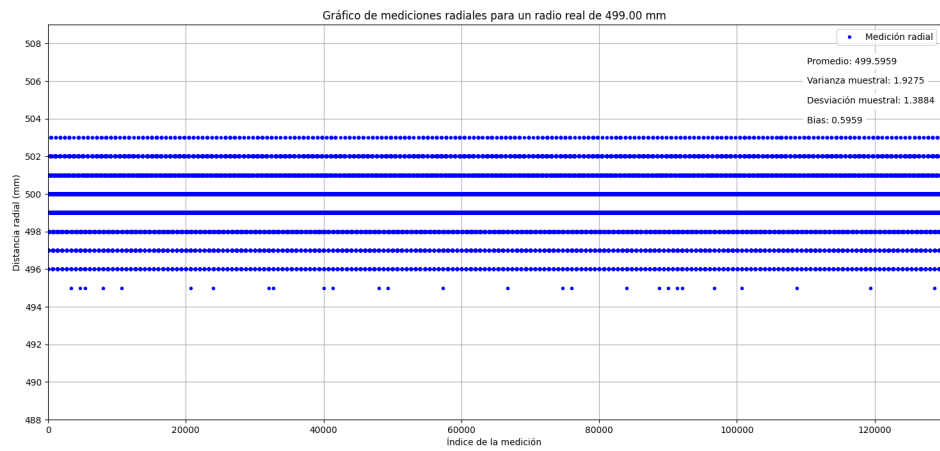


Figura 84: Variabilidad de las mediciones capturadas para un radio real de 449 mm

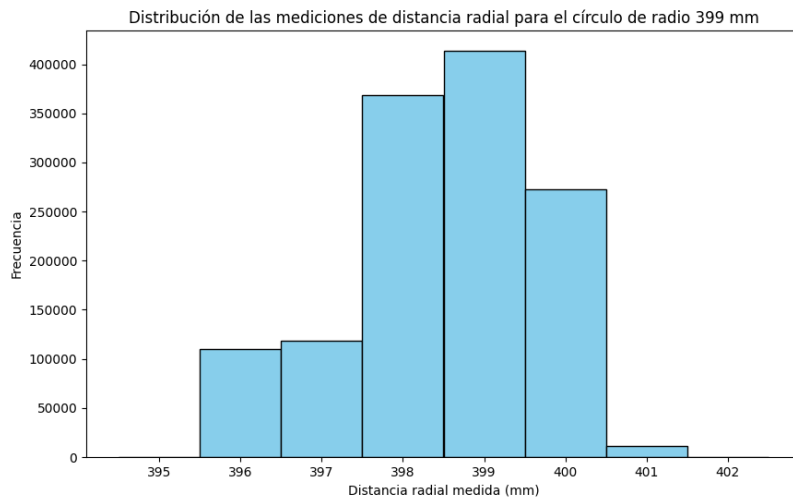


Figura 85: Distribución de las mediciones de distancia radial para un círculo de 399 mm de radio

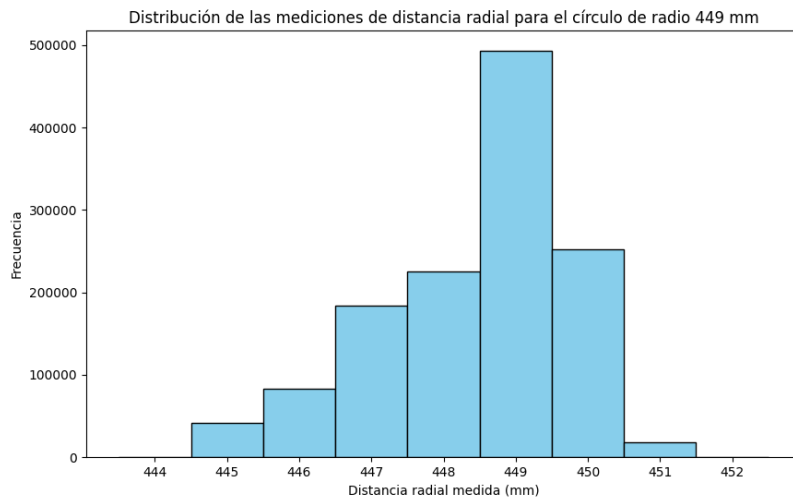


Figura 86: Distribución de las mediciones de distancia radial para un círculo de 449 mm de radio

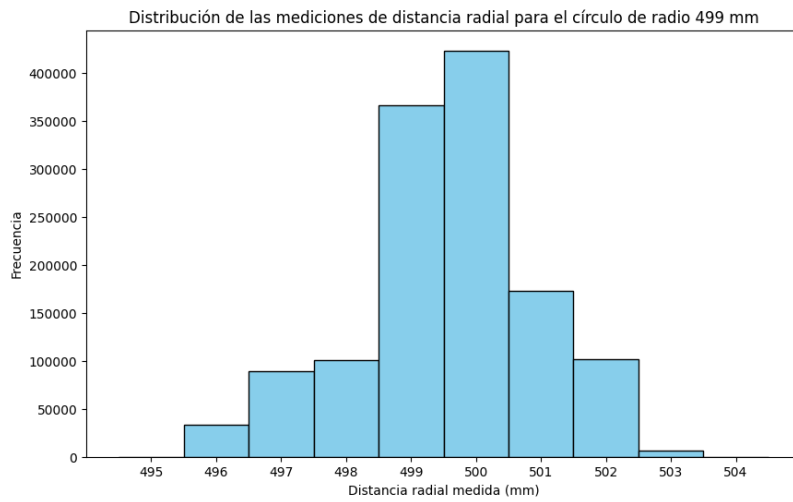


Figura 87: Distribución de las mediciones de distancia radial para un círculo de 499 mm de radio

Radio real de 149 mm			
No. Prueba	Promedio (mm)	Sesgo (<i>bias</i> , mm)	Varianza muestral (mm^2)
1	148.9755	-0.0245	0.1036
2	148.9741	-0.0259	0.0910
3	148.9722	-0.0278	0.0919
4	148.9773	-0.0227	0.0917
5	148.9755	-0.0245	0.0897
6	148.9833	-0.0167	0.0988
7	148.9681	-0.0319	0.1199
8	148.9722	-0.0278	0.0928
9	148.9722	-0.0278	0.0974
10	148.9755	-0.0245	0.0934
Promedio	148.9746	-0.0254	0.0970

Cuadro 24: Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 149 mm de radio

Radio real de 199 mm			
No. Prueba	Promedio (mm)	Sesgo (<i>bias</i> , mm)	Varianza muestral (mm^2)
1	199.9338	0.9338	0.5111
2	200.0185	1.0185	0.4721
3	200.0222	1.0222	0.4766
4	200.0264	1.0264	0.4917
5	199.9800	0.9880	0.4899
6	199.9495	0.9495	0.5222
7	199.9477	0.9477	0.5276
8	200.0181	1.0181	0.4763
9	200.0134	1.0134	0.4811
10	199.9769	0.9769	0.5015
Promedio	199.9887	0.9895	0.4950

Cuadro 25: Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 199 mm de radio

Radio real de 249 mm			
No. Prueba	Promedio (mm)	Sesgo (<i>bias</i> , mm)	Varianza muestral (mm^2)
1	249.1662	0.1662	0.5425
2	249.1361	0.1361	0.5614
3	249.2148	0.2148	0.5328
4	249.2144	0.2144	0.5446
5	249.1366	0.1366	0.5598
6	249.2093	0.2093	0.5463
7	249.1731	0.1731	0.5453
8	249.1764	0.1764	0.5465
9	249.1694	0.1694	0.5586
10	249.1458	0.1458	0.5554
Promedio	249.1742	0.1742	0.5493

Cuadro 26: Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 249 mm de radio

Radio real de 299 mm			
No. Prueba	Promedio (mm)	Sesgo (<i>bias</i> , mm)	Varianza muestral (mm^2)
1	298.0972	-0.9028	0.5714
2	298.0444	-0.9556	0.5047
3	297.9861	-1.0139	0.5640
4	298.0319	-0.9681	0.5136
5	297.9782	-1.0218	0.5549
6	298.0449	-0.9551	0.5218
7	298.0630	-0.9370	0.5324
8	298.0125	-0.9875	0.5135
9	298.0000	-1.0000	0.5419
10	298.0852	-0.9148	0.5421
Promedio	298.0343	-0.9657	0.5360

Cuadro 27: Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 299 mm de radio

Radio real de 349 mm			
No. Prueba	Promedio (mm)	Sesgo (<i>bias</i> , mm)	Varianza muestral (mm^2)
1	348.0944	-0.9056	1.0962
2	348.0157	-0.9843	1.0993
3	348.0731	-0.9269	1.0887
4	348.0000	-1.0000	1.1394
5	348.0069	-0.9931	0.9416
6	348.1116	-0.8884	1.0552
7	348.0403	-0.9597	0.9572
8	348.0088	-0.9912	0.9731
9	348.0361	-0.9639	0.9380
10	347.9569	-1.0431	1.0278
Promedio	348.0344	-0.9656	1.0317

Cuadro 28: Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 349 mm de radio

Radio real de 399 mm			
No. Prueba	Promedio (mm)	Sesgo (<i>bias</i> , mm)	Varianza muestral (mm^2)
1	398.4819	-0.5181	1.2132
2	398.4778	-0.5222	1.3566
3	398.3356	-0.6644	1.3356
4	398.4667	-0.5333	1.3940
5	398.4019	-0.5981	1.3530
6	398.4532	-0.5468	1.3744
7	398.3153	-0.6847	1.3730
8	398.3764	-0.6236	1.3696
9	398.3093	-0.6907	1.3781
10	398.3347	-0.6653	1.3817
Promedio	398.3953	-0.6047	1.3529

Cuadro 29: Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 399 mm de radio

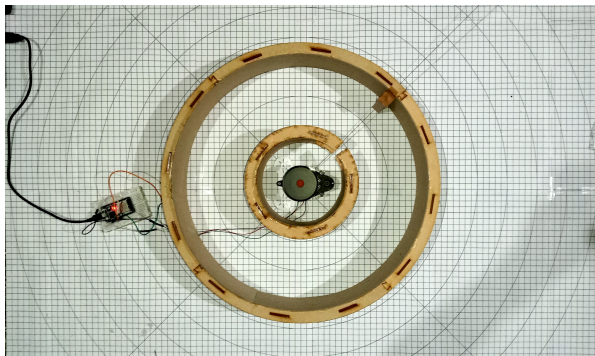
Radio real de 449 mm			
No. Prueba	Promedio (mm)	Sesgo (<i>bias</i> , mm)	Varianza muestral (mm^2)
1	448.5236	-0.4764	1.5177
2	448.5278	-0.4722	1.4258
3	448.6005	-0.3995	1.4647
4	448.6056	-0.3944	1.4571
5	448.5981	-0.4019	1.4642
6	448.5574	-0.4426	1.5270
7	448.6014	-0.3986	1.5108
8	448.5773	-0.4227	1.3936
9	448.5181	-0.4819	1.4466
10	448.5847	-0.4153	1.4741
Promedio	448.5695	-0.4306	1.4682

Cuadro 30: Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 449 mm de radio

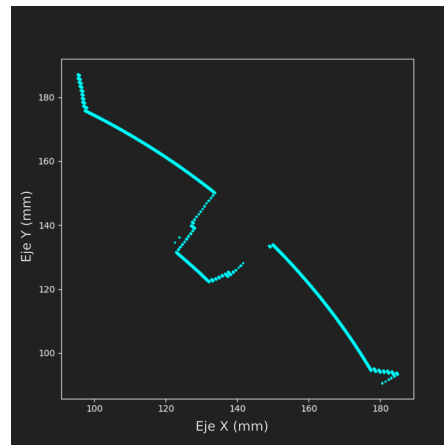
Radio real de 499 mm			
No. Prueba	Promedio (mm)	Sesgo (<i>bias</i> , mm)	Varianza muestral (mm^2)
1	499.3449	-0.6551	2.6114
2	499.1468	-0.8532	2.5134
3	499.1245	-0.8755	2.5269
4	499.2083	-0.7917	2.3679
5	499.1384	-0.8616	2.4510
6	499.2972	-0.7028	2.4785
7	499.2190	-0.7810	2.3240
8	499.2046	-0.7954	2.3981
9	499.1977	-0.8023	2.3949
10	499.2685	-0.7315	2.4364
Promedio	499.2150	-0.7850	2.4503

Cuadro 31: Estadísticas de precisión de 180 revoluciones completas de lectura en entorno circular: 499 mm de radio

15.3. Pruebas para la dispersión de las mediciones angulares del sensor

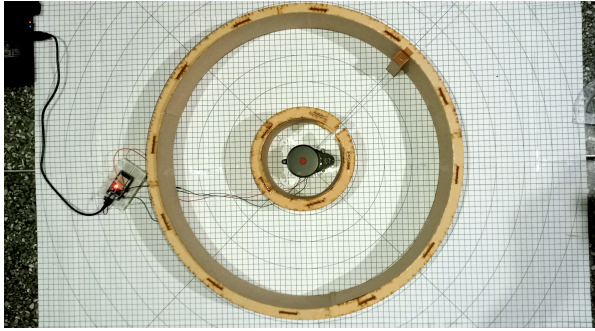


(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 199 mm de radio con arco

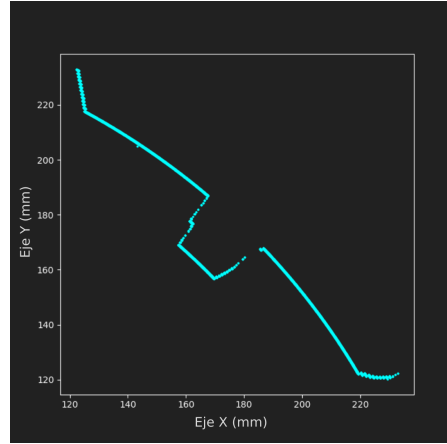


(b) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 199 mm de radio con arco

Figura 88: Reconstrucción del entorno circular de 199 mm de radio con arco, 180 revoluciones completas capturadas

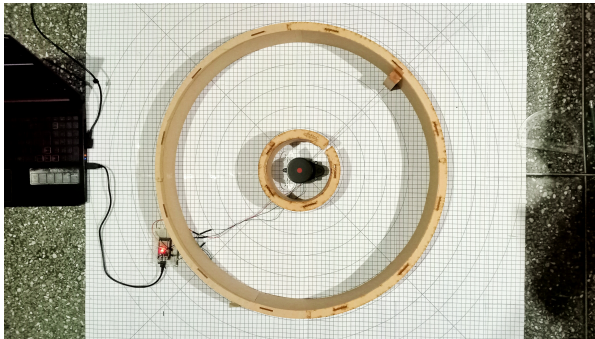


(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 249 mm de radio con arco

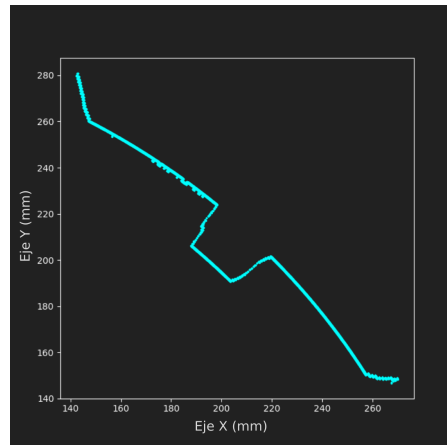


(b) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 249 mm de radio con arco

Figura 89: Reconstrucción del entorno circular de 249 mm de radio con arco, 230 revoluciones completas capturadas

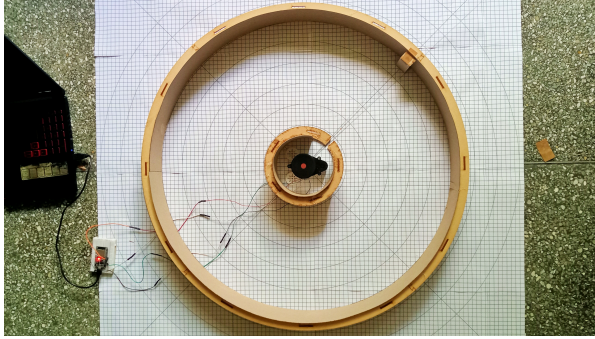


(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 299 mm de radio con arco

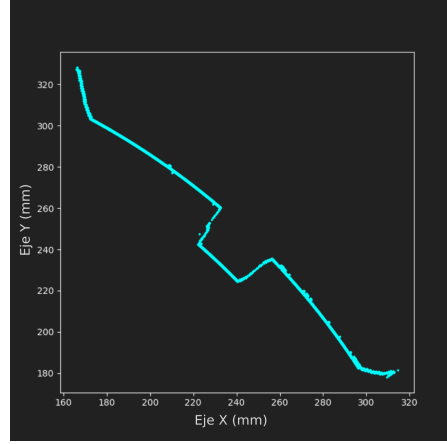


(b) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 299 mm de radio con arco

Figura 90: Reconstrucción del entorno circular de 299 mm de radio con arco, 280 revoluciones completas capturadas

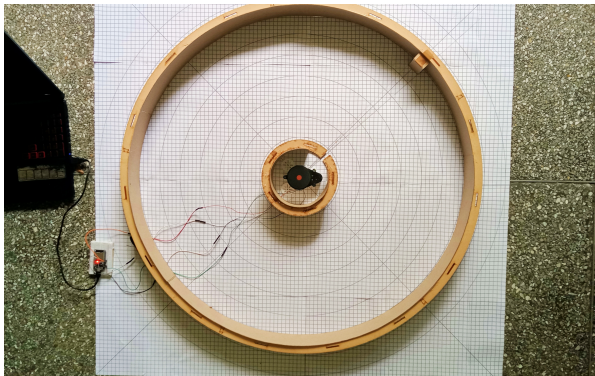


(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 349 mm de radio con arco

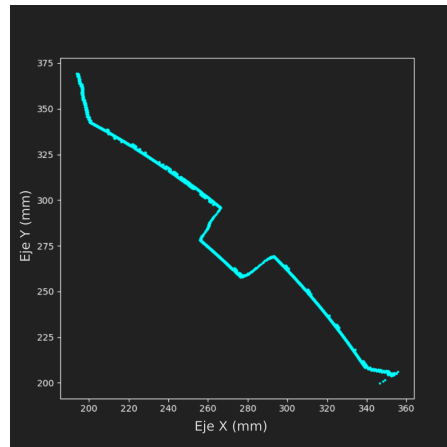


(b) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 349 mm de radio con arco

Figura 91: Reconstrucción del entorno circular de 349 mm de radio con arco, 330 revoluciones completas capturadas

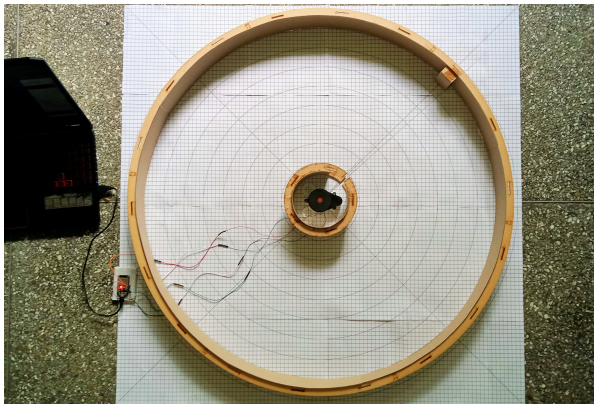


(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 399 mm de radio con arco

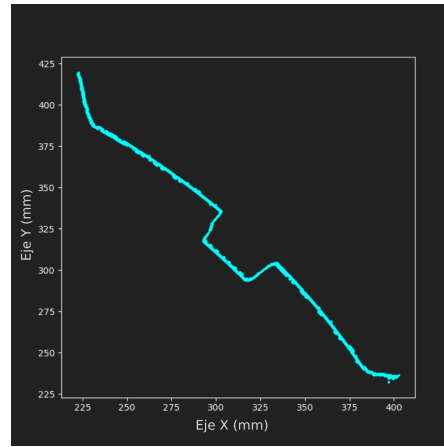


(b) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 399 mm de radio con arco

Figura 92: Reconstrucción del entorno circular de 399 mm de radio con arco, 380 revoluciones completas capturadas



(a) Disposición del sensor FHL-LD20 dentro del entorno circular: 449 mm de radio con arco



(b) Reconstrucción en coordenadas cartesianas de entorno circular: 449 mm de radio con arco

Figura 93: Reconstrucción del entorno circular de 449 mm de radio con arco, 430 revoluciones completas capturadas

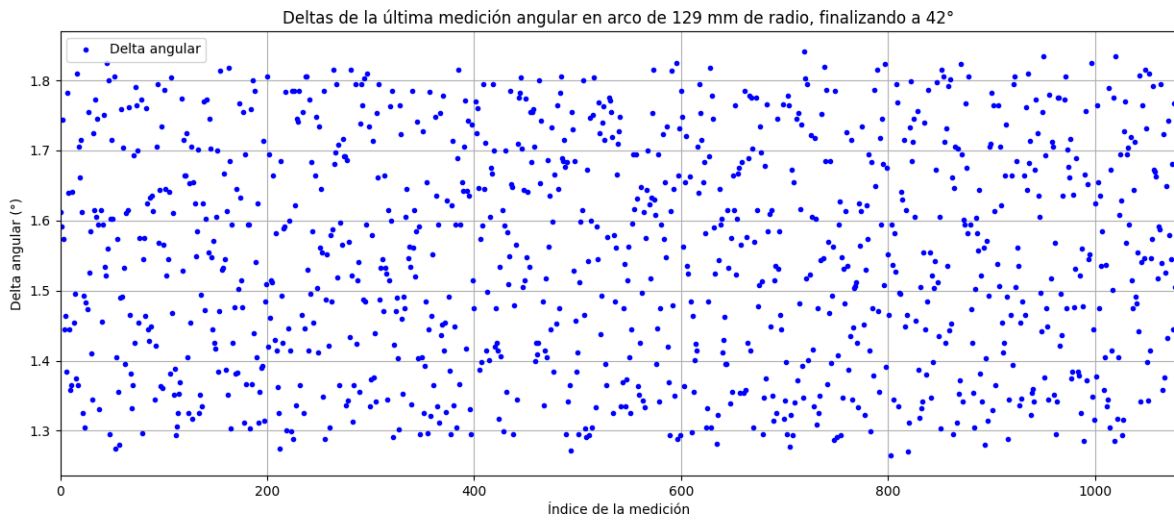


Figura 94: Deltas de la última medición angular capturada para el arco de 129 mm de radio, finalizando a 42°

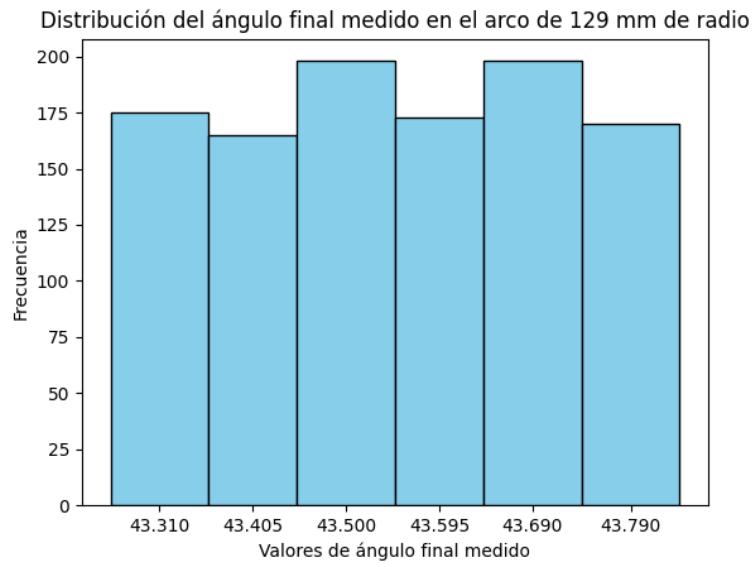


Figura 95: Distribución de la última medición angular capturada para el arco de 129 mm de radio, finalizando a 42°

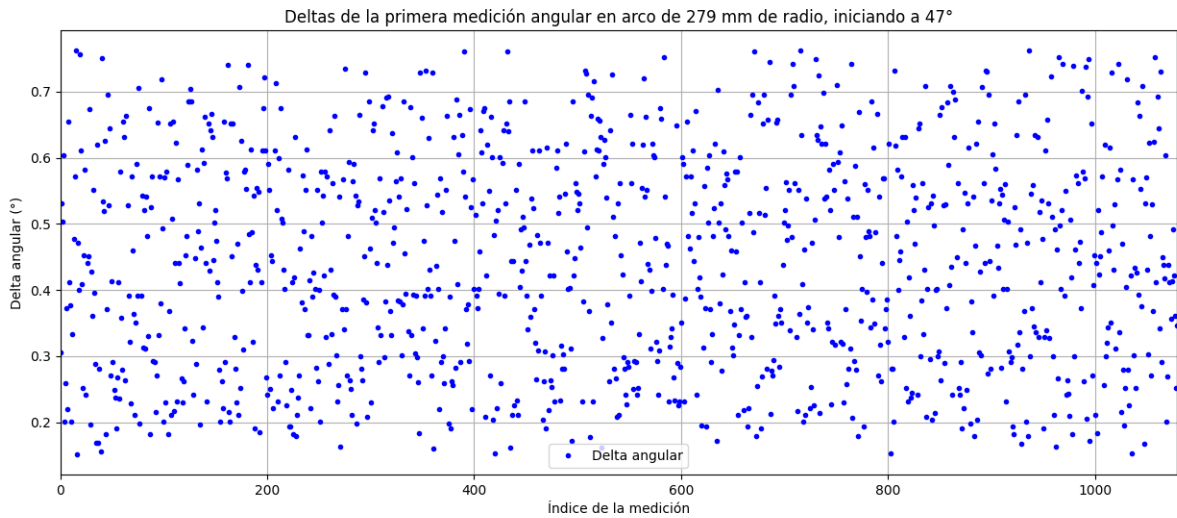


Figura 96: Deltas de la primera medición angular capturada para el arco de 279 mm de radio, iniciando a 47°

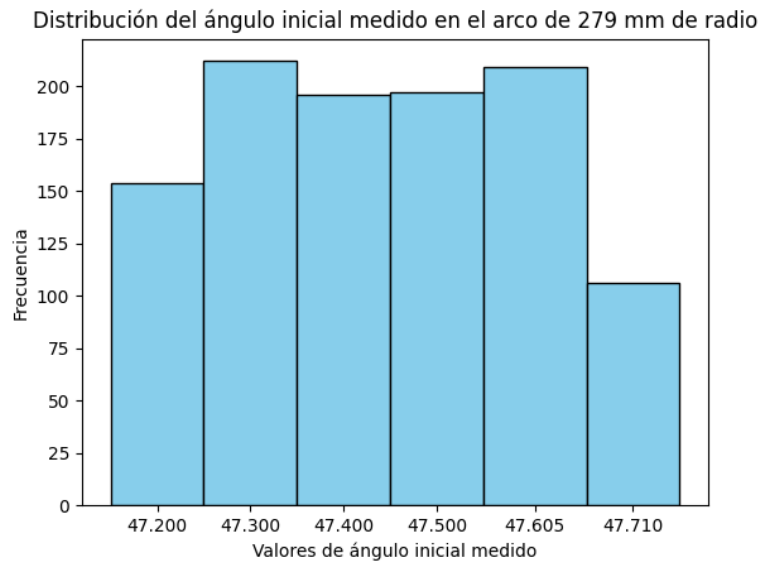


Figura 97: Distribución de la primera medición angular capturada para el arco de 279 mm de radio, iniciando a 47°

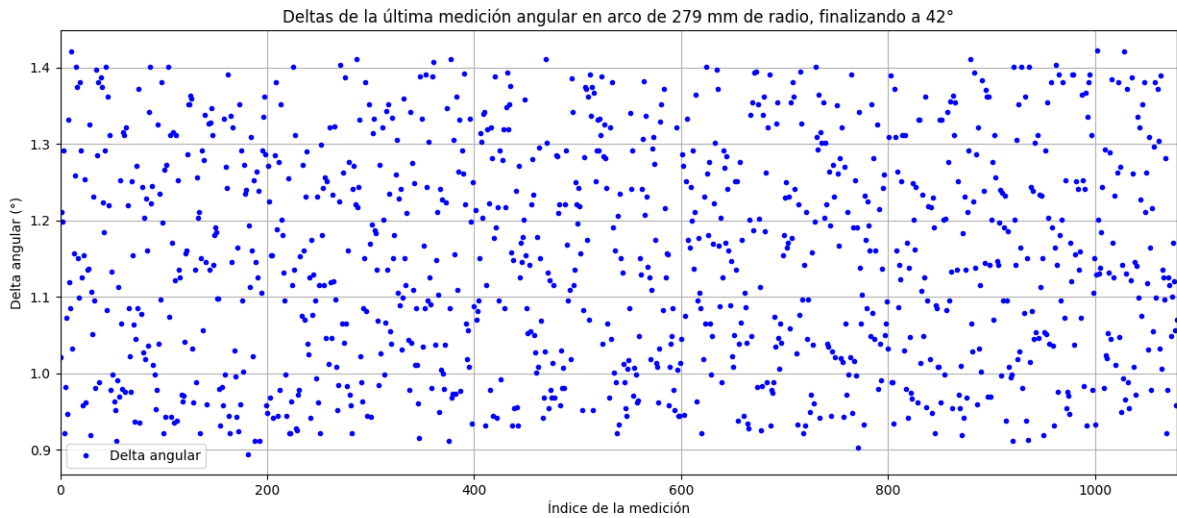


Figura 98: Deltas de la última medición angular capturada para el arco de 279 mm de radio, finalizando a 42°

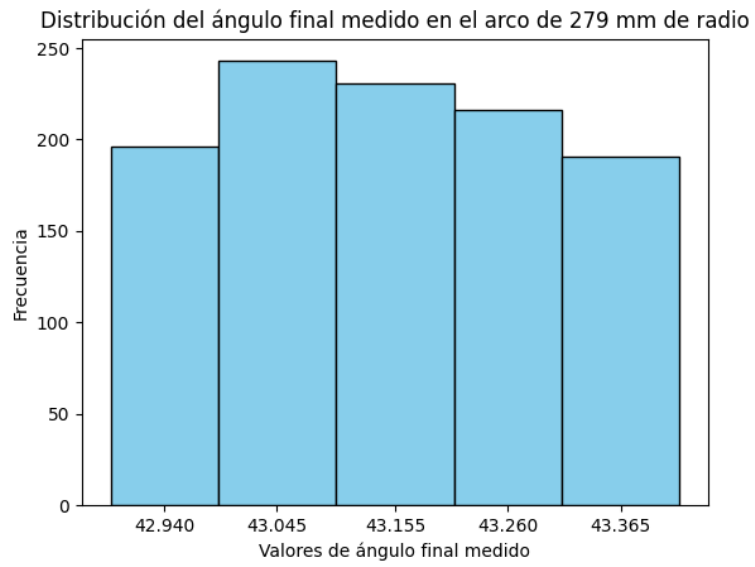


Figura 99: Distribución de la última medición angular capturada para el arco de 279 mm de radio, finalizando a 42°

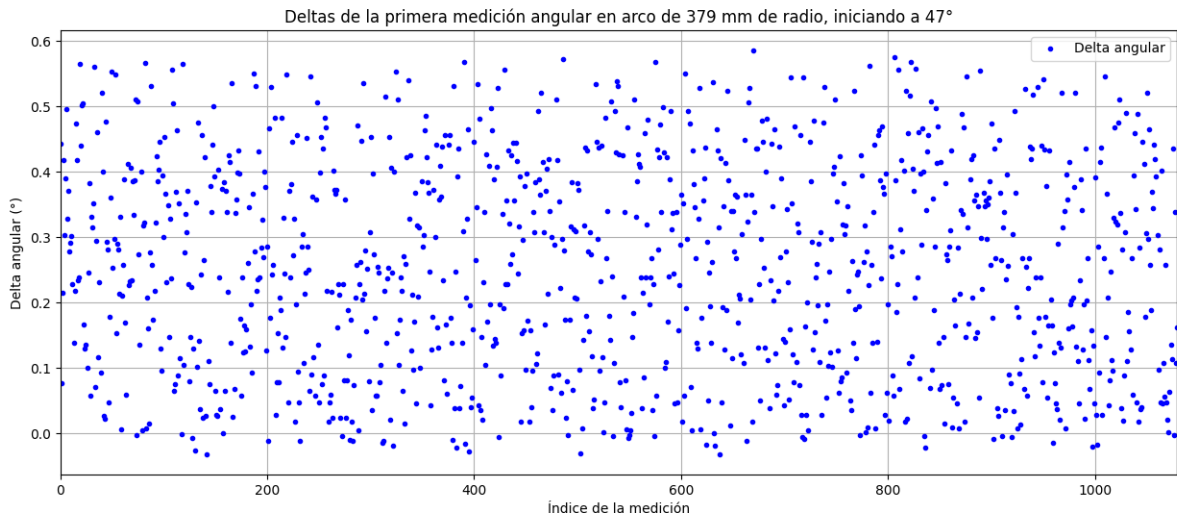


Figura 100: Deltas de la primera medición angular capturada para el arco de 379 mm de radio, iniciando a 47°

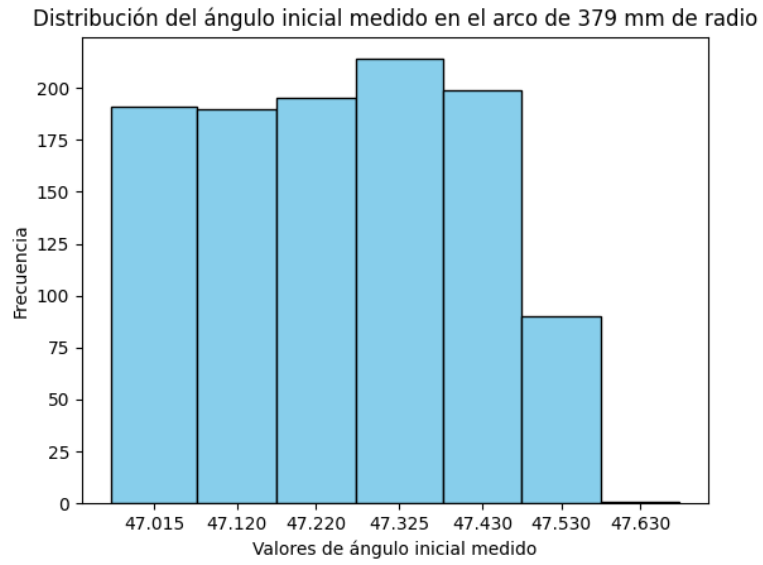


Figura 101: Distribución de la primera medición angular capturada para el arco de 379 mm de radio, iniciando a 47°

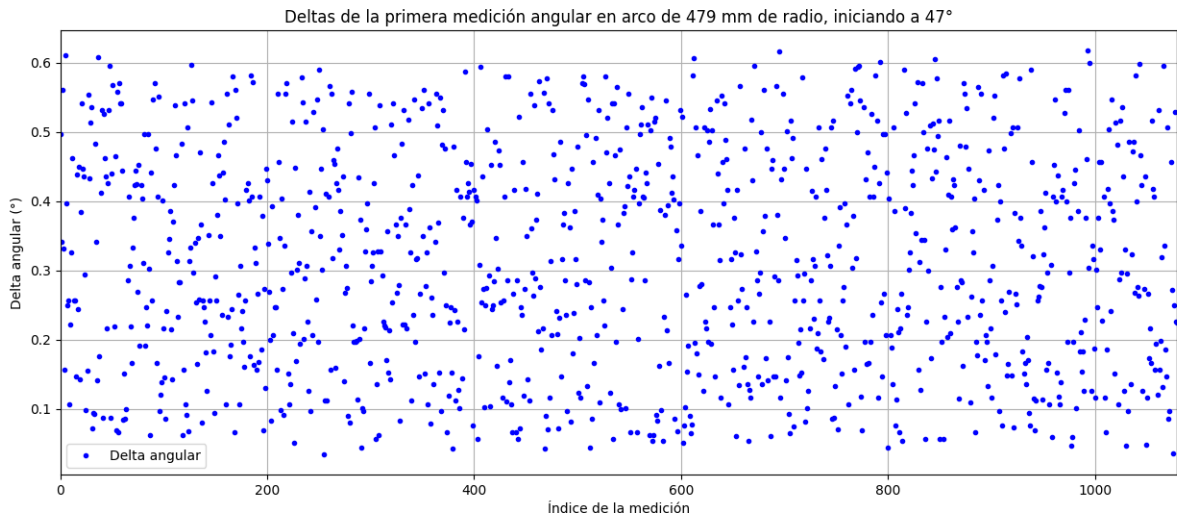


Figura 102: Deltas de la primera medición angular capturada para el arco de 479 mm de radio, iniciando a 47°

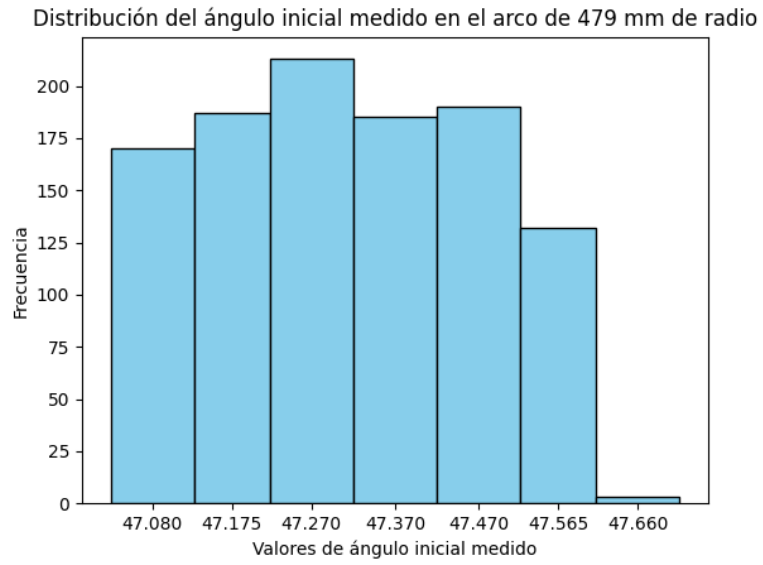


Figura 103: Distribución de la primera medición angular capturada para el arco de 479 mm de radio, iniciando a 47°

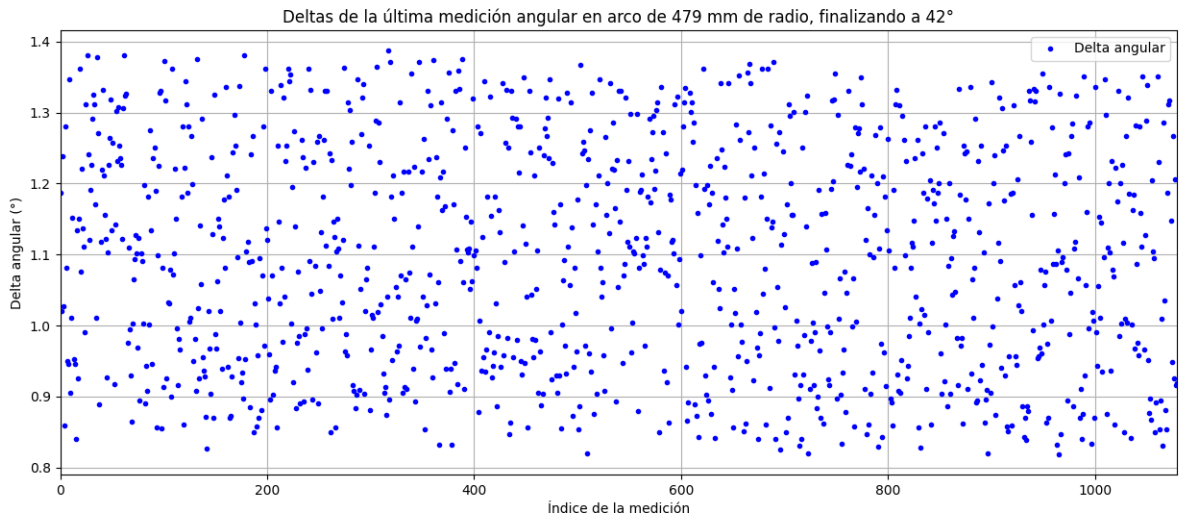


Figura 104: Deltas de la última medición angular capturada para el arco de 479 mm de radio, finalizando a 42°

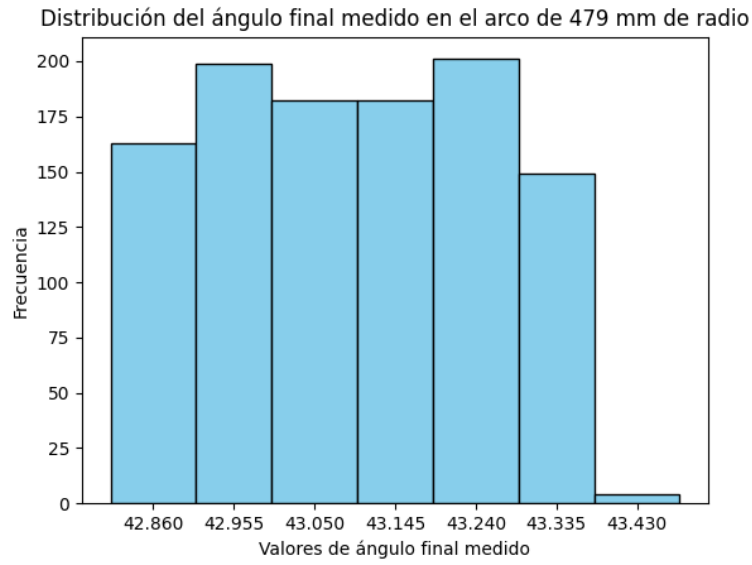


Figura 105: Distribución de la última medición angular capturada para el arco de 479 mm de radio, finalizando a 42°

Ubicación de la medición obtenida	Radio (mm)	Valor mínimo (°)	Promedio (°)	Valor máximo(°)
Primera medición angular al iniciar el arco Valor teórico: 47°	129	47.0350	47.3340	47.6241
	179	46.7588	47.0614	47.4007
	229	47.0750	47.3780	47.7210
	279	47.1514	47.4419	47.7625
	329	46.9895	47.3236	47.6784
	379	46.9684	47.2535	47.5860
	429	46.8787	47.1631	47.4531
	479	47.0345	47.3140	47.6177
Última medición angular al finalizar el arco Valor teórico: 42°	129	43.2650	43.5514	43.8413
	179	42.8707	43.1203	43.6661
	229	42.6210	42.8994	43.1755
	279	42.8943	43.1512	43.4223
	329	42.8055	43.0614	43.3422
	379	42.7478	43.0220	43.3160
	429	42.6731	42.9541	43.2387
	479	42.8186	43.0960	43.3874

Cuadro 32: Estadísticas de precisión: valores mínimo, promedio y máximo de las mediciones angulares en los puntos inicial y final del arco a 42° y 47° respecto al eje horizontal positivo, para los ocho escenarios evaluados

Ubicación de la medición obtenida	Radio (mm)	Valor mínimo (°)	Promedio (°)	Valor máximo (°)
Última medición registrada del círculo externo antes de iniciar el arco Valor teórico: 47°	149	49.3008	49.6009	49.8817
	199	48.5314	48.8972	49.1888
	249	48.0001	48.3327	48.6109
	299	48.4427	48.7354	49.0121
	349	48.1187	48.4472	48.7376
	399	47.9526	48.2464	48.5395
	449	47.8190	48.1295	48.4233
	499	47.9151	48.2242	48.5117
Primera medición del círculo externo tras concluir el arco. Valor teórico: 42°	149	41.3390	41.6180	41.9008
	199	41.6769	41.9410	42.2150
	249	41.5600	41.8453	42.1247
	299	41.9845	42.2746	42.5681
	349	42.1114	42.4033	42.6815
	399	42.1031	42.3844	42.6762
	449	42.0552	42.3442	42.6017
	499	42.1955	42.4754	42.7551

Cuadro 33: Estadísticas de precisión: valores mínimo, promedio y máximo de las mediciones angulares en los puntos inicial y final del círculo externo a 42° y 47° respecto al eje horizontal positivo, para los ocho escenarios evaluados

Ubicación de la medición obtenida	Radio (mm)	Valor mínimo (°)	Promedio (°)	Valor máximo(°)
Primera medición angular al iniciar el arco Valor teórico: 227°	129	226.7935	227.0847	227.3535
	329	226.7304	227.0076	227.3003
	479	226.9684	227.2681	227.5750
Última medición angular al finalizar el arco Valor teórico: 222°	129	222.6146	222.8671	223.0686
	329	222.6403	222.9038	223.1877
	479	222.5004	222.7638	223.0421

Cuadro 34: Estadísticas de precisión: valores mínimo, promedio y máximo de las mediciones angulares en los puntos inicial y final del arco a 222° y 227° respecto al eje horizontal positivo, para los ocho escenarios evaluados

Ubicación de la medición obtenida	Radio (mm)	Valor mínimo (°)	Promedio (°)	Valor máximo (°)
Última medición registrada del círculo externo antes de iniciar el arco Valor teórico: 227°	149	228.8206	229.0626	229.3290
	349	227.9150	228.2045	228.4794
	499	227.5307	227.8043	228.1843
Primera medición del círculo externo tras concluir el arco. Valor teórico: 222°	149	221.0423	221.3194	221.6051
	349	221.6696	221.9399	222.24052
	499	221.7479	222.1962	222.5588

Cuadro 35: Estadísticas de precisión: valores mínimo, promedio y máximo de las mediciones angulares en los puntos inicial y final del círculo externo a 222° y 227° respecto al eje horizontal positivo, para los ocho escenarios evaluados

15.4. Enlace al repositorio en GitHub

Más información en https://github.com/CeronCh/Tesis_LiDAR.git