

Recibido:
3/12/2023

Aceptado:
11/12/2023



Prototipo para levantamiento arquitectónico: desarrollo y evaluación caso de estudio del Hospital Metropolitano de Tunja

Prototype for architectural survey: development and evaluation case study of the Metropolitan Hospital of Tunja

Christian Eduardo Hincapie Blandón¹
Angelo Morales Castaño²
Jose David Lopez Alzate³
Luis Edier Gañan Gañan⁴

Hincapie, C., Morales, A., Lopez, J., y Gañan, L. (2023). Prototipo para levantamiento arquitectónico: Desarrollo y evaluación caso de estudio del Hospital Metropolitano de Tunja. *Revista Senova: Revista Del Sistema De Ciencia, Tecnología E Innovación*, 7(1),59-85. <https://doi.org/10.23850/23899573.6057>.

1 Tecnólogo en automatización de sistemas mecatrónicos, centro de automatización industrial, thepalmdeira@gmail.com

2 Tecnólogo en automatización de sistemas mecatrónicos, centro de automatización industrial, anghelotiy@gmail.com

3 Instructor automatización, Centro de automatización industrial, jdlopez@sena.edu.co

4 Instructor automatización, centro de automatización industrial, lganana@sena.edu.co

Resumen

El presente artículo describe la construcción e implementación de un prototipo compacto y portátil para el levantamiento de una nube de puntos del Hospital Metropolitano de Tunja, Colombia, como resultado del proyecto SENNOVA denominado “Desarrollo de diagnósticos preliminares en edificaciones existentes a partir de la fusión de cuatro tecnologías de sensoramiento remoto: escáner láser, fotogrametría, termografía y radar de penetración de terrenos, a través de modelos de información (BIM)”, desarrollado en conjunto con el Centro Industrial de Mantenimiento y Manufactura (Sena Regional Boyacá). Los componentes clave de esta solución incluyen un LIDAR Hesai, una unidad inercial de nueve ejes (IMU) y una computadora UP4000. La construcción de la nube de puntos se llevó a cabo mediante la implementación de LIO-SAM, el cual se encuentra desarrollado en el marco de ROS.

La adquisición de datos fue realizada en tres configuraciones distintas del LIDAR y la IMU. Este enfoque buscaba determinar la orientación más efectiva para lograr una representación completa y precisa. Simultáneamente, se llevaron a cabo pruebas modificando el parámetro de lazo cerrado en LIO-SAM y ejecutando el software tanto en la UP4000 como en un computador externo.

Los resultados revelaron que la configuración que minimiza el error se logra al posicionar el LIDAR y la IMU horizontalmente, con el eje Z orientado verticalmente. No obstante, se destacó la necesidad de realizar pruebas adicionales para evaluar exhaustivamente la influencia del parámetro de lazo cerrado. Además, se observó que la UP4000 posee suficiente capacidad de procesamiento para ejecutar LIO-SAM, aunque la ejecución simultánea de más procesos podría afectar los resultados obtenidos.

Palabras Clave: LIDAR, IMU, SLAM, LIO-SAM, reconstrucción, nube de puntos, levantamiento.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción en constante evolución, la necesidad de técnicas precisas y eficientes de levantamiento arquitectónico se ha vuelto cada vez más crucial. Los métodos tradicionales, como la inspección manual y el escaneo láser terrestre, aunque proporcionan mediciones detalladas, a menudo no son suficientes para adaptarse a entornos complejos o inaccesibles. Además, estos métodos suelen requerir mucho trabajo y tiempo, limitando su practicidad en proyectos de construcción de ritmo acelerado [Anderson, 2021].

Para superar las limitaciones de los métodos convencionales de levantamiento arquitectónico, han surgido plataformas portátiles con sensores avanzados, ofreciendo una alternativa prometedora. En este contexto, la tecnología de Localización y Mapeo Simultáneos (SLAM), que ha transformado la robótica al posibilitar la navegación y mapeo autónomos en tiempo real, se presenta como la base para la aplicación de levantamiento arquitectónico. Destacando dentro de este marco, el algoritmo LIO-SAM se distingue por su eficaz integración de datos de LIDAR y unidades de medición inercial (IMU).

Este artículo presenta el diseño y la evaluación de una plataforma prototipo específicamente diseñada para fines de levantamiento arquitectónico, aprovechando la tecnología LIO-SAM. La plataforma propuesta, llevada por una persona, ofrece ventajas significativas en términos de flexibilidad y maniobrabilidad, permitiendo la adquisición de datos en entornos diversos, incluidos espacios confinados o áreas de acceso limitado. La integración de LIO-SAM permite la localización y el mapeo de alta precisión en tiempo real, superando las limitaciones de los métodos tradicionales y allanando el camino para un levantamiento arquitectónico eficiente y preciso.

Un aspecto crítico de esta investigación radica en analizar el impacto de la colocación y orientación de los sensores en la eficiencia y precisión del levantamiento arquitectónico. Al evaluar diferentes configuraciones, se puede determinar la ubicación óptima de los sensores de LIDAR e IMU, maximizando la adquisición de datos, la densidad de la nube de puntos y el rendimiento general. Este proceso de optimización es crucial para garantizar la efectividad de la plataforma propuesta en la captura de modelos de edificios completos y precisos.

La evaluación de la plataforma prototipo implica la recopilación de datos en diferentes orientaciones y su evaluación en términos de precisión y completitud. Los resultados proporcionarán información valiosa sobre la eficacia de diferen-

tes configuraciones de sensores y la idoneidad de la plataforma propuesta para aplicaciones prácticas de levantamiento arquitectónico.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: la Sección II aborda el funcionamiento clave del algoritmo SLAM y proporciona una visión general de LIO-SAM. En la Sección III, se presenta una descripción general del diseño y desarrollo de la plataforma prototipo, junto con la metodología empleada en la investigación. La Sección IV presenta los resultados de la evaluación, comparando diversas configuraciones de sensores. Finalmente, en la Sección V, el artículo concluye con un análisis de los hallazgos y las implicaciones prácticas de la tecnología LIO-SAM en la levantamiento arquitectónico, al mismo tiempo que sugiere posibles direcciones futuras de investigación.

2. FUNCIONAMIENTO CLAVE DE SLAM - LIO-SAM

A. SLAM

La Localización y Mapeo Simultáneo (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM, por sus siglas en inglés) es una técnica empleada por robots móviles para construir simultáneamente un mapa del entorno que explora y determina sus propias ubicaciones y las de los puntos de referencia circundantes. En SLAM, los procesos de mapeo y localización ocurren al mismo tiempo, utilizando el mapa generado para calcular las posiciones de los puntos de referencia y la trayectoria del robot móvil. La principal ventaja del SLAM radica en su capacidad para generar un mapa del entorno geoméricamente consistente mientras localiza simultáneamente al robot y a los puntos de referencia, convirtiéndolo en una técnica fundamental en el campo de los robots móviles autónomos [Durrant-Whyte y Bailey, 2006].

El proceso de SLAM comprende una serie de pasos esenciales con el objetivo principal de actualizar la posición del robot mediante la información proporcionada por sus sensores. Esta corrección se lleva a cabo identificando características, o puntos de referencia, en el entorno y revisándolos nuevamente a medida que el robot se desplaza.

En el núcleo del proceso SLAM, desempeñando un papel fundamental, se encuentra el Filtro de Kalman Extendido (EKF) [Gao et al., 2017].

El EKF, un algoritmo de estimación, se utiliza en el ámbito de la robótica y la localización para estimar la posición y orientación de un robot en un entorno desconocido o en movimiento.

En este caso, mientras el LIDAR escanea el entorno emitiendo pulsos de luz láser y midiendo el tiempo que tarda en regresar después de impactar un objeto, proporcionando mediciones de distancia y dirección de los objetos en el entorno, la IMU mide las aceleraciones lineales y angulares del robot, ofreciendo información sobre la velocidad de cambio de la orientación y la aceleración del robot. El EKF fusiona estas dos fuentes de información para obtener una estimación más precisa de la posición y orientación del robot [Leonard y Durrant-Whyte, 1991].

El EKF realiza un seguimiento de cuán segura es la información sobre la posición del robot y los puntos de referencia que ha observado en el entorno.

Una secuencia general seguida por [SLAM A. Khairuddin y Haron, 2015] es:

1. Inicialización: Comienza con una estimación inicial de la posición del robot, configura el EKF con una idea de cuán seguros se está de la posición del robot y los puntos de referencia, haciendo una actualización de la odometría.
 2. Extracción de puntos de referencia: selecciona puntos de referencia del entorno según la ubicación actual del robot.
 3. Asociación de puntos de referencia: intenta asociar los nuevos puntos de referencia con aquellos que se han visto antes a medida que el robot se desplaza.
 4. Actualización del EKF con puntos de referencia reobservados: utiliza los puntos de referencia que se ven nuevamente para actualizar la mejor estimación del robot sobre su posición en el EKF.
 5. Adición de nuevos puntos de referencia: si se identifican puntos de referencia que no se han visto antes, se agregan al EKF para poder vigilarlos.
 6. Iteración continua: continúa pasando por estos pasos mientras el robot sigue moviéndose y explorando.
-

La Figura 1 muestra una descripción general del proceso SLAM.

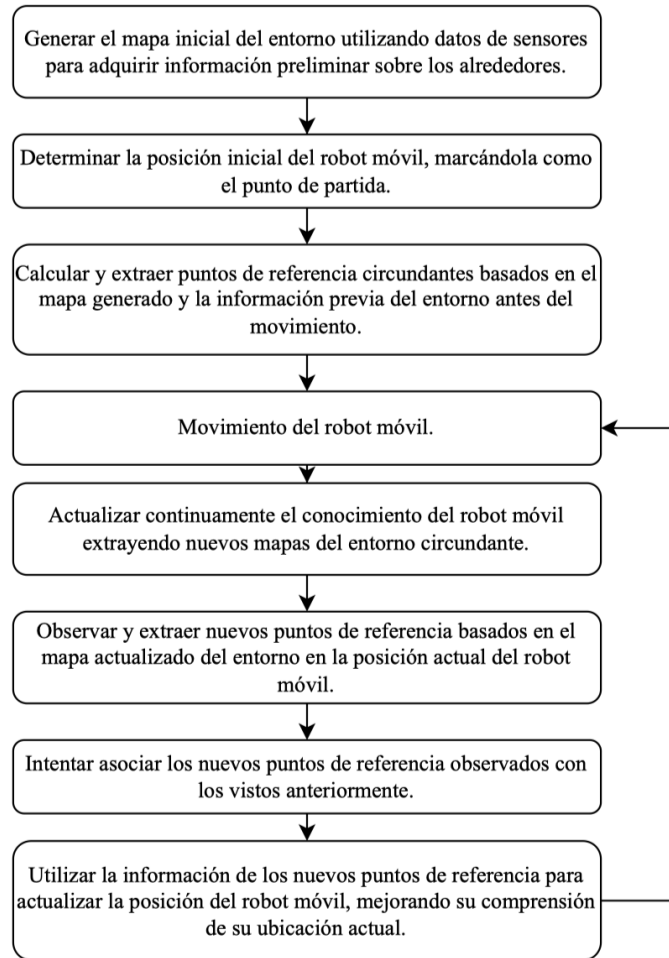
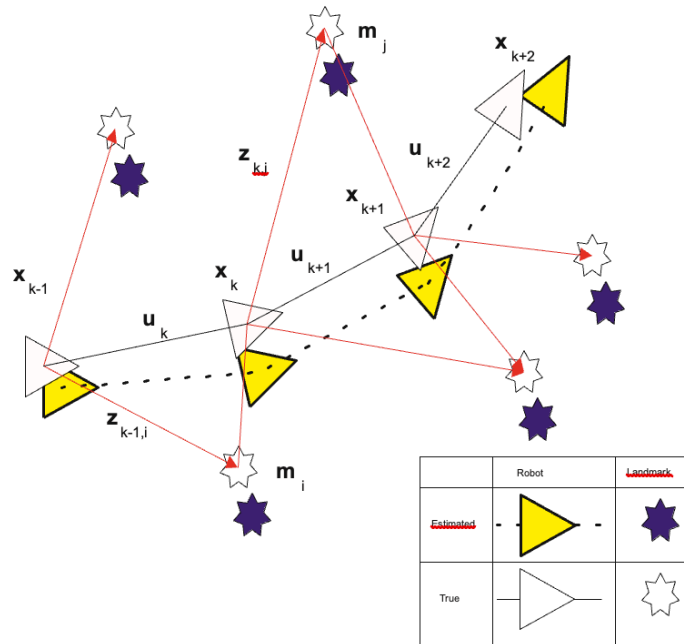


Fig. 1: *Proceso SLAM*

Fig. 2: Gráfico SLAM [Durrant-Whyte y Bailey, 2006]



La Figura 2 muestra un gráfico de SLAM. Para este, se considera un robot móvil desplazándose a través de un entorno y tomando observaciones relativas de varios puntos de referencia desconocidos mediante un sensor ubicado en el robot. En un instante de tiempo k , se definen las siguientes cantidades: $\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{m}_i, \mathbf{z}_{ik}$. [Durrant-Whyte y Bailey, 2006]

- \mathbf{x}_k : El vector de estado que describe la ubicación y orientación del vehículo.
- \mathbf{u}_k : El vector de control, aplicado en el tiempo $k - 1$ para llevar el vehículo a un estado \mathbf{x}_k en el tiempo k .
- \mathbf{m}_i : Un vector que describe la ubicación del i -ésimo punto de referencia, cuya ubicación verdadera se asume invariable en el tiempo.
- \mathbf{z}_{ik} : Una observación tomada desde el vehículo de la ubicación del i -ésimo punto de referencia en el tiempo k .

B. LIO-SAM

LIO-SAM (Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping) se destaca como un estimador de trayectoria de robots móviles y un generador de mapas en tiempo real altamente preciso. Este rendimiento excepcional se logra al considerar una serie de elementos cruciales, como la detección de cierre de bucle, la corrección de trayectoria y la estimación del sesgo en las mediciones del IMU.

LIO-SAM opera al recibir datos de un sensor Lidar 3D y un IMU, utilizando estas observaciones para estimar el estado y la trayectoria del robot. Este problema de estimación del estado se modela como un problema MAP que se aborda mediante un grafo de factores. Bajo la suposición de un modelo de ruido gaussiano, la inferencia MAP se equipara a resolver un problema de mínimos cuadrados no lineales.

En su funcionamiento, LIO-SAM recopila datos de un lidar 3D y un IMU, para luego formular el problema como una máxima a posteriori (MAP) con el propósito de estimar el estado y la trayectoria del robot. La resolución de este problema se lleva a cabo mediante un grafo de factores. La variable clave en este contexto, que representa el estado del robot, se determina a través de cuatro factores esenciales: factores de pre-integración IMU, factores de odometría lidar y factores de cierre de bucle. En el caso del prototipo, se prescinde del uso del GPS que sería el cuarto factor, ya que se proyecta su implementación en entornos interiores. Una visión general del sistema LIO-SAM con los tres factores mencionados se presenta en la Figura 3.

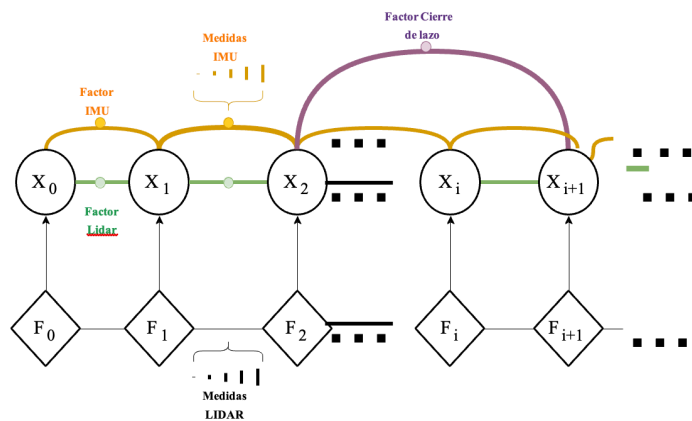


Fig. 3: Gráfica LIO-SAM

En este contexto, se emplean tres tipos de factores junto con un tipo de variable, para la construcción del grafo de factores. La variable, que representa el estado del robot en un momento específico, se asigna a los nodos del grafo. Los tres tipos de factores son:

1. **Factores de pre-integración IMU:** el IMU proporciona mediciones de velocidad angular y aceleración. La optimización conjunta del sesgo del IMU y los factores de odometría lidar se lleva a cabo en el grafo. Se utiliza

el método de preintegración IMU para obtener el movimiento relativo del cuerpo entre dos instantes en el tiempo.

2. **Factores de odometría lidar:** se valen de un método denominado Selección de fotogramas clave, ampliamente utilizado en el ámbito visual SLAM. El proceso comienza con un estado inicial x_0 del robot, que se desplaza capturando un fotograma clave cuando la pose supera un umbral definido por el usuario. Todo lo comprendido entre dos fotogramas se descarta. Así se estima el estado del robot x . En cuanto al mapa, se emplea un método conocido como Ventana deslizante, seleccionando algunos subfotogramas destacados entre los fotogramas clave y utilizando sus características para calcular la transformación.
3. **Factores de cierre de bucle:** posibilitan que el sistema identifique el retorno a una región previamente mapeada. Esto facilita la corrección de la trayectoria y del mapa en lapsos prolongados a partir de la reubicación de la pose del sistema de navegación, reduciendo así la incertidumbre de las estimaciones y brindando mayor precisión y robustez.

Finalmente, se incorpora un nuevo nodo de estado del robot x al grafo cuando el cambio en la pose del robot excede un umbral definido por el usuario. La optimización del grafo de factores ocurre al insertar un nuevo nodo mediante el suavizado incremental y el mapeo con el árbol de Bayes.

La implementación de LIO-SAM se detalla en el paper original. [Shan et al., 2020]

3. DISEÑO Y METODOLOGÍA

A. Diseño general del prototipo.

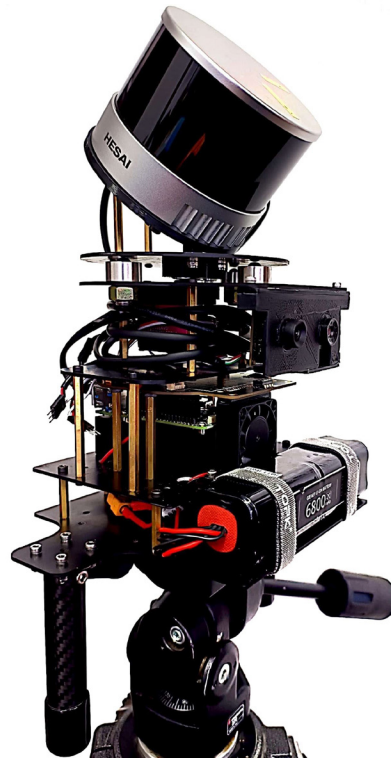


Fig. 4: Prototipo Plataforma.

En la Tabla 1 se pueden observar las características del prototipo:

Característica	Valor
Peso	2.4 kg
Dimensiones	224 mm Ancho, 117 mm Largo y 343 mm Alto
Batería	6800 mA/h

Tabla I: Características del Prototipo

El diseño del prototipo se basó en cuatro aspectos esenciales: portabilidad, estabilidad, compatibilidad y escalabilidad, con el objetivo de garantizar un rendimiento eficiente del sistema.

- Portabilidad: la movilidad eficiente fue prioritaria; la plataforma se concibió como un dispositivo móvil ergonómico que permite la manipulación sin esfuerzo por una sola persona. La estructura liviana se logró mediante el

uso de fibra de vidrio y fibra de carbono, ofreciendo una combinación única de resistencia y ligereza. Por otro lado, los componentes con geometrías complejas fueron fabricados mediante impresión 3D en PLA, un material conocido por ser ligero y resistente. Además, se garantiza la portabilidad del prototipo al incorporar una batería de iones de litio de cuatro celdas, asegurando autonomía energética durante la recolección de datos.

- **Estabilidad:** la estabilidad es crucial para mediciones precisas durante el levantamiento arquitectónico. Se implementó un sistema de fijación que minimiza vibraciones, asegurando una posición estática relativa entre la IMU y el LIDAR. Se buscó mantener una referencia constante entre los sensores, eliminando posibles perturbaciones causadas por el movimiento del operador.
- **Compatibilidad:** se destaca la importancia de la coherencia entre los sensores, tanto en su interacción mutua como en su capacidad de comunicación efectiva con el computador que dirige el sistema.
- **Escalabilidad:** se preparó el prototipo para una futura integración con otros sensores, como cámara RGB, cámara térmica y servomotores, permitiendo su expansión y adaptación para análisis más especializados y diversos. Este enfoque escalable amplía las capacidades del sistema para abordar diferentes aplicaciones y requisitos analíticos.

En la Tabla II, se presentan de manera detallada las especificaciones de la IMU, el LIDAR y la computadora seleccionada. Vale la pena señalar que se realizaron adaptaciones en el código base de LIO-SAM para permitir la lectura tanto del LIDAR como de la IMU seleccionados.

En la Tabla 2 se registran las características de los dispositivos:

Dispositivo	Característica
IMU [7]	Modelo: WHEELTEC N100 Mini Frecuencia: 400 Hz Grados de Libertad (DOF): 9
LIDAR [8]	Modelo: Hesai Pandar XT-32 Alcance Máximo: 200 m Campo de Visión (FOV): 31° Frecuencia(Hz): 5Hz, 10Hz, 20Hz
Computadora Monoplaca [9]	Procesador: Intel® Pentium® N4200 Memoria RAM: 8GB Sistema Operativo: Ubuntu™ Conectividad: Gigabit Ethernet, USB 2.0 HDMI, DisplayPort, USB 3.2

Tabla 2: Características de Dispositivos

Entre los aspectos de diseño cabe destacar:

- Posición de los sensores: la IMU se ubicó en un soporte rígido junto al LIDAR, asegurándose de que el eje Y de su marco de referencia coincidiera con el eje Y del LIDAR. Al mismo tiempo, se posicionó el LIDAR en la parte superior del dispositivo para evitar obstrucciones, lo que permitió un amplio campo de visión y una captura efectiva de datos.
- Diseño modular: adoptando un enfoque modular, la plataforma incorpora bases intercambiables que facilitan ajustar la posición de los sensores según las necesidades de cada aplicación. Esta flexibilidad no solo simplifica la optimización para diferentes escenarios, sino que también facilita el mantenimiento y las posibles expansiones con nuevos sensores o componentes.
- Montaje de la plataforma: el proceso de montaje se simplificó para garantizar eficiencia y rapidez. Los sensores se conectan fácilmente mediante cables y conectores estándar, mientras que el software necesario para el algoritmo LIO-SAM se instala de manera sencilla en la computadora portátil UP4000 mediante Docker [Docker, 2023].

B. Metodología

Para llevar a cabo la evaluación del dispositivo, se seleccionó el Hospital Metropolitano de Tunja, específicamente la fase de ampliación del complejo hospitalario. Esta área de prueba consiste en una estructura hospitalaria en construcción de cuatro niveles, actualmente en la fase de pórticos, que incluye columnas, vigas y placas. Además, la obra está iniciando la fase de levantamiento de muros perimetrales y divisorios.

El enfoque de las pruebas se centró en el tercer piso del edificio, donde la planta no está delimitada hacia los bordes debido a la ausencia de muros perimetrales o fachadas definidas. Este entorno presenta superficies rugosas debido al concreto a la vista, sin recubrimiento adicional más allá del concreto posterior a la fundición. Es importante señalar que los elementos estructurales no cuentan con recubrimiento o acabado.

Durante las pruebas, se identificaron obstáculos comunes en un entorno de construcción, como herramientas de construcción, formaletas, parales y andamios, que podrían interferir en el levantamiento realizado por el prototipo.

Además, se observaron vigas y viguetas a la vista debido a la inexistencia de cielos rasos en esta etapa de construcción.

Este contexto específico de prueba proporciona un escenario realista y desafiante que permitirá evaluar la capacidad del dispositivo para enfrentar condiciones complejas y dinámicas en entornos de construcción en proceso. En la Figura 5 se puede apreciar la metodología adquisición, procesamiento y postprocesamiento de datos.

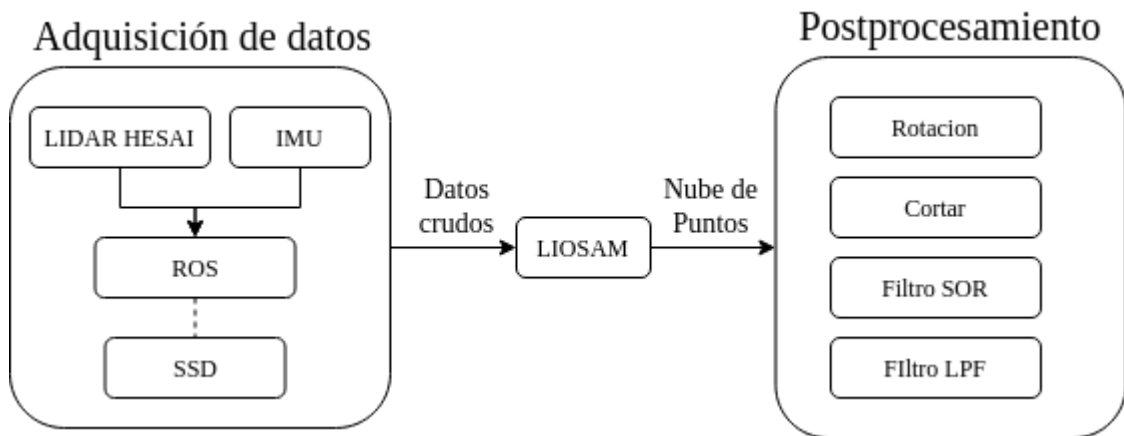


Fig. 5: Gráfico metodología adquisición , procesamiento y postprocesamiento de datos.

Por lo tanto, el proceso descrito en la Figura 5 comprende tres etapas fundamentales para la obtención de las nubes de puntos. En la primera fase, se lleva a cabo la adquisición de datos tanto del LIDAR como de la IMU a través de ROS. Estos datos son posteriormente procesados mediante LIO-SAM. Inicialmente, se registraron en un SSD y se procesaron en un equipo distinto al UP4000, específicamente en un Acer Swift SFX14-42G- 16GB de RAM y LLVM 15.0.7 con una gráfica de 256 bits. Este enfoque se adoptó con el propósito de garantizar un procesamiento eficiente de LIO-SAM para la comparación inicial. Posteriormente, se realizó la ejecución de LIO-SAM en el UP4000 con el propósito de contrastar la precisión de las nubes de puntos obtenidas con el resultado obtenido mediante el uso del Acer Swift.

1) *Adquisición de datos*: El procedimiento de adquisición de datos se ejecutó mediante tres configuraciones diferentes en el prototipo. En la primera configuración, se posicionó el LIDAR y la IMU a 0 grados; en la segunda, se colocó

el LIDAR a 45 grados y la IMU a 0 grados y, finalmente, en la tercera configuración, ambos se dispusieron a 45 grados. Es importante destacar que, para el procesamiento en LIOSAM, se realizaron las rotaciones respectivas necesarias para establecer la relación correcta entre la posición de la IMU y el LIDAR. Las diferentes configuraciones se muestran en la Figura 6.

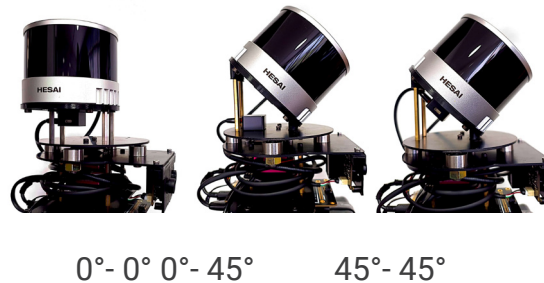


Fig. 6: Configuraciones IMU-LIDAR.

El propósito fundamental de esto es determinar cuál de ellas favorece óptimamente la captura de la nube de puntos en el contexto de la reconstrucción arquitectónica. Al explorar distintas orientaciones, se busca identificar la disposición que maximiza la calidad y la coherencia de los datos recopilados, contribuyendo así a establecer las condiciones ideales para la aplicación práctica de la tecnología en entornos constructivos reales.

Es importante considerar que durante los trayectos de captura de datos, el usuario se vio en la necesidad de realizar giros respecto al eje de rol con el fin de superar la limitación del campo de visión del LIDAR.

Adicionalmente, en el proceso de LIO-SAM se llevaron a cabo pruebas activando y desactivando el factor de lazo cerrado para evaluar su impacto en el rendimiento.

2) *Postprocesamiento*: LIO-SAM genera una nube de puntos que, si bien contiene información valiosa, también incluye elementos no relevantes para el análisis específico. Para abordar este inconveniente, se implementa un proceso de postprocesamiento que consta de varias fases.

En primer lugar, se lleva a cabo una rotación de los puntos para alinearlos con la posición real del edificio. Seguido de esto, se realiza un corte básico para retener únicamente los datos de interés. Posteriormente, se implementa un proceso de filtrado utilizando el método SOR (Statistical Outlier Removal) mediante la biblioteca PCL. Este método computa inicialmente la distancia promedio de

cada punto a sus vecinos (considerando k vecinos más cercanos). Luego, se rechazan los puntos que están más alejados que la distancia promedio. En este caso, se verificó alrededor de 100 puntos vecinos para la validación.

Finalmente, la nube de puntos resultante se somete a un proceso adicional de filtrado mediante un filtro paso bajo (LPF o low pass filter), que guarda cierta similitud con el filtro SOR, pero considera la distancia a la superficie subyacente en lugar de la distancia a los vecinos. Este algoritmo ajusta localmente un plano alrededor de cada punto en la nube y elimina el punto si está demasiado alejado del plano ajustado.

Para estimar la superficie subyacente (planar), se utilizó un radio de esfera de 0.05 en este proceso, asegurando una representación precisa y detallada de la estructura arquitectónica en la nube de puntos resultante.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan algunas imágenes que ilustran el proceso y los resultados obtenidos, usando la configuración de 45°-45°, dado que el procedimiento es análogo en todas las configuraciones.

En primer lugar, en la Figura 7 se exhibe el proceso de captura de datos durante la visita al hospital, donde se puede observar las columnas, vigas y placas de la estructura, y en los alrededores algunos andamios y materiales de construcción.

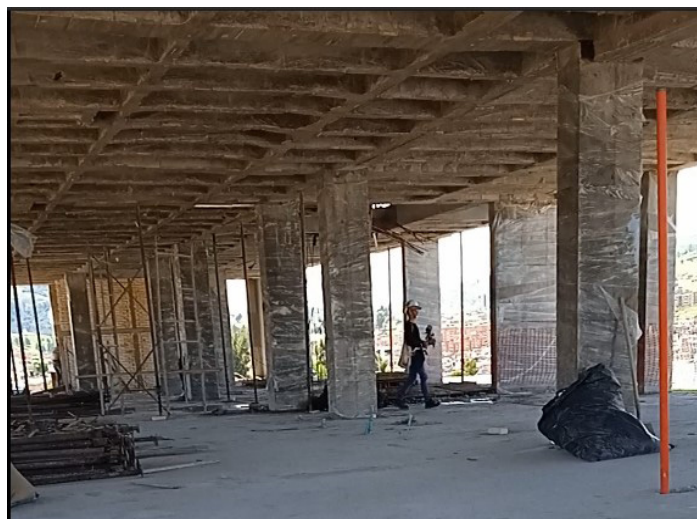


Fig. 7: Toma de datos.

En la Figura 8 se observa un plano del tercer piso del Hospital con la trayectoria de adquisición de datos marcada en rojo, la cual rodea las columnas 2B, 3B, 2C y 3C. Cabe aclarar que esta trayectoria se repitió para cada una de las configuraciones.

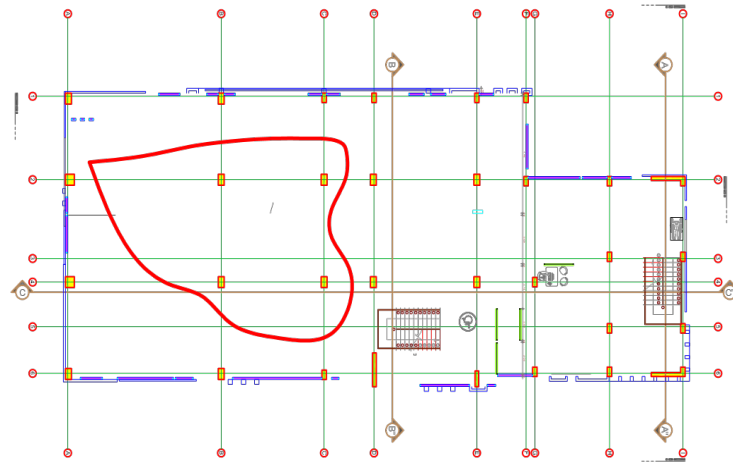
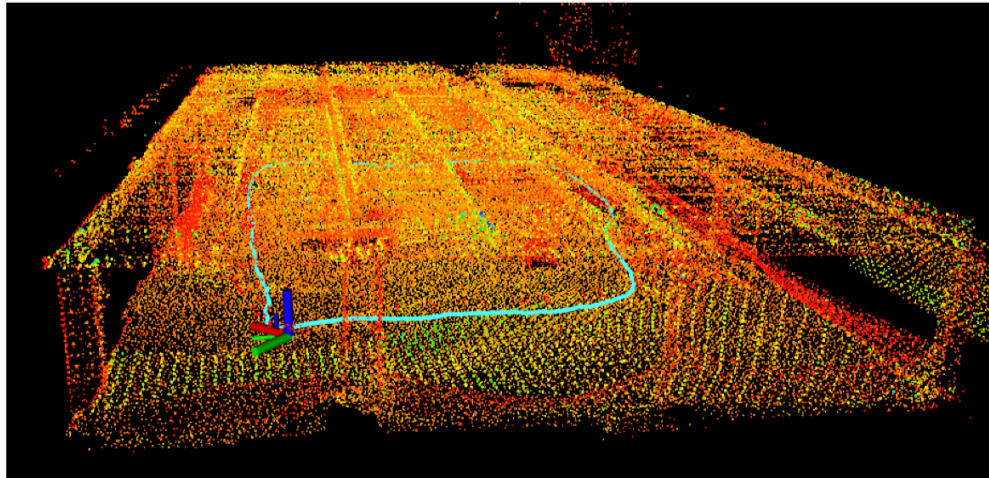
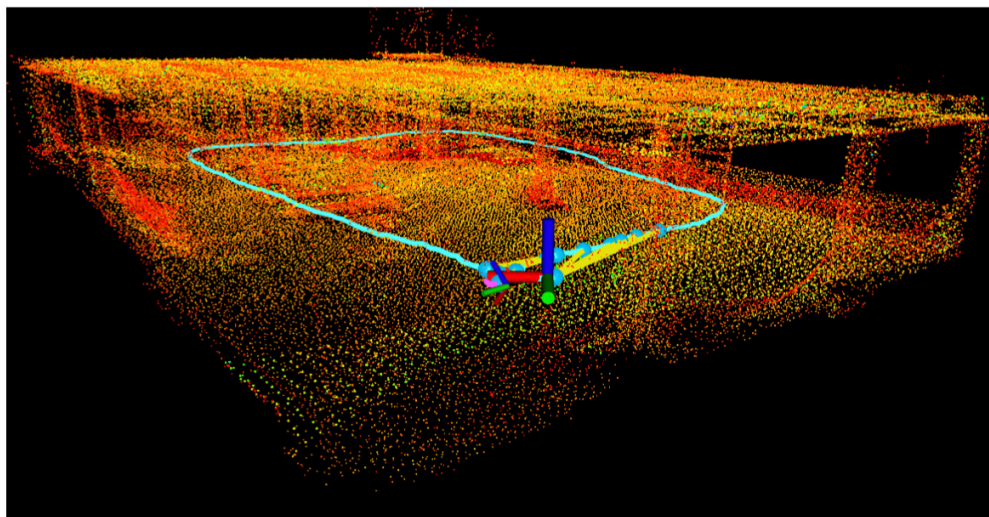


Fig. 8: Trayectoria toma de datos.

Posteriormente, en la Figura 9 se presenta el resultado del algoritmo LIO-SAM para la configuración 45°-45°, obtenida usando la computadora Acer Swift. Además, es relevante destacar que para todas las combinaciones de IMU-LIDAR, se aplicaron los mismos parámetros en el algoritmo para asegurar la uniformidad y compatibilidad de los resultados obtenidos. En esta visualización, se muestra la ejecución del algoritmo tanto con el factor de lazo cerrado desactivado como activado.



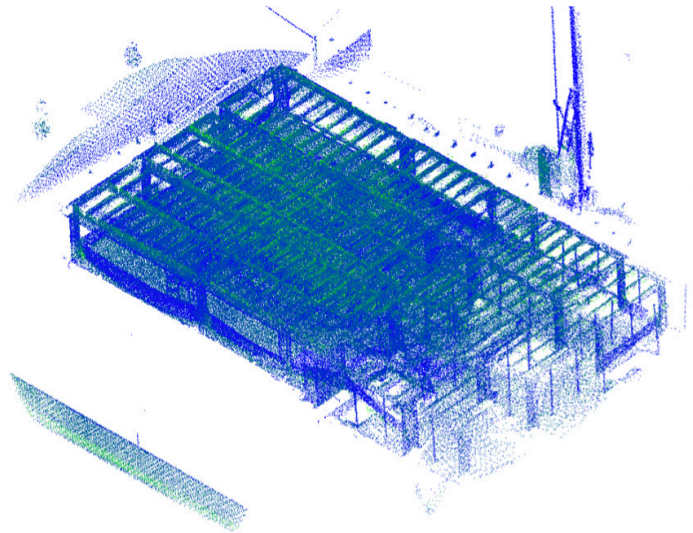
Lazo cerrado desactivado.



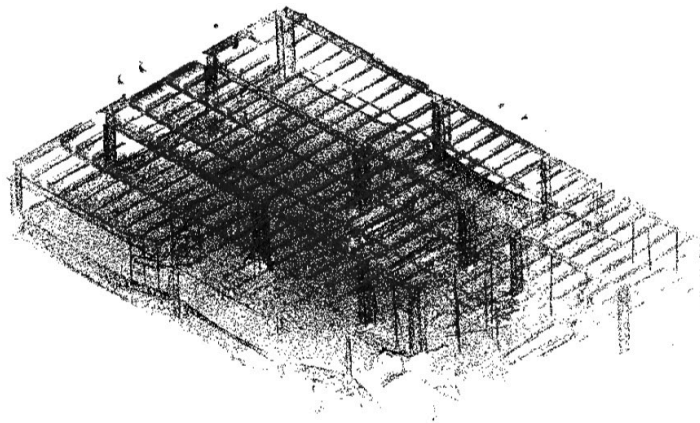
Lazo cerrado activado.

Fig. 9: Nubes de puntos LIO-SAM.

En la Figura 10 se encuentra la nube de puntos original, es decir, el resultado obtenido por LIO-SAM y la nube de puntos después del postprocesamiento.



Nube de puntos original.



Nube de puntos filtrada.

Fig. 10: Nubes de puntos filtradas.

Con el fin de comparar las nubes de puntos, se empleó el software Revit enfocado en diseño arquitectónico y se realizó una sobreposición de las nubes de puntos obtenidas con los planos del hospital como se muestra en la Figura 11, donde las columnas están marcadas por rectángulos amarillos y alrededor de algunas columnas como lo son la 2B, 3B, 2C y 3C se puede apreciar en negro la nube de puntos obtenida. Esta sobreposición del plano y la nube de puntos

permiten no solo realizar una comparación visual, sino también medir directamente distancias en la nube de puntos.

Adicionalmente, se utilizó un medidor láser de 20m (modelo P20M-3LI) para determinar distancias entre las columnas 1A-1B y 1B-B para comparar los resultados obtenidos de la nube de puntos con el plano y las medidas reales.

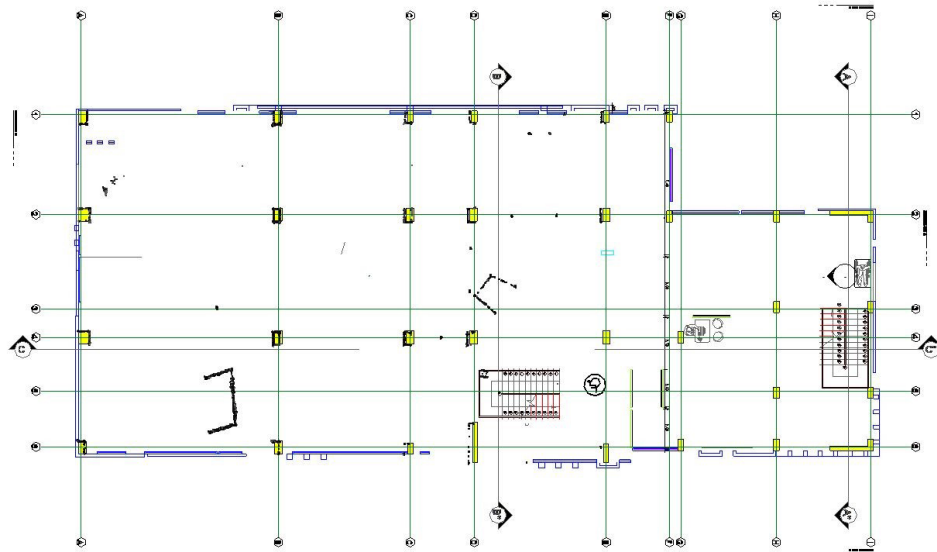


Fig. 11: Sobreposición de la nube de puntos sobre el plano general en Revit

El resultado de la sobreposición de la nube de puntos con el plano se puede apreciar en la Tabla III, donde se encuentra el resultado de las tres configuraciones posibles del LIDAR e IMU, cada una con la variación de lazo cerrado y abierto que se configura en LIO-SAM. La Tabla 3 permite visualizar en todos los casos las cuatro columnas (1A, 1B, 2A y 2B), las cuales se encuentran en color amarillo.

#	Lazo	Revit
0°- 0°	Abierto	
	Cerrado	
0°- 45°	Abierto	
	Cerrado	
45°- 45°	Abierto	
	Cerrado	

Tabla 3: Sobreposición de la nube de puntos sobre el plano en Revit

Como resultado de las mediciones realizadas sobre las nubes de puntos, se obtienen las tablas 4 y 5, que contienen las medidas realizadas para el caso de lazo abierto y lazo cerrado respectivamente, donde se observa que para el caso 0°-45° no tiene datos en la mayoría de mediciones debido a que la nube de puntos no tiene suficiente puntos para realizar una medición.

		Plano	Lazo abierto		
			0°- 0°	0°- 45°	45°- 45°
2A y 2B (m)		9,800	9,794	9,767	9,757
1A y 2A (m)		4,448	4,437	4,481	4,462
1A y 1E (m)		27,450	27,400	NA	27,294
2B	largo (m)	0,70	0,728	NA	0,681
	ancho (m)	0,40	0,382	NA	0,336
4B	largo (m)	0,70	0,697	NA	0,661
	ancho (m)	0,40	0,393	NA	0,344

Tabla 4: Medidas obtenidas de la nube de puntos resultante del lazo abierto. Ancho y largo de las columnas 2B y 4B. Distancia entre columnas 2A y 2B; 1A y 2A; 1A y 1E.

		Plano	Lazo cerrado		
			0°- 0°	0°- 45°	45°- 45°
2A y 2B (m)		9,800	9,707	9,756	9,719
1A y 2A (m)		4,448	4,440	4,9	4,394
1A y 1E (m)		27,450	27,326	NA	27,272
2B	largo (m)	0,70	0,710	NA	0,501
	ancho (m)	0,40	0,418	NA	0,327
4B	largo (m)	0,70	0,695	NA	0,572
	ancho (m)	0,40	0,423	NA	0,386

Tabla 5: Medidas obtenidas de la nube de puntos resultante del lazo cerrado. Ancho y largo de las columnas 2B y 4B. Distancia entre columnas 2A y 2B; 1A y 2A; 1A y 1E.

A. Análisis de resultados.

En cuanto a la ejecución de LIO-SAM, se observó un desempeño satisfactorio mediante la visualización en RVIZ en las configuraciones de 0°- 0°y 45°- 45°. En

estas configuraciones, el algoritmo demostró estabilidad a lo largo del recorrido sin presentar inconvenientes notorios.

Sin embargo, al analizar la configuración 0°- 45°, se identificó una tendencia a la erraticidad en la trayectoria al tomar curvas, resultando en la pérdida de referencias de las nubes de puntos. Este comportamiento irregular generó un nivel de error superior en comparación con las otras configuraciones evaluadas. Es crucial destacar estos hallazgos, ya que podrían señalar posibles áreas de mejora en la implementación del algoritmo o la necesidad de ajustes para adaptarse a variaciones en la orientación del sensor. Además, es fundamental tener en cuenta que estos problemas podrían estar relacionados con las características específicas del prototipo utilizado en el experimento; factores como la velocidad de movimiento y la estabilidad general de la plataforma podrían haber influido en los resultados obtenidos.

Adicionalmente, se exploró la influencia directa de la activación del factor de lazo cerrado en la visualización en RVIZ. La Figura 9 ilustra claramente cómo al activar el lazo cerrado, se establece una conexión evidente con las características observadas inicialmente. Esto sugiere que el sistema reconoce efectivamente cuando vuelve a la posición de origen, resaltando la utilidad y eficacia de la retroalimentación proporcionada por el lazo cerrado en el contexto del sistema LIO-SAM. Las tablas 6 y 7 muestran el error porcentual de las medidas tomadas en lazo abierto y lazo cerrado respecto a las medidas del plano.

Error en porcentaje		Lazo abierto		
		0°- 0°	0°- 45°	45°- 45°
2A y 2B (%)		0,06	0,34	0,44
1A y 2A (%)		0,25	0,74	0,31
1A y 1E (%)		0,18	NA	0,57
2B	largo (%)	4,00	NA	2,71
	ancho (%)	4,50	NA	16,00
4B	largo (%)	0,43	NA	5,57
	ancho (%)	1,75	NA	14,00

Tabla 6: Error de las medidas obtenidas de la nube de puntos en lazo abierto respecto al plano.

Error en porcentaje		Lazo cerrado		
		0°- 0°	0°- 45°	45°- 45°
2A y 2B (%)		0,95	0,45	0,83
1A y 2A (%)		0,18	10,16	1,21
1A y 1E (%)		0,45	NA	0,65
2B	largo (%)	1,43	NA	28,43
	ancho (%)	4,50	NA	18,25
4B	largo (%)	0,71	NA	18,29
	ancho (%)	5,75	NA	3,50

Tabla 7: Error de las medidas obtenidas de la nube de puntos en lazo cerrado respecto al plano.

Se observa que a medida que el objeto de interés se aleja del recorrido, el error tiende a aumentar y en general las columnas del grupo D, E y F presentan mayor error para todas las configuraciones. Esta tendencia puede deberse a diversos factores, como la precisión de las mediciones a largas distancias, la dispersión de la señal del LIDAR, o incluso la influencia de posibles obstáculos intermedios.

En cuanto a las configuraciones posibles, la configuración 0°- 0° tiene un mejor desempeño tanto en lazo abierto como cerrado, con errores porcentuales más bajos en todas las mediciones. Esto sugiere que el sistema es más preciso y estable cuando el marco de referencia del LIDAR se encuentra alineado con el marco de referencia global.

El error en la configuración de lazo cerrado se incrementa significativamente en la mayoría de las mediciones cuando se aplica la configuración 45°-45°, con la excepción del ancho de la columna 4B. Por otro lado, en la configuración 0°-0° se observa un aumento en el error en cuatro de las siete medidas realizadas. Esto sugiere que, en general, hay un aumento en el error en el lazo cerrado y la configuración específica podría estar influyendo en estos resultados.

La Tabla 8 muestra una relación respecto a las medidas tomadas en sitio y las medidas tomadas de la nube de puntos, esta muestra que en general los errores se redujeron, por lo cual se puede inferir que las medidas reales difieren en cierta parte de lo esperado del plano. Adicionalmente, no se observa una

medida conclusiva respecto al lazo cerrado y lazo abierto, ya que en algunos casos aumenta y en otros disminuye.

Error	Lazo abierto		
	0°- 0°	0°- 45°	45°- 45°
2A y 2B (%)	0,348	0,072	0,031
1A y 2A (%)	0,068	0,923	0,495
	Cerrado		
	0°- 0°	0°- 45°	45°- 45°
2A y 2B (%)	0,543	0,041	0,420
1A y 2A (%)	0,000	10,360	1,036

Tabla 8: Error de las medidas obtenidas de la nube de puntos respecto a las medidas tomada en sitio.

La Tabla 8 presenta una relación entre las medidas obtenidas en el sitio y las medidas derivadas de la nube de puntos. En términos generales, se observa una reducción en los errores, lo que sugiere que las medidas reales pueden variar en cierta medida con respecto a las expectativas del plano. Sin embargo, la evaluación de la relación entre lazo cerrado y lazo abierto no arroja conclusiones definitivas, ya que se registran casos donde el error aumenta y otros donde disminuye.

En consecuencia, no se aprecia una influencia directa del lazo cerrado ni una diferencia significativa en comparación con el lazo abierto, independientemente de la configuración empleada en relación con los resultados de las medidas. Este hallazgo indica que la variación en el error podría no estar exclusivamente atribuida al factor del lazo, sino que otros elementos como las condiciones específicas de la configuración, podrían estar desempeñando un papel crucial. De esta manera, la influencia del lazo cerrado no puede ser considerada de manera aislada de la configuración utilizada.

Por último, considerando la configuración de 0°-0° en el lazo cerrado como la óptima, se procedió a su implementación en la UP4000 y se compararon las

medidas con aquellas obtenidas mediante el equipo externo. Los resultados de esta comparación se detallan en las Tablas 9 y 10.

Error	Lazo abierto		
	0°- 0°	0°- 45°	45°- 45°
2A y 2B (%)	0,348	0,072	0,031
1A y 2A (%)	0,068	0,923	0,495
	Cerrado		
	0°- 0°	0°- 45°	45°- 45°
2A y 2B (%)	0,543	0,041	0,420
1A y 2A (%)	0,000	10,360	1,036

Tabla 9: Medidas tomadas de la nube de la nube de puntos generada con el Acer y la UP4000

Error		ACER	UP4000
2A y 2B (%)		0,95	0,50
1A y 2A (%)		0,18	0,54
1A y 1E (%)		0,45	0,29
2B	largo (%)	1,43	2,57
	ancho (%)	4,50	2,00
4B	largo (%)	0,71	4,11
	ancho (%)	5,75	1,25

Tabla 10: Comparación del error de las medidas usando el ACER y el UP4000

Por consiguiente, se podría inferir que la ejecución de LIO- SAM en la computadora en placa es factible, ya que se observan variaciones pero no de magnitud significativa que indiquen una incapacidad de ejecución en este entorno.

No obstante, es crucial destacar que, para lograr una generación adecuada de la nube de puntos en la UP4000, fue necesario limitar la ejecución exclusivamente a este proceso en el sistema. La introducción de otros procesos provocaba comportamientos erráticos en LIO-SAM, resultando en la pérdida de referencia de la nube de puntos.

5. CONCLUSIONES

- Se observó un desempeño satisfactorio de LIO-SAM en las configuraciones de 0°-0°y 45°-45°, demostrando estabilidad a lo largo del recorrido y sin inconvenientes notorios. Sin embargo, se identificaron problemas en

la configuración 0°-45°, donde se notó una tendencia a la erraticidad en la trayectoria al tomar curvas, resultando en la pérdida de referencias de las nubes de puntos y un mayor nivel de error.

- La activación del lazo cerrado, aunque mostró una conexión evidente con las características observadas inicialmente, no fue concluyente respecto a las mediciones finales. No se observó una influencia directa o una diferencia significativa en la configuración utilizada, es decir, el aumento o disminución del error no se puede atribuir exclusivamente al tipo de lazo, sin embargo, se puede asumir la ejecución de LIO-SAM en la computadora en placa. Se destacó la necesidad de limitar la ejecución a un único proceso para obtener resultados consistentes en la UP4000. La introducción de otros procesos generaba comportamientos erráticos y pérdida de referencia de la nube de puntos. La configuración 0°-0° se destacó por su mejor desempeño en términos de error, tanto en lazo abierto como cerrado. Sin embargo, se observó que a medida que el objeto de interés se alejaba del recorrido, el error tendía a aumentar. Además, se identificaron limitaciones relacionadas con la precisión de las mediciones a largas distancias y la dispersión de la señal del LIDAR.
- Se tiene previsto llevar a cabo un análisis más exhaustivo mediante recorridos más extensos utilizando una misma configuración. Esta iniciativa tiene como objetivo explorar de manera más profunda la importancia y la influencia del lazo cerrado.
- La ejecución de LIO-SAM es viable para el levantamiento arquitectónico de los elementos principales y cercanos al recorrido, especialmente en configuraciones como la de 0°-0°. A pesar de las variaciones observadas en el error, el desempeño satisfactorio en términos generales, junto con la capacidad del sistema para reconocer y corregir su posición, respalda la posibilidad de obtener un levantamiento preciso en áreas clave.

6. REFERENCIAS

- Khairuddin, S. T., & Haron, H. (2015). Review on simultaneous localization and mapping (SLAM), 85-90. <https://doi.org/10.1109/ICCS-CE.2015.7482163>
- Anderson, M. (2021). What is LiDAR and how can we use it in construction? [Accedido 01-12-2023].
- Autodesk. (2023). Autodesk Revit [Accedido 01-12-2023].

- <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>
- Docker. (2023). Docker Engine overview [Accedido 01-12-2023].
<https://docs.docker.com/engine/>
- Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: Part I.
IEEE Robotics & Automation Magazine, 13 (2), 99-110.
- Gao, X., Zhang, T., Liu, Y., & Yan, Q. (2017). 14 Lectures on Visual SLAM: From Theory to Practice. Publishing House of Electronics Industry.
- Hesai. (2021). Hesai PandarXT32 Brochure [Accedido 01-12-2023].
<https://www.oxts.com/wp-content/uploads/2021/01/Hesai-PandarXT32%5C Brochure.pdf>
- Leonard, J. J., & Durrant-Whyte, H. F. (1991). Mobile robot localization by tracking geometric beacons. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 7, 376-382.
- Shan, T., Englot, B., Meyers, D., Wang, W., Ratti, C., & Rus, D. (2020). Lio-sam: Tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping.
- SHOP, U. (2023). UP Board 4000 Series [Accedido 01-12-2023].
<https://up-shop.org/default/up4000series.html>
- YOUYEETOO. (2023). WHEETLEC IMU [Accedido 01-12-2023].
<https://wiki.youyeetoo.com/en/WHEETLEC/IMU>

SENNNOVA

Industria

