



SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN PARA ROBOTS MÓVILES EN INTERIORES EMPLEANDO LIFI

*OPTICAL INDOOR LOCALIZATION SYSTEM FOR MOBILE ROBOTS
USING LIFI*

SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN PARA ROBOTS MÓVILES EN INTERIORES EMPLEANDO LIFI

OPTICAL INDOOR LOCALIZATION SYSTEM FOR MOBILE ROBOTS USING LIFI

Leonardo Fabián Rentería Bustamante¹,
Alex Fernando Quille Vega²,
Klever Hernán Torres Rodríguez³,
Celia Margarita Mayacela Rojas⁴

¹ Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador, leonardo.renteria@unach.edu

² Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador, afquille.fie@unach.edu.ec

³ Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador, ktorres@unach.edu.ec

⁴ Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador, celia.mayacela@unach.edu.ec

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo y evaluación de un sistema de localización en interiores basado en tecnología LiFi, utilizando una matriz de transmisores LED codificados y un receptor óptico integrado en un robot móvil. Se implementaron tres trayectorias experimentales con diferentes características geométricas de curvas suaves, curvas cerradas y cambios bruscos con el fin de analizar la precisión y estabilidad del sistema en condiciones reales de operación. Los resultados muestran que el método Cell-ID utilizado permite reconstruir la trayectoria recorrida con errores absolutos entre **12.5% y 22.2%**, dependiendo de la complejidad del movimiento. Los mapas de calor obtenidos evidencian una mayor estabilidad de lectura en celdas centrales y un incremento en lecturas ambiguas en zonas de transición luminosa. Los hallazgos confirman que LiFi es una alternativa viable para la localización en interiores, especialmente en entornos donde las tecnologías basadas en radiofrecuencia presentan limitaciones por interferencias o restricciones operativas.

Palabras clave: LiFi, localización en interiores, comunicaciones ópticas, IM, robot móvil, geolocalización, VLC.

ABSTRACT

*This work presents the development and evaluation of an indoor localization system based on LiFi technology, using a matrix of coded LED transmitters and an optical receiver integrated into a mobile robot. Three experimental trajectories with different geometric characteristic of smooth curves, sharp turns, and abrupt direction changes were executed to analyze the system's accuracy and stability under real operating conditions. Results show that the implemented Cell-ID method is capable of reconstructing the robot's path with absolute errors ranging from **12.5% to 22.2%**, depending on trajectory complexity. The generated heat maps reveal higher reading stability in central cells and increased ambiguous detections in illumination transition areas. The findings confirm that LiFi is a viable alternative for indoor positioning, particularly in environments where radio-frequency technologies face limitations due to interference or operational constraints.*

Keywords: LiFi, indoor localization, optical wireless communications, IM, mobile robot, positioning, VLC.

Recibido: Agosto 2025 Aceptado: Diciembre 2025
Received: August 2025 Accepted: December 2025



1. INTRODUCCIÓN

La tecnología LiFi (Light Fidelity), derivada del estándar IEEE 802.15.7, implementa comunicaciones ópticas inalámbricas mediante la modulación de alta frecuencia de fuentes LED, cuyas variaciones de intensidad son indetectables para el ojo humano. La señal óptica es captada por un fotodetector —generalmente un fotodiodo o un sensor LDR— que convierte la irradiancia incidente en una señal eléctrica digitalizable para su decodificación [1]. Este esquema ubica a LiFi dentro del marco de las Optical Wireless Communications (OWC), que abarcan enlaces ópticos no guiados en rangos infrarrojo, visible y ultravioleta, diferenciándose de los sistemas guiados como la fibra óptica [2].

Dentro de las OWC, las Visible Light Communications (VLC) utilizan exclusivamente el espectro visible para establecer enlaces punto a punto, empleando LEDs como emisores y fotodetectores como receptores. Tanto VLC como LiFi comparten mecanismos de modulación y control definidos por IEEE 802.15.7, aunque LiFi extiende estas capacidades hacia redes bidireccionales, movilidad y handover, configurándose como un análogo óptico de WiFi [3].

El uso del espectro visible otorga a LiFi ventajas técnicas significativas: inmunidad a interferencias electromagnéticas, operación en un ancho de banda extremadamente amplio, alta densidad de celdas y mayor seguridad física del canal debido a la contención espacial del haz luminoso [4]. Asimismo, los LEDs presentan una elevada eficiencia energética y permiten la simultaneidad entre iluminación y comunicación. No obstante, el estado emergente de la tecnología conlleva costos elevados y limitaciones de alcance y línea de vista.

La necesidad de sistemas de localización en interiores robustos y precisos se ha incrementado en sectores como salud, logística, manufactura avanzada, navegación robótica, control de accesos y trazabilidad de activos [5]. Las tecnologías basadas en radiofrecuencia como WLAN, Bluetooth o UWB, presentan limitaciones vinculadas a interferencias, vulnerabilidades de seguridad y degradación de desempeño en entornos densos [6]. Desde los primeros experimentos de Haas, que demostraron tasas superiores a 10 Mbps y posteriormente del orden de gigabits por segundo en laboratorio [7], LiFi se ha consolidado como un candidato para aplicaciones de posicionamiento en entornos electromagnéticamente complejos. En escenarios de localización, los transmisores LED

pueden emitir códigos ópticos únicos asociados a celdas espaciales, permitiendo al receptor determinar su posición mediante identificación directa, análisis de escena o detección de proximidad [8].

A pesar del potencial de la tecnología, los sistemas LiFi aún presentan limitaciones, principalmente costos elevados, dependencia de línea de vista y sensibilidad a condiciones de iluminación. Sin embargo, diversos desarrollos internacionales demuestran su madurez creciente. Por ejemplo, el proyecto AAL x AAL, desarrollado por el VDA Group, Solari Spa y la Universidad de Udine, busca integrar LiFi en entornos sanitarios debido a su nula contaminación electromagnética, lo cual resulta crítico en la operación de equipos como los escáneres IMR. Actualmente, esta implementación se encuentra en fase de pruebas en el Oncological Reference Center (CRO) en Aviano, Italia [9].

Asimismo, LiFi ha sido evaluado en aplicaciones de seguridad crítica. En un simulacro de ataque a la red de metro, Verizon, Nokia y Aegex Technologies utilizaron LiFi para mantener comunicaciones bidireccionales seguras con la central de control. En el ámbito militar y de inteligencia, BT Defence desplegó infraestructura LiFi en las instalaciones de Adastral Park, proporcionando conectividad a más de 3.700 empleados bajo estrictos requisitos de seguridad [10]. Por su parte, la empresa PureLiFi, pionera en el sector, desarrolló el sensor LiFi OFE, capaz de alcanzar velocidades del orden de 1 Gbps, aunque aún persiste la limitación fundamental inherente a la tecnología: la comunicación depende de la presencia de luz; sin iluminación, no existe enlace [11].

En paralelo, la creciente demanda de sistemas de localización en interiores para sectores como logística, salud, manufactura inteligente, navegación robótica o monitoreo de ocupación ha evidenciado las limitaciones de tecnologías basadas en RF, afectadas por interferencias, multipath y vulnerabilidades de seguridad [6]. En este contexto, LiFi constituye una alternativa robusta para la localización, permitiendo etiquetar espacialmente áreas mediante transmisores LED que emiten códigos ópticos únicos. El receptor, integrado en un robot móvil, decodifica dichos códigos para inferir su posición dentro del entorno.

Considerando estas propiedades, el presente trabajo investiga el uso de LiFi como sistema de geolocalización en interiores para un dispositivo móvil, implementando un prototipo experimental compuesto por transmisores LED codificados y un



receptor óptico de bajo costo, con el fin de evaluar la viabilidad, precisión y estabilidad del método en un entorno controlado.

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

La localización en interiores es un componente crítico en la navegación autónoma de robots móviles, especialmente en entornos donde las señales de sistemas globales como GPS son inexistentes o altamente degradadas. Tradicionalmente, estas tareas se han sustentado en tecnologías basadas en radiofrecuencia (RF), visión artificial o sensores iniciales; sin embargo, cada una presenta limitaciones asociadas a interferencias electromagnéticas, occlusiones visuales, acumulación de error o falta de precisión absoluta. En este contexto, LiFi se posiciona como una alternativa óptica robusta y de alta granularidad para la estimación de posición en tiempo real.

Para evaluar la viabilidad de la geolocalización en interiores mediante tecnología LiFi, se desarrolló un sistema experimental compuesto por una matriz de transmisores LED codificados y un receptor óptico integrado en un robot móvil. La metodología empleada combina diseño electrónico, modelado del canal óptico, integración de hardware de bajo costo y ejecución de pruebas controladas en un entorno delimitado. En primera instancia se estableció la arquitectura general del sistema, definiendo los componentes electrónicos y la configuración de transmisión óptica; posteriormente se implementó el algoritmo de decodificación en el módulo receptor y se diseñaron trayectorias repetibles para validar la estabilidad de la localización. Finalmente, los datos obtenidos en cada trayectoria fueron analizados mediante herramientas estadísticas y representados mediante mapas de calor para cuantificar la precisión y la repetibilidad del posicionamiento. A continuación, se detallan los materiales empleados y la metodología seguida en cada etapa del proceso experimental.

2.1 Principios de localización basado en LiFi.

El enfoque adoptado en este trabajo se fundamenta en la técnica Cell-ID basada en iluminación codificada [12], donde un transmisor LED emite un identificador único que representa una celda espacial dentro del entorno de navegación. El robot móvil, equipado con un receptor óptico, interpreta

este identificador para determinar su ubicación instantánea dentro del área iluminada, Fig. 1.

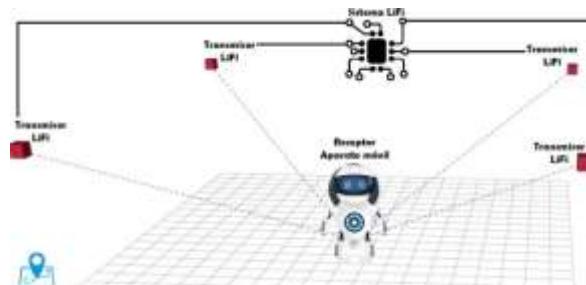


Fig.1: Esquema general del sistema LiFi propuesto.

La localización se basa en los siguientes principios:

- Asociación directa entre el ID recibido y la posición física del transmisor LED.**
La posición (x, y) de cada LED se conoce previamente y se almacena en la memoria del microcontrolador.
- Cobertura de iluminación parcialmente superpuesta.**
Cada celda luminosa define una región de validez espacial donde el receptor puede leer con fiabilidad la trama óptica correspondiente.
- Decodificación de tramas de alta frecuencia.**
El robot identifica las zonas del entorno según el ID óptico detectado y las transiciones entre celdas se interpretan como desplazamiento espacial.
- Independencia de interferencias electromagnéticas.**
El uso del espectro visible elimina los problemas de multipath RF, congestión de bandas y ruido electromagnético típicos de WiFi, Bluetooth o UWB.

2.2 Sistema de transmisión LiFi.

El transmisor óptico tiene forma circular con un diámetro de 4.5 cm e integra 20 diodos LED color blanco, es controlado por un Arduino Pro Mini y se alimenta con una fuente de 5V 200mA, Fig. 2. La modulación utilizada para la transmisión de información se basó en IM (Intensity Modulation) mediante PWM (Pulse Width Modulation), codificando los datos en la intensidad de luz [13].



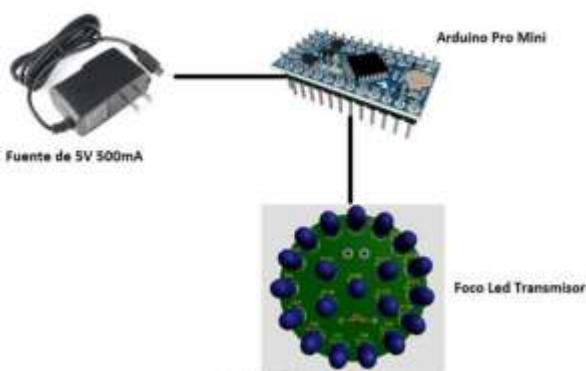


Fig.2: Arquitectura básica de transmisor LiFi.

En total, se utilizaron 16 transmisores LED de alta luminosidad configurados en una matriz 4×4 dispuesta en un plano superior a una altura constante, Fig. 3; cada celda se codificó según su posición, utilizando 8 bits por transmisor: 3 bits de sincronismo y 5 bits de información (Tabla 1).

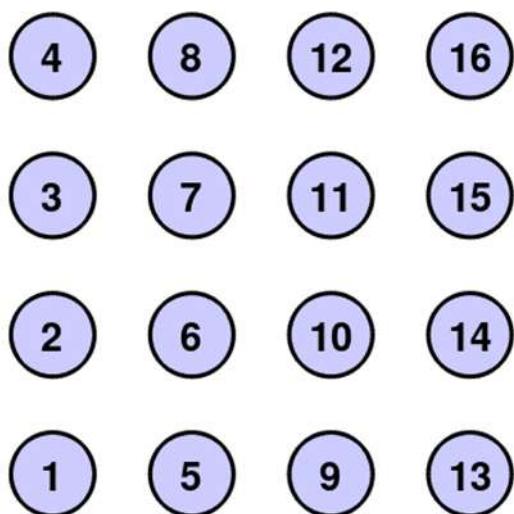


Fig.3: Matriz de transmisores Led.

Tabla 1. Codificación de la posición de los transmisores LiFi

Posición	Bits de sincronismo	Bits de información
1	110	00001
2	110	00010
3	110	00011
4	110	00100
5	110	00101
6	110	00110
7	110	00111
8	110	01000
9	110	01001
10	110	01010
11	110	01011
12	110	01100
13	110	01101
14	110	01110
15	110	01111
16	110	10000

6	110	00110
7	110	00111
8	110	01000
9	110	01001
10	110	01010
11	110	01011
12	110	01100
13	110	01101
14	110	01110
15	110	01111
16	110	10000

Los bits de sincronismo se transmitieron en 18 ms, mientras que los 5 bits de información se transmitieron en 75 ms, de manera que cada transmisor completaba la emisión de su información codificada en 93 ms, Fig. 4.

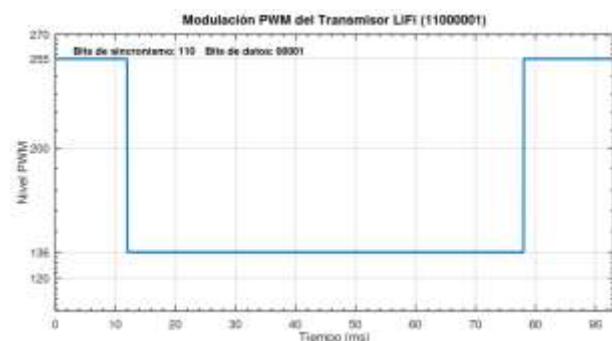


Fig.4: Modulación PWM del transmisor LiFi para la celda 1 (11000001).

Para asegurar uniformidad de emisión y estabilidad fotométrica, cada transmisor fue alimentado mediante un driver regulado con protección contra fluctuaciones de corriente.

2.3 Sistema de recepción LiFi.

El sistema de recepción fue diseñado para detectar la modulación óptica emitida por los transmisores LED y convertirla en información digital interpretable. El receptor está compuesto por dos elementos principales: un sensor LDR (Light Dependent Resistor) como fotodetector y un módulo ESP32 como unidad de procesamiento, adquisición y decodificación.

El sensor LDR opera como un convertidor óptico-eléctrico pasivo, cuya resistencia disminuye en función de la intensidad lumínosa recibida. Dado que la modulación empleada en el sistema LiFi se basa



en variaciones de intensidad PWM, el LDR permite obtener una señal eléctrica proporcional a dichos niveles luminosos. Esta señal es leída por el conversor ADC (Analog-to-Digital Converter) del ESP32, el cual muestrea el valor instantáneo y lo transforma en valores digitales entre 0 y 4095 (resolución de 12 bits).

Para la decodificación, se estableció un umbral dinámico de intensidad que permite distinguir los dos niveles lógicos utilizados por el transmisor:

- Un valor digital alto asociado al PWM = 255
→ interpreta bit "1"
- Un valor digital bajo asociado al PWM = 136
→ interpreta bit "0"

El algoritmo implementado en el ESP32 realiza la lectura continua del ADC y reconstruye la trama de 8 bits (3 de sincronismo + 5 de datos). Primero, el sistema identifica la secuencia de sincronismo "110", la cual permite validar la recepción y ubicar el inicio de la trama. Una vez sincronizado, los siguientes 5 bits son decodificados secuencialmente y convertidos al número de identificación de la celda LiFi, lo que corresponde a la posición física específica del robot dentro del escenario.

El ESP32 incorpora además un servidor web embebido, mediante el cual se visualizan en tiempo real:

- los valores digitales recibidos por el ADC,
- la secuencia binaria decodificada,
- y la celda LiFi correspondiente a la posición detectada.

El módulo receptor fue integrado físicamente en un robot móvil seguidor de línea, ubicado en su parte superior para mantener una línea de visión estable hacia los transmisores LED (Fig. 5). De este modo, el robot puede avanzar siguiendo la trayectoria marcada en el suelo mientras el sistema LiFi determina su posición en cada instante, generando un historial de localización para su posterior análisis.

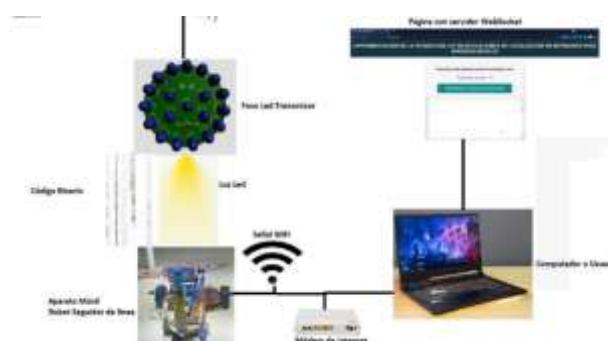


Fig.5: Diagrama de bloques básico del sistema de recepción LiFi.

Para validar el desempeño del sistema de geolocalización LiFi y evaluar su precisión en condiciones reales de operación, se construyó un escenario experimental que permitiera ejecutar múltiples trayectorias repetibles utilizando un robot móvil seguidor de línea. Este escenario consistió en una maqueta física con dimensiones de 122 cm × 122 cm y una altura de 38 cm, sobre la cual se instaló una matriz de 16 transmisores LED distribuidos en una configuración de 4×4, Fig 6.



Fig.6: Escenario de pruebas.

El piso del escenario se preparó con trayectorias pintadas en color negro sobre una superficie blanca, diseñadas para ser detectadas por el sensor infrarrojo del robot seguidor de línea. Cada trayectoria representó un escenario distinto de navegación, incluyendo desplazamientos rectilíneos y giros suaves (Fig. 7), curvas cerradas (Fig. 8), y trayectorias con cambios abruptos de dirección (Fig. 9).

Estas variaciones permitieron evaluar el comportamiento del sistema LiFi ante movimientos dinámicos y diferentes ángulos de recepción respecto a las fuentes luminosas.

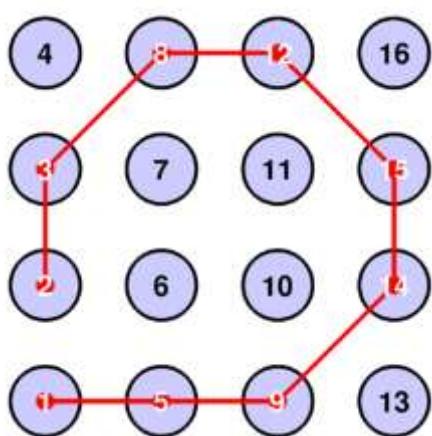


Fig.7: Trayectoria con curvas suaves.

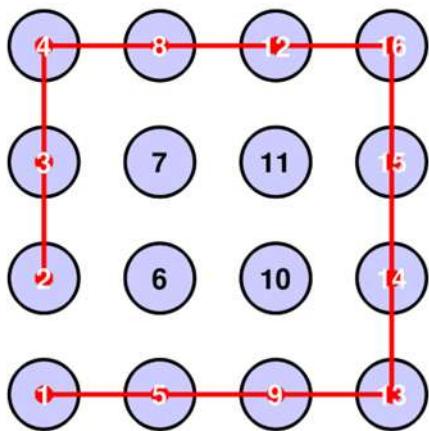


Fig.8: Trayectoria con curvas cerradas.

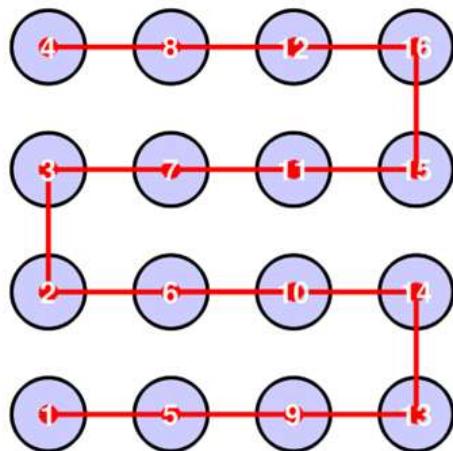


Fig.9: Trayectoria con cambios abruptos de dirección.

Durante las pruebas, el robot recorría cada trayectoria siguiendo la línea negra en el piso, mientras el módulo de recepción (LDR + ESP32) decodificaba continuamente la información óptica emitida por el transmisor correspondiente a la celda dentro de la cual se encontraba. De esta manera, el sistema registró en tiempo real un historial completo de posiciones a medida que el robot avanzaba a lo largo del recorrido.

Cada trayectoria fue repetida un número significativo de veces para analizar la repetibilidad, estabilidad y dispersión espacial de las posiciones detectadas. Estos datos permitieron posteriormente generar mapas de calor que representan la frecuencia de detección en cada celda de la cuadrícula LiFi, facilitando la evaluación cuantitativa del sistema y permitiendo identificar zonas con mayor precisión y áreas donde el receptor experimentó pérdidas de señal o decodificación errónea.

Este enfoque experimental permitió validar la funcionalidad del sistema LiFi en un entorno controlado, modelando condiciones reales de navegación de robots móviles en interiores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la evaluación del prototipo de localización de robots móviles mediante LiFi, se registraron las trayectorias recorridas por el robot dentro de la matriz de 16 transmisores (4×4), considerando las tres trayectorias de ejemplo planificadas. Los resultados se presentan en términos error, mapas de calor y secuencias de pasos, permitiendo una comparación visual entre la trayectoria planificada y la trayectoria real registrada.

Para cuantificar la diferencia entre la trayectoria planificada y la trayectoria real, se utilizó la distancia euclídea media por paso, error promedio (EP), definida como:

$$EP$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i^{plan} - x_i^{real})^2 + (y_i^{plan} - y_i^{real})^2} \quad (1)$$

Donde N es el número de pasos de la trayectoria, (x_i^{plan}, y_i^{plan}) son las coordenadas de la celda planificada en el paso i , y (x_i^{real}, y_i^{real}) son las coordenadas de la celda real registrada en el mismo paso.

Este indicador permite cuantificar de manera objetiva cuán cercana es la trayectoria real a la planificada.



A continuación, se presentan los resultados individuales para cada trayectoria.

3.1 Trayectoria 1: Curvas suaves.

La trayectoria planificada conectaba progresivamente las celdas [1,5,9,14,15,12,8,3,2]. La trayectoria real registró un intercambio entre las celdas 12 y 15, generando la secuencia [1,5,9,14,12,15,8,3,2], esta se determinó en base las frecuencias mostradas en la Tabla 2. Este desvío originó un error absoluto del 22.2%, correspondiente a dos discrepancias en nueve pasos.

Tabla 2. Repeticiones por celda – Trayectoria 1.

Celda	Repeticiones por celda
1	5
2	1
3	2
4	1
5	1
6	0
7	1
8	3
9	2
10	2
11	0
12	1
13	2
14	1
15	0
16	1

La Fig. 10 muestra la comparación entre la trayectoria planificada (azul) y la real (rojo) junto con el mapa de calor. Se observa que los errores se localizan en las transiciones centrales, lo cual sugiere que las zonas donde convergen varias celdas presentan mayor probabilidad de lecturas ambiguas debido a la superposición luminosa parcial. Así mismo, el mapa de calor mostró una mayor concentración de detecciones en la región central del escenario, consistente con la mayor estabilidad del receptor en zonas con iluminación homogénea.

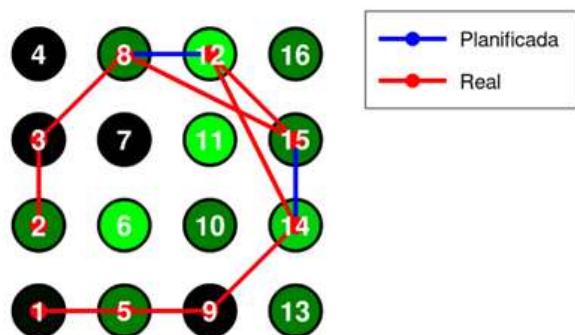


Fig. 10: Mapa de calor de trayectoria con curvas suaves.

3.2 Trayectoria 2: Curvas cerradas.

La trayectoria planificada seguía un recorrido cerrado compuesto por las celdas [1,5,9,13,14,15,16,12,8,4,3,2]. En la trayectoria real se observó un intercambio entre las celdas 3 y 4, lo cual generó la secuencia [1,5,9,13,14,15,16,12,8,3,4,2], establecida utilizando los valores de frecuencia presentados en la Tabla 3. Este intercambio produjo un error absoluto del 16.7%, correspondiente a dos discrepancias en doce pasos.

Tabla 3. Repeticiones por celda – Trayectoria 2.

Celda	Repeticiones por celda
1	4
2	1
3	1
4	2
5	2
6	1
7	1
8	3
9	2
10	2
11	0
12	1
13	2
14	1
15	1
16	2



La Fig. 11 muestra la comparación entre la trayectoria planificada y la real. En este caso, los errores se concentran en la parte final del recorrido, donde el robot ejecuta las curvas cerradas. Esto coincide con lo observado en el mapa de calor, donde se aprecia una dispersión más amplia en la zona central y en las columnas laterales, lo cual indica que los cambios bruscos en la orientación del sensor ocasionan variaciones en el ángulo de incidencia, reduciendo la estabilidad luminosa recibida por el LDR. Pese a ello, la mayor parte del recorrido se mantuvo estable gracias a la alineación geométrica entre celdas contiguas.

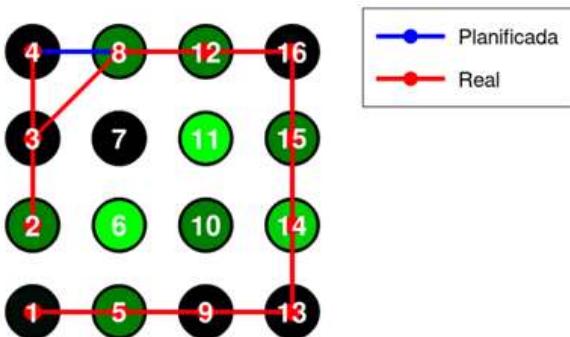


Fig. 11: Mapa de calor de trayectoria con curvas cerradas.

3.3 Trayectoria 3: Trayectoria con cambios abruptos de dirección.

La trayectoria planificada consideraba múltiples giros abruptos, siguiendo la secuencia [1,5,9,13,14,10,6,2,3,7,11,15,16,12,8,4]. La trayectoria real presentó un intercambio entre las celdas 2 y 3, generando la secuencia [1,5,9,13,14,10,6,3,2,7,11,15,16,12,8,4], determinada en base a las frecuencias mostradas en la Tabla 4. Este desvío produjo un error absoluto del 12.5%, el más bajo entre las tres trayectorias evaluadas.

Tabla 4. Repeticiones por celda – Trayectoria 3.

Celda	Repeticiones por celda
1	5

2	2
3	2
4	3
5	1
6	0
7	2
8	3
9	2
10	3
11	0
12	2
13	1
14	1
15	1
16	2

La Fig. 12 evidencia que, a pesar de los cambios bruscos de dirección, la trayectoria real se mantuvo cercana a la planificada. La menor superposición entre celdas no adyacentes redujo la ambigüedad luminosa, lo cual explica el error reducido. El mapa de calor mostró concentraciones definidas en zonas específicas, con menor dispersión que en las trayectorias anteriores, lo que indica una recepción más estable incluso en presencia de cambios rápidos en la dirección de movimiento.

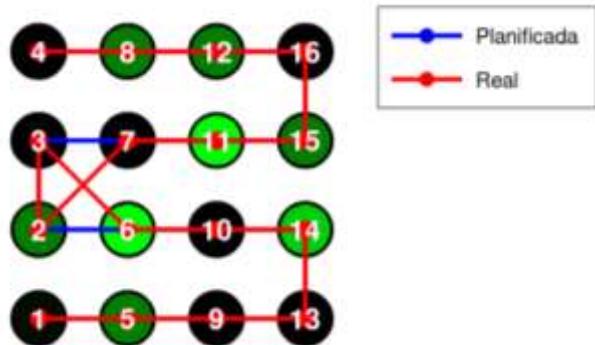


Fig. 12: Mapa de calor de trayectoria cambios abruptos de dirección.

En general, al analizar en conjunto los resultados de las tres trayectorias, se observa que el desempeño del sistema LiFi depende directamente de:

a. La geometría de la trayectoria.

Las trayectorias con curvas suaves (Trayectoria 1) y curvas cerradas (Trayectoria 2) generaron mayor error debido a que el robot permanecía más tiempo



en zonas donde dos o más celdas iluminan simultáneamente.

En cambio, la trayectoria con saltos bruscos (Trayectoria 3) redujo la superposición de patrones luminosos, facilitando la decodificación.

b. La variación del ángulo de incidencia sobre el LDR

Los errores coincidieron con los momentos en que el robot modificaba su orientación respecto a los transmisores.

La sensibilidad angular del LDR afecta la lectura del PWM, en especial cuando el nivel de iluminación entre celdas es similar.

c. La distribución espacial de los transmisores

Las zonas centrales del escenario muestran mayor densidad en el mapa de calor, indicando que la iluminación homogénea favorece la decodificación. Las zonas limítrofes presentan menor repetición debido a que la potencia lumínosa decae con la distancia.

En síntesis, el sistema LiFi de localización demostró un desempeño consistente y replicable, con errores absolutos entre 12.5% y 22.2% según la geometría del recorrido. Los resultados concuerdan con limitaciones ya reportadas en sistemas LiFi basados en Cell-ID: superposición lumínosa, sensibilidad angular y dependencia de línea de vista. No obstante, la estabilidad del sistema en trayectorias de mayor complejidad geométrica evidencia su viabilidad como alternativa de bajo costo para la localización de robots móviles en entornos interiores.

4. CONCLUSIÓN

El desarrollo del sistema de localización en interiores basado en LiFi demostró que es posible estimar la posición de un robot móvil mediante iluminación codificada utilizando hardware de bajo costo. Las pruebas realizadas sobre tres trayectorias evidenciaron que el sistema reconstruye las secuencias de movimiento con errores absolutos entre 12.5% y 22.2%, valores aceptables considerando el uso de un fotodetector simple (LDR) y un esquema de identificación tipo Cell-ID.

Los mapas de calor mostraron que las celdas centrales presentan mayor estabilidad y frecuencia de detección, mientras que los bordes y zonas de transición fueron las regiones con más errores. Esto confirma que la superposición parcial de iluminación

entre celdas afecta la precisión y que la geometría de la trayectoria influye directamente en el desempeño: las curvas suaves y cerradas incrementaron la ambigüedad lumínosa, mientras que los cambios bruscos favorecieron una lectura más clara.

En conjunto, los resultados indican que LiFi es una alternativa viable para aplicaciones de localización en interiores donde las tecnologías de radiofrecuencia pueden ser ineficientes o no permitidas. Si bien la dependencia de la línea de vista y la sensibilidad angular siguen siendo limitantes, el sistema mostró estabilidad y repetibilidad suficientes para escenarios controlados. Como mejora futura se sugiere emplear fotodetectores más rápidos, filtros ópticos y algoritmos de fusión sensorial que permitan aumentar la precisión espacial del método.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Haas and C. Chen, "What is LiFi?," European Conference on Optical Communication, vol. 2015-November, Nov. 2015, doi: 10.1109/ECOC.2015.7341879.
- [2] A. Krishnamoorthy et al., "Optical wireless communications: enabling the next generation network of networks," ieeexplore.ieee.org, Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10974735/>
- [3] S. Jindal et al., "Tbps wide-field parallel optical wireless communications based on a metasurface beam splitter," nature.com, vol. 146, no. 37, pp. 25536–25543, Sep. 2024, doi: 10.1021/jacs.4c05812.
- [4] S. Ma et al., "Feasibility Conditions for Mobile LiFi," IEEE Trans Wirel Commun, vol. 23, no. 7, pp. 7911–7923, 2024, doi: 10.1109/TWC.2023.3346056.
- [5] T. Aziz and I. Koo, "A Comprehensive Review of Indoor Localization Techniques and Applications in Various Sectors," Applied Sciences 2025, Vol. 15, Page 1544, vol. 15, no. 3, p. 1544, Feb. 2025, doi: 10.3390/APP15031544.
- [6] I. Ullah, D. Adhikari, H. Khan, M. S. Anwar, S. Ahmad, and X. Bai, "Mobile robot localization: Current challenges and future prospective," Comput Sci Rev, vol. 53, p. 100651, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.COSREV.2024.100651.
- [7] C. Chen et al., "100 Gbps Indoor Access and 4.8 Gbps Outdoor Point-to-Point LiFi Transmission Systems Using Laser-Based Light Sources," Journal



- of Lightwave Technology, vol. 42, no. 12, pp. 4146–4157, 2024, doi: 10.1109/JLT.2024.3400192.
- [8] H. Cui, S. C. Liew, and H. Chen, “Wi-LiFi: Integrated Optical Wi-Fi for Enhanced Mobile Robotic Communications and Localization,” IEEE Trans Veh Technol, vol. 74, no. 4, pp. 6209–6221, 2025, doi: 10.1109/TVT.2024.3516755.
- [9] M. Sharma, S. Sharma, and O. P. Jindal, “Engineering Management in Production and Services Light Fidelity (Li-Fi) overview and investigation into connection speed,” vol. 13, doi: 10.2478/emj-2021-0005.
- [10] J. M. Gnanasekar and T. Veeramakali, “Light Fidelity (Li-Fi) technology: The future man-machine-machine interaction medium,” Human Communication Technology: Internet-of-Robotic-Things and Ubiquitous Computing, pp. 91–112, Nov. 2021, doi: 10.1002/9781119752165.CH4;JOURNAL:JOURNA
L:BOOKS;WGROU
P:STRING:PUBLICATION.
- [11] V. Georlette, V. M.-2023 23rd I. Conference, and undefined 2023, “Li-Fi and Visible Light Communication for Smart Cities and Industry 4.0: challenges, research & market status in 2023,” ieeexplore.ieee.org, Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10207438/>
- [12] D. W. Dawoud, H. Mukhtar, A. Copiaco, W. Mansoor, and S. Atalla, “Advancing Passenger Experience and Reliability of Autonomous Buses through LiFi Technology,” SAE Technical Papers, Dec. 2023, doi: 10.4271/2023-01-1904.
- [13] M. S. Islim and H. Haas, “Modulation Techniques for Li-Fi,” ZTE Communications, Apr. 2016, Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.research.ed.ac.uk/en/publications/modulation-techniques-for-li-fi/>

