



Máster Universitario de Investigación en Ingeniería de Software
y Sistemas Informáticos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática

Código: 31105151

Análisis experimental de la tecnología de comunicación por luz visible (VLC) basado en sensores de imagen (OCC) para sistemas IoT

Alumno: Jose Ignacio Zaballos

Tutor: Ismael Abad Cardiel

Curso académico: 2025-2026

Convocatoria: Junio 2026



Máster Universitario de Investigación en Ingeniería de Software
y Sistemas Informáticos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática

Código: 31105151

Análisis experimental de la tecnología de comunicación por luz visible (VLC) basado en sensores de imagen (OCC) para sistemas IoT

Alumno: Jose Ignacio Zaballos

Tutor: Ismael Abad Cardiel

Resumen

El despliegue masivo de IoT satura el espectro de radiofrecuencia en entornos críticos. Como alternativa, las comunicaciones ópticas por cámara (OCC) ofrecen enlaces seguros y libres de licencias usando luces LED y cámaras comerciales (CMOS). Este Trabajo de Fin de Máster diseña y valida una arquitectura de telemetría IoT de bajo coste basada en OCC. El sistema capta la temperatura con un sensor LM35 y un NodeMCU la transmite mediante un LED de 5 mm, modulando una trama de 28 bits en *on-off keying* (OOK).

El nodo receptor, compuesto por una Raspberry Pi 5 y un sensor OV5647, emula un *global shutter* con exposiciones de $100\ \mu s$ para superar las limitaciones de muestreo. El procesamiento digital (DSP) extrae la señal modelando el canal con mezclas gaussianas (GMM) para aplicar umbrales adaptativos y usa correlación cruzada para la sincronización. Finalmente, la capa de aplicación gestiona los datos mediante una API *RESTful* en Spring Boot y los almacena en InfluxDB.

Los ensayos estáticos a 60 cm demostraron una inmunidad excepcional al ruido, logrando una SNR superior a 34 dB y una tasa de error de bit (BER) nula en diversos escenarios lumínicos. Con una latencia total de extremo a extremo de 568.9 ms, esta investigación demuestra la viabilidad de desplegar redes de sensores OCC fiables utilizando exclusivamente hardware de consumo no especializado.

Palabras clave: Comunicaciones Ópticas por Cámara, Internet de las Cosas, Obturador Global, Procesamiento Digital de Señales, API REST, Modulación OOK, Telemetría, Sensor de Imagen CMOS.

Abstract

The massive deployment of IoT devices saturates the radio frequency spectrum in critical environments. As an alternative, Optical Camera Communications (OCC) offer secure, license-free links using conventional LED lights and commercial cameras (CMOS). This Master's Thesis designs and experimentally validates a low-cost IoT telemetry architecture based entirely on OCC. The system captures ambient temperature with an LM35 sensor, and a NodeMCU transmits it via a 5 mm LED, modulating a robust 28-bit frame using On-Off Keying (OOK).

The receiver node, comprising a Raspberry Pi 5 and an OV5647 sensor, emulates a Global Shutter paradigm with 100 μs exposures to overcome sampling limitations. Digital signal processing (DSP) extracts the signal by modeling the channel with Gaussian Mixture Models (GMM) to apply adaptive thresholds and uses cross-correlation for synchronization. Finally, the application layer manages the data through a RESTful API in Spring Boot and persists it in InfluxDB.

Static link tests at 60 cm demonstrated exceptional immunity to noise, achieving an SNR above 34 dB and a zero bit error rate (BER) across various lighting scenarios. With a total end-to-end latency of 568.9 ms, this research proves the feasibility of deploying reliable OCC sensor networks using exclusively non-specialized consumer hardware.

Keywords: Optical Camera Communications, Internet of Things, Global Shutter, Digital Signal Processing, REST API, On-Off Keying (OOK), Telemetry, CMOS Image Sensor.

Dedicatoria

*A mi mujer, por tu amor, tu paciencia y por estar
siempre a mi lado.*

*A mis padres y a mi hermana, por el apoyo
incondicional de siempre y por ser la base de cada
uno de mis proyectos.*

Agradecimientos

Mi agradecimiento sincero a Vicente Matus Icaza, José Rabadán Borges y Rafael Pérez Jiménez, del Instituto Universitario para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IdeTIC), por la calidez con la que me acogieron desde el primer día y por su valiosa ayuda para dar forma y sacar adelante la propuesta de este TFM. Trabajar bajo su tutela ha sido un verdadero privilegio.

Hago extensivo este agradecimiento al IdeTIC, así como a su Director (Suni), por haberme presentado a José Rabadán y a Rafael Pérez y facilitarme el acceso a los recursos del instituto.

A Ismael Abad Cardiel, por convertirse en el mejor guía posible en este periplo de dos años. Gracias por tu paciencia, por estar siempre ahí al frente en cada tutoría y por el excelente asesoramiento que me has brindado en cada etapa del máster.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	3
1.2. Contexto	4
1.3. Planteamiento del problema	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo primario: validación del sistema OCC	7
1.4.2. Objetivo secundario: desarrollo del flujo DSP	9
1.4.3. Objetivo terciario: capa de abstracción de la persistencia de datos	9
1.5. Estructura del documento	10
2. Estado del arte	12
2.1. Sistemas comunicación por luz visible (VLC) convencionales (fo- todiodo) frente a sistemas basados en cámara (comunicaciones ópticas por cámara (OCC))	13
2.1.1. Fundamentos y evolución	13

2.1.2. El fotodiodo frente al sensor de imagen	14
2.2. OCC en redes de sensores	16
2.2.1. Revisión de estudios previos: telemetría e identificación en entornos inteligentes e industriales	16
2.2.2. Análisis comparativo de objetivos de diseño y restricciones operativas	18
2.3. Técnicas existentes de procesamiento digital de señales y decodificación	24
2.3.1. Selección de la región de interés (ROI) y localización de la fuente	25
2.3.2. Procesamiento en escala de grises y generación de vectores	26
2.3.3. Umbralización adaptativa en entornos dinámicos	26
2.3.4. Decodificación temporal y efecto <i>rolling shutter</i>	27
2.4. Tecnologías emergentes	29
2.4.1. Mitigación de interferencias por luz ambiental	30
2.4.2. Demodulación basada en <i>deep learning</i>	30
2.4.3. Superación de los límites del <i>frame rate</i>	31
2.4.4. Demodulación por color	31
2.4.5. Integración en redes 6G y sensing	32
3. Marco teórico	34
3.1. El canal físico	35

3.2. Técnicas de adquisición de sensores de imagen (RS vs. GS)	37
3.2.1. Patrones espaciales frente a muestreo temporal	37
3.2.2. Justificación de <i>global shutter</i> en dispositivos IoT de bajo consumo	38
3.2.3. Limitaciones de sub-muestreo y el criterio de Nyquist	39
3.3. Fundamentos del procesamiento digital de imágenes	40
3.3.1. Conversión a escala de grises	40
3.3.2. Umbralización (Thresholding)	41
3.3.3. Extracción de la región de interés (ROI)	41
3.4. Protocolos de enlace de datos y lógica de decodificación	43
3.4.1. Estructura de la trama y campos de control	43
3.4.2. Sincronización de símbolos y recuperación de límites de bit	46
3.5. Servicio web y API	47
3.5.1. Arquitectura RESTful	47
3.5.2. Protocolo de comunicación HTTP	47
3.5.3. Serialización de datos con JSON	48
3.5.4. Motivación del diseño para visualización en tiempo real . .	48
4. Metodología	50
4.1. Arquitectura del sistema	51
4.2. Etapas del sistema	53

4.2.1. Primera etapa: captación de la magnitud física	53
4.2.2. Segunda etapa: Transmisor	55
4.2.3. Tercera etapa: Receptor	63
4.2.4. Cuarta etapa: capa de aplicación	77
4.3. Diseño de la capa de enlace de datos	83
4.3.1. Preámbulo	84
4.3.2. Delimitador de inicio de trama (SFD)	84
4.3.3. Identificador	85
4.3.4. Carga útil (<i>Payload</i>)	85
4.3.5. Comprobación de trama	86
5. Análisis de resultados y discusión	87
5.1. Entorno y configuración experimental	87
5.1.1. Escenario físico y condiciones de iluminación ambiental . .	88
5.1.2. Parámetros del sensor de imagen	93
5.2. Rendimiento del procesado digital de señales	95
5.2.1. Rendimiento en términos de memoria RAM	95
5.2.2. Rendimiento en términos de tiempo	96
5.3. Métricas de comunicación y evaluación de potencia óptica	99
5.3.1. Modelo matemático de potencia de emisión	99
5.3.2. Análisis de SNR y BER frente a la potencia del LED	100

5.4. Latencia de extremo a extremo	104
5.4.1. Tiempo de adquisición (t_{adq})	105
5.4.2. Tiempo de canal y procesamiento (t_{proc})	107
5.4.3. Tiempo de servicio o exposición de la API (t_{serv})	107
5.4.4. Tiempo total (t_{total})	109
6. Conclusiones, limitaciones y trabajo futuro	110
6.1. Conclusiones	110
6.2. Limitaciones	111
6.3. Trabajo futuro	112

Índice de figuras

1.1. Espectro electromagnético junto con esquemas ilustrativos de OWC.	2
2.1. Componente físico (a) a la izquierda, símbolo esquemático (b) del mismo a la derecha.	13
2.2. Sensor de imagen bajo el microscopio.	14
2.3. Fotón de luz incidiendo en un fotodiodo.	15
2.4. Matriz de fotodiodos de avalancha (APD) integrados en un chip de 1 mm ²	16
2.5. Sistema de transmisión y recepción vía OCC con recepción a través de teléfono móvil.	17
2.6. Ejemplo de imagen capturada en el entorno de pruebas en exteriores.	19
2.7. Modulación por muestreo de Nyquist.	21
2.8. Ejemplo de sensor de <i>rolling shutter</i>	28
3.1. Representación del canal de comunicación por luz visible.	37
3.2. Comparativa de los principios de adquisición RS y GS en sistemas OCC: Exposición espacial frente a temporal.	38

3.3. Comparativa del mecanismo de sincronización por correlación cruzada.	45
4.1. Diagrama de bloques general del experimento de comunicación OCC realizado junto a los dispositivos involucrados.	52
4.2. Sensor de temperatura LM35 de DFRobot v4.	54
4.3. Conector de 3 pines del LM35 DFRobot v4.	55
4.4. Diagrama de bloques del transmisor.	56
4.5. Diagrama de conexión físico del NodeMCU con el sensor LM35 y el diodo LED.	60
4.6. Diagrama de conexión físico de la Raspberry Pi 5 con cámara. . .	64
4.7. Cámara conectada a la Raspberry Pi 5 a través del cable FPC. . .	66
4.8. Imagen del experimento donde se aprecia el canal óptico, el sensor de imagen y la Raspberry Pi conectada a este último.	69
4.9. Conexión del sensor de imagen al patillado CAM/DISP0 de la Raspberry Pi 5 con el cable FPC.	70
4.10. Diagrama de recepción con las 2 fases y 4 etapas.	71
4.11. Comparativa de capturas con ajuste automático y manual de parámetros.	72
4.12. Relación de sobremuestreo de 3 fotogramas por bit.	73
4.13. Estimación adaptativa de umbrales.	74
4.14. Proceso de generación de la secuencia binaria y sincronización de símbolo.	75

4.15. Mecanismo de detección del pico de correlación para la alineación del receptor.	76
4.16. Mecanismo de reensamblado y lectura final de la trama de datos OCC.	77
4.17. Arquitectura de <i>software</i> de la capa de aplicación y flujo unidireccional de datos de telemetría.	79
4.18. Código de Spring para el despliegue de la API REST en el servidor.	80
4.19. Diagrama de secuencia del registro de una nueva medición en el sistema.	81
4.20. Información dentro del bucket «telemetría».	82
4.21. Transformación del <i>payload</i> JSON al protocolo nativo Line Protocol de InfluxDB.	83
4.22. Bits de la trama completa.	83
4.23. Preámbulo de la trama.	84
4.24. Delimitador de inicio de la trama.	84
4.25. Identificador de la trama.	85
4.26. Carga útil de la trama.	85
4.27. Comprobación de la trama.	86
5.1. Diagrama físico del experimento.	88
5.2. Comparativa de escenarios de capturas.	89
5.3. Comparativa de SNR con los 4 escenarios con los ajustes establecidos a la cámara para la toma de datos.	91

5.4. Consumo de memoria de la aplicación receptora OCC.	95
5.5. Consumo de tiempo de la aplicación receptora OCC.	98
5.6. Comparativa del impacto de la potencia de emisión del LED en la reconstrucción de la señal, relación señal a ruido y lectura de la trama de datos OCC en el receptor.	103
5.7. Consola de depuración del NodeMCU donde se puede ver qué se ha impreso a través del puerto serial, a parte de otra información, el tiempo de adquisición.	106
5.8. Consola de depuración del script receptor en Python donde se muestra el tiempo de servicio para el envío y registro exitoso de la telemetría en InfluxDB.	108

Índice de tablas

4.1. Resumen de pines del LM35.	54
4.2. Tabla de características del diodo LED azul.	58
4.3. Diagrama de conexiones de la etapa transmisora.	60
4.4. Especificaciones técnicas del sensor de la cámara (OmniVision OV5647).	67
5.1. Comparativa de SNR y BER bajo diferentes condiciones de ilumi- nación ambiental.	93
5.2. Resumen de la configuración por <i>software</i> de los parámetros del sensor de imagen receptor.	94
5.3. Evolución empírica de las métricas del enlace OCC en función de la potencia óptica transmitida.	102

Capítulo 1

Introducción

En la última década, el modelo de conectividad del internet de las cosas (IoT) ha experimentado una evolución sin precedentes, transformando entornos convencionales en ecosistemas inteligentes y altamente interconectados. Este crecimiento se manifiesta especialmente en el despliegue de entornos inteligentes (EI) y en la internet de las cosas industrial (IIoT), donde la sensorización masiva permite la monitorización y optimización de procesos en tiempo real [1]. Se estima que para el año 2030, el número de dispositivos IoT conectados a nivel global superará los 25.000 millones, lo que supone una densidad de nodos sin comparación en la historia de las telecomunicaciones [2].

Este despliegue masivo plantea un desafío crítico: la gestión del espectro radioeléctrico. Las tecnologías inalámbricas convencionales de corto alcance, como Wi-Fi, Bluetooth o ZigBee, operan en bandas de frecuencia saturadas, lo que genera interferencias electromagnéticas (EMI) significativas y limita la escalabilidad del sistema en entornos industriales densos. Además, en ciertos escenarios como hospitales, plantas petroquímicas o cabinas de aeronaves, el uso de radiofrecuencia (RF) está restringido debido a riesgos de interferencia con sistemas críticos o de seguridad [3].

Ante esta limitación, las comunicaciones inalámbricas ópticas (OWC) emergen como una alternativa complementaria y robusta. Las OWC constituyen la tecno-

logía paraguas que engloba el uso del espectro visible, infrarrojo (IR), ultravioleta (UV) y los enlaces ópticos en el espacio libre (comunicación óptica en el espacio libre (FSO)), como se representa en la Figura 1.1. Dentro de este marco, las tecnologías de VLC utilizan el espectro óptico no regulado para la transmisión de datos, aprovechando las infraestructuras de iluminación LED existentes para combinar funciones de iluminación y comunicación [4]. Por su parte, *Light Fidelity* (Li-Fi) constituye una implementación bidireccional y en red de VLC. Asimismo, dentro de los sistemas VLC, la tecnología OCC destaca como una solución técnica particularmente atractiva para los dispositivos IoT. A diferencia de los sistemas VLC basados en fotodiodos (receptores de punto único), la tecnología OCC emplea cámaras —ya integradas en una vasta gama de dispositivos y sistemas de vigilancia— como receptores [5], explotando la separación espacial de los sensores de imagen frente a los fotodiodos.

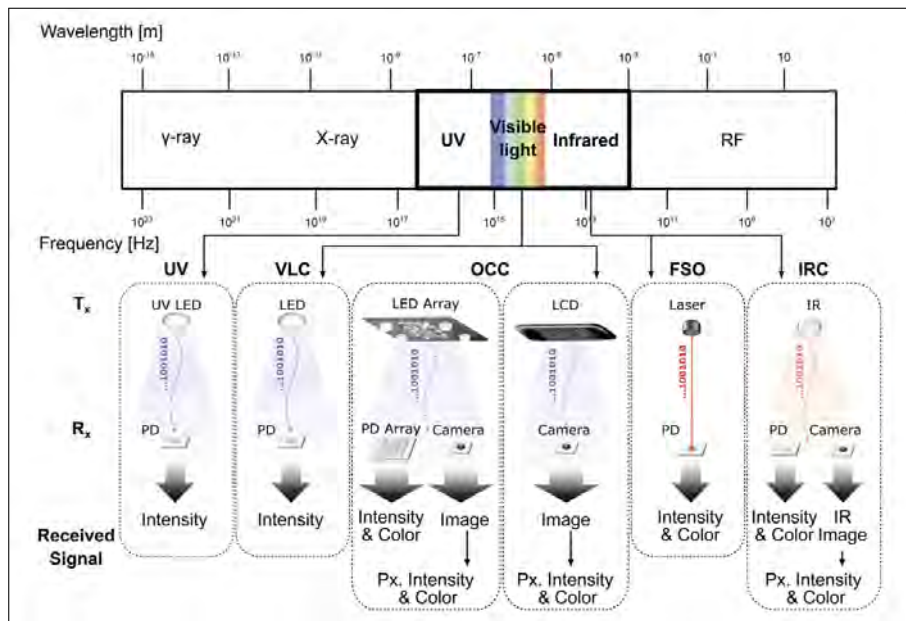


Figura 1.1: Espectro electromagnético junto con esquemas ilustrativos de OWC. Fuente: [6].

La tecnología OCC permite la separación espacial de múltiples fuentes de luz mediante el procesamiento de matrices de píxeles, lo que facilita la comunicación con múltiples nodos sensores de forma simultánea y reduce drásticamente las colisiones de datos [7]. Por tanto, la investigación y el análisis experimental de sistemas OCC se presentan como una necesidad para garantizar comunicacio-

nes de corto alcance fiables, escalables y de bajo coste en la próxima generación de redes y entornos inteligentes.

1.1. Motivación

La justificación para el desarrollo técnico de este trabajo se centra en las ventajas operativas, de seguridad y de compatibilidad que ofrecen las capas físicas ópticas en entornos de telemetría IoT específicos. A diferencia de los sistemas inalámbricos convencionales, la OCC aprovecha el espectro visible, el cual no requiere licencias de explotación [4], permitiendo un despliegue ágil de nodos en redes de baja tasa de datos.

Uno de los pilares de esta motivación es la compatibilidad electromagnética (EMC). Existen entornos altamente sensibles, como hospitales, plantas industriales o centros de datos, donde la radiación de RF puede generar interferencias peligrosas con equipos médicos críticos (como máquinas de resonancia magnética o marcapasos) o sistemas de control industrial. La comunicación por luz visible es intrínsecamente inmune a la EMI y no supone riesgos para la salud humana, lo que la convierte en la opción idónea para la monitorización de constantes vitales en salud digital o el control de procesos en ambientes con alta polución electromagnética [8].

Asimismo, la privacidad y la seguridad de los datos son restricciones determinantes que favorecen la adopción de tecnologías ópticas. Debido a que la luz no atraviesa obstáculos opacos como las paredes, la señal de OCC queda confinada de forma natural al espacio físico donde se encuentra el receptor. Este confinamiento espacial reduce drásticamente el riesgo de interceptación, garantizando una baja probabilidad de interceptación (LPI) frente a atacantes externos y protegiendo contra el ataque de escucha (Eavesdropping) desde el exterior, ofreciendo una capa de seguridad física que es extremadamente compleja de replicar en redes de radiofrecuencia sin el uso de blindajes costosos [9].

Finalmente, la simplicidad de la infraestructura y el bajo coste de implementación son factores clave para la viabilidad del IoT. La OCC permite reutilizar desde simples diodos LED (como pequeños indicadores de estado o pilotos integrados, que sirven de base para el diseño del prototipo de este trabajo) hasta luminarias LED de iluminación general en futuras aplicaciones, y los sensores de imagen semiconductor de óxido metálico complementario (CMOS), presentes de forma ubicua en teléfonos inteligentes y sistemas de videovigilancia, como receptores [10]. Esta dualidad funcional —donde una cámara puede realizar tareas de vigilancia y recepción de datos simultáneamente— elimina la necesidad de *hardware* de recepción dedicado y costoso, facilitando la integración de telemetría inteligente en infraestructuras ya existentes de ciudades inteligentes, agricultura de precisión o entornos domésticos.

1.2. Contexto

Las comunicaciones inalámbricas ópticas (OWC) y, específicamente, la tecnología de comunicación por luz visible (VLC) se posicionan en la confluencia entre los avances en iluminación de estado sólido y la ubicuidad de los dispositivos de captura de imágenes.

Dentro del ecosistema OWC, la tecnología de comunicación por luz visible (VLC) destaca por su capacidad de integrar funciones de iluminación y transferencia de datos de forma simultánea [4]. No obstante, una de las vertientes más prometedoras y disruptivas en la actualidad son las OCC. A diferencia de los sistemas VLC convencionales que requieren fotodiodos especializados, la OCC aprovecha los sensores de imagen presentes en dispositivos comerciales, como cámaras de seguridad y teléfonos inteligentes, para actuar como receptores [11].

La viabilidad de los ecosistemas IoT mediante tecnología OCC destaca especialmente por su rentabilidad y su naturaleza ubicua. Al aprovechar infraestructuras existentes de manera oportunista —habilitando desde pequeños diodos de esta-

do hasta luminarias LED comerciales en el rol de transmisores [6], y empleando sensores de imagen estándar para la recepción [12]— se logra crear enlaces de datos robustos. Esta estrategia permite prescindir de arquitecturas de red dedicadas o de la adquisición de *hardware* propietario que tiene un alto coste.

Esta combinación de emisores LED simples y sensores de imagen avanzados pero accesibles constituye el núcleo experimental de este análisis, buscando demostrar la viabilidad de la tecnología OCC como un canal eficiente y económico para la comunicación en nodos IoT.

1.3. Planteamiento del problema

La implantación práctica de soluciones OCC para redes de bajo coste debe lidiar con un escollo fundamental: la brecha de rendimiento entre el frente de transmisión y la captación mediante matriz CMOS. Incorporar componentes como fotodiodos obliga a diseñar *hardware* ad hoc, una restricción que dificulta su despliegue inmediato. Por tanto, el reto pasa por reaprovechar la infraestructura preexistente -es decir, las ópticas integradas de forma nativa en móviles y cámaras comerciales- para gestionar la recepción. Esta migración tecnológica define a la OCC, una modalidad que gana en accesibilidad lo que irremediablemente sacrifica al elevar la complejidad computacional y física.

La problemática técnica central se halla en la extracción fiable de información desde una fuente de luz que parpadea y que sea capturable por un sensor de imagen. A diferencia de un fotodiodo, que ofrece una señal continua, una cámara muestrea la realidad de forma discreta a través de fotogramas por segundo (FPS) limitados. De esta dinámica se deriva un condicionante insalvable: la tasa de exposición fotográfica es, por norma general, muchísimo más lenta que la frecuencia de parpadeo del LED. Extraer el mensaje bajo estas condiciones hace obligado crear rutinas de procesamiento de imagen avanzadas -junto a estrategias de decodificación robustas- que consigan aislar la señal frente a la amenaza

constante del *aliasing*, el ruido de fondo y los inevitables desplazamientos del dispositivo o la fuente.

Aunado a lo anterior, la naturaleza de los sensores IoT exige que esta recuperación de datos sea extremadamente eficiente en términos de recursos. El problema no termina en la detección de los bits; implica el diseño de un sistema capaz de decodificar ráfagas de datos de baja velocidad de manera robusta frente a variaciones en la distancia y el ángulo de incidencia. La segmentación del LED en el plano de la imagen, la compensación de la distorsión del obturador (especialmente en sensores *rolling shutter*) y la sincronización entre transmisor y receptor representan obstáculos que comprometen la integridad de la información del sensor IoT.

La última etapa de la arquitectura consiste en volcar la información recuperada hacia la capa de aplicación. El objetivo trasciende la simple decodificación de los pulsos de luz; requiere estructurar un flujo de datos que convierta la señal lumínica en métricas útiles y procesables. Evaluar este proceso de «punta a punta» -desde la capa física del LED hasta el usuario- exige un escrutinio empírico exhaustivo. Solo mediante el análisis de parámetros críticos como la fiabilidad, la latencia y la tasa de error de bits (BER), se podrá determinar la solvencia y escalabilidad de la tecnología OCC dentro de un ecosistema IoT en entornos reales.

1.4. Objetivos

El propósito fundamental es explorar y validar el uso de la tecnología de comunicación por luz visible en entornos de sensorización. Para ello, se establece como objetivo principal la demostración de la viabilidad de un sistema IoT basado en OCC, priorizando el uso de componentes de *hardware* comerciales y de bajo coste para garantizar su accesibilidad y escalabilidad. De manera complementaria, el proyecto se orienta hacia el desarrollo de un flujo de procesamiento de

señales digitales (DSP) de alta robustez, diseñado específicamente para la decodificación de datos bajo modulación por conmutación de encendido y apagado (OOK) a partir de la información visual capturada. Finalmente, con el fin de dotar al sistema de una utilidad práctica y conectividad total, se plantea la integración de los datos obtenidos en una arquitectura orientada a servicios mediante la creación de una interfaz de programación de aplicaciones (API) web, permitiendo así que las medidas del sensor sean accesibles y fácilmente integrables con aplicaciones y plataformas de *software* externas.

A continuación, se detallan las metas específicas de esta investigación:

1. Objetivo primario: validación del sistema OCC

Demostrar la viabilidad técnica de un enlace de telemetría de corto alcance utilizando emisores LED y receptores basados en sensores de imagen convencionales sin *hardware* óptico dedicado.

2. Objetivo secundario: procesamiento digital de la señal

Desarrollar un algoritmo de procesamiento de imágenes robusto y de bajo coste computacional capaz de identificar el emisor, aplicar umbrales adaptativos y decodificar la señal modulada.

3. Objetivo terciario: interoperabilidad y aplicación

Diseñar e implementar un *middleware* desacoplado y una API *RESTful* web que permita registrar, persistir en bases de datos de series temporales y consumir las mediciones por servicios externos en tiempo real.

1.4.1. Objetivo primario: validación del sistema OCC

El objetivo fundamental de este trabajo es demostrar la viabilidad técnica de un sistema de sensorización para IoT basado en la comunicación por OCC. A diferencia de los sistemas VLC tradicionales que dependen de fotodetectores de alta velocidad, esta investigación se centra en validar cómo la infraestructura de

sensores de imagen ya existente puede actuar como nodo receptor de datos. El propósito es probar que es posible establecer un enlace de comunicación robusto y funcional utilizando la luz visible como portadora, permitiendo la transferencia de información desde sensores remotos hacia sistemas de gestión centralizados sin recurrir a radiofrecuencia.

Un aspecto crítico de este objetivo es el compromiso con la accesibilidad del *hardware*. El proyecto se aleja de soluciones de laboratorio costosas o componentes ad-hoc, priorizando en su lugar el uso de *hardware* comercial y de bajo coste. Esto implica el uso de emisores LED estándar y cámaras CMOS convencionales, con el fin de evaluar si el rendimiento obtenido bajo estas limitaciones de *hardware* es suficiente para satisfacer las demandas de las aplicaciones IoT reales. De este modo, se pretende reducir las barreras de entrada para la adopción de esta tecnología en entornos domésticos e industriales.

La consecución de este objetivo primario conlleva el diseño de un escenario experimental que permita medir parámetros de rendimiento clave bajo condiciones variables. No se busca únicamente que el sistema «funcione», sino cuantificar su fiabilidad en términos de distancia operativa y tasa de acierto en la recuperación de datos. Para evaluar este rendimiento de forma cuantitativa, se establecen como métricas clave la relación señal-ruido (SNR) (medida en dB) del canal óptico, la BER para cuantificar la integridad de los datos, el porcentaje de tramas paritarias válidas recibidas, y la latencia temporal (medida en milisegundos) del procesamiento digital de señales (DSP) y de la API de servicios, parámetros que se analizan experimentalmente en el Capítulo 5. Con ello, se espera proporcionar una base sólida que justifique a la tecnología OCC como una solución complementaria y eficiente para el tramo final de conectividad en dispositivos inteligentes, aprovechando la ubicuidad de los sensores de imagen en la sociedad actual.

1.4.2. Objetivo secundario: desarrollo del flujo DSP

El segundo pilar de esta investigación consiste en el diseño y desarrollo de un flujo de DSP que sea capaz de extraer información útil de un canal óptico altamente variable. Dado que el receptor es un sensor de imagen CMOS, el sistema debe enfrentarse a desafíos inherentes a la captura de vídeo, como el ruido térmico, las variaciones en la exposición y la distorsión geométrica. Por ello, este objetivo se centra en la creación de una arquitectura algorítmica robusta que procese cada fotograma capturado para identificar la fuente emisora y aislar la señal lumínica del fondo, garantizando la integridad de los datos antes de proceder a su interpretación.

Una parte fundamental de este flujo de procesamiento es la implementación de mecanismos de decodificación específicos para la modulación OOK. Debido a que la tasa de muestreo de una cámara convencional es limitada, el sistema DSP debe ser capaz de interpretar las transiciones de estado del LED de manera precisa, incluso en condiciones de baja SNR. Esto implica el desarrollo de técnicas de umbralización adaptativa que compensen las fluctuaciones de la iluminación ambiental y algoritmos de sincronización que permitan recuperar el reloj de la señal transmitida sin una conexión física entre el emisor y el receptor.

1.4.3. Objetivo terciario: capa de abstracción de la persistencia de datos

El tercer objetivo de este proyecto se centra en el diseño e implementación de una capa de abstracción intermedia (*middleware*) situada entre la etapa de decodificación de datos en el receptor OCC y la infraestructura de persistencia y explotación de la información. En lugar de acoplar directamente el dispositivo de captura a un motor de base de datos específico, se plantea desarrollar una interfaz desacoplada que actúe como un gestor de flujos de datos. Esta capa intermedia asumirá la responsabilidad de recibir las mediciones provenientes de la

capa física de comunicación óptica, abstrayendo por completo la lógica del nodo receptor respecto a los mecanismos de almacenamiento final o las plataformas externas de consumo de datos de los sensores IoT.

La relevancia de este enfoque radica en la flexibilidad, robustez y modularidad que aporta a la arquitectura global del sistema. Al centralizar la lógica de distribución en este componente intermedio, se elimina la dependencia de un único motor de base de datos, permitiendo en el futuro migrar hacia tecnologías de almacenamiento heterogéneas, introducir mecanismos de redundancia y tolerancia a fallos, o modificar dinámicamente los *endpoints* de destino. Toda esta reconfiguración de la infraestructura de datos se podrá realizar de forma transparente, garantizando que ningún cambio en el ecosistema de red o almacenamiento requiera la modificación del código en el dispositivo receptor de OCC.

1.5. Estructura del documento

Este Trabajo de Fin de Máster se organiza en seis capítulos que guían al lector desde la fundamentación teórica hasta la validación experimental del sistema propuesto:

1. Capítulo 1 - Introducción

Presenta el contexto general del proyecto, la motivación tras el uso de comunicaciones ópticas en el Internet de las Cosas y define el problema técnico a resolver, así como los objetivos y el alcance del trabajo.

2. Capítulo 2 - Estado del arte

Realiza una revisión de las tecnologías de comunicación inalámbrica óptica vigentes, analizando las soluciones existentes en el ámbito de OCC y comparando las distintas técnicas de modulación y recepción documentadas en la literatura reciente.

3. Capítulo 3 - Marco teórico

Establece los fundamentos físicos y tecnológicos necesarios para comprender el sistema, abarcando desde el funcionamiento de los sensores de imagen CMOS y el efecto *rolling shutter*, hasta los principios de la modulación OOK y la teoría del procesamiento digital de señales.

4. Capítulo 4 - Metodología

Describe detalladamente el diseño experimental y la implementación del sistema, incluyendo la selección de *hardware*, el desarrollo del *pipeline* de *software* para la decodificación de datos y la arquitectura de la API para la integración de servicios.

5. Capítulo 5 - Resultados y discusión

Expone los datos obtenidos durante la fase de experimentación, analizando el rendimiento del sistema en términos de robustez, tasa de error y distancia, además de discutir las limitaciones encontradas y las métricas de fiabilidad logradas.

6. Capítulo 6 - Conclusiones, limitaciones y trabajo futuro

Resume las principales aportaciones de la investigación, evalúa el cumplimiento de los objetivos planteados, expone las limitaciones encontradas y propone nuevas líneas de desarrollo para la optimización de la tecnología OCC en entornos de sensorización inteligentes.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo, se analiza el panorama actual de la tecnología OCC, no como un mero listado histórico, sino como una base crítica que justifica las decisiones de diseño tomadas en este proyecto. Dado que el objetivo es implementar un sistema viable en condiciones reales con *hardware* común, se han seleccionado aquellos trabajos que realmente aportan soluciones a los problemas de latencia y ruido en sensores de imagen CMOS. El enfoque aquí no es solo documentar qué se ha hecho, sino identificar los vacíos técnicos que este TFM pretende cubrir, especialmente en lo que respecta a la integración de bajo coste en el ecosistema IoT.

Con el propósito de vertebrar el estado del arte, el análisis se ha dividido en tres ejes conceptuales. Inicialmente, se confrontan los sistemas VLC convencionales basados en fotodiodos con las soluciones OCC basadas en sensores de imagen. Este contraste inicial justifica el rol estratégico de las cámaras para garantizar la ubicuidad del servicio, asumiendo como peaje su evidente déficit de muestreo frente al fotodiodo. Posteriormente, se evalúa el despliegue empírico de dichas redes en espacios inteligentes, sometiendo a escrutinio crítico sus métricas operativas de alcance y fiabilidad. Por último, se profundiza en las estrategias de procesamiento digital (DSP) que la literatura científica propone para la decodificación; este análisis es vital para entender cómo enfrentarnos a retos como el

ruido ambiental y la sincronización sin comprometer la ligereza del sistema que se busca desarrollar.

2.1. Sistemas VLC convencionales (fotodiodo) frente a sistemas basados en cámara (OCC)

2.1.1. Fundamentos y evolución

La génesis de las comunicaciones por luz visible se remonta conceptualmente a finales del siglo XIX con el fotófono de Alexander Graham Bell [13], aunque la viabilidad práctica de estos sistemas no se materializó hasta la llegada de la tecnología de semiconductores de alta velocidad. La VLC se define técnicamente como el uso del espectro visible, comprendido entre los 380 nm y los 780 nm, para la transmisión de información mediante la modulación de la intensidad de la luz a velocidades imperceptibles para el ojo humano. Este paradigma ha evolucionado desde sistemas simples de baja velocidad hasta infraestructuras complejas capaces de alcanzar tasas de transferencia en el rango de los gigabits por segundo, impulsadas por el desarrollo de diodos láser y LED de respuesta ultra rápida [14].

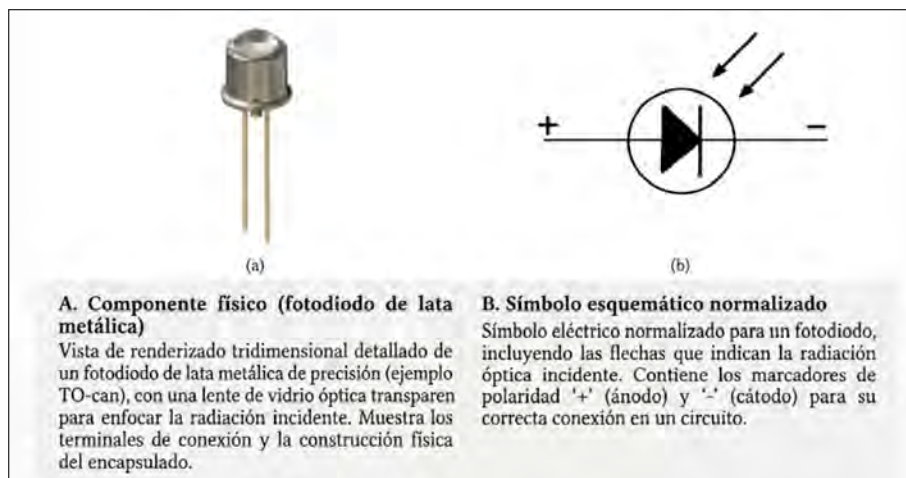


Figura 2.1: Componente físico (a) a la izquierda, símbolo esquemático (b) del mismo a la derecha.

Por otro lado, la OCC representa una evolución pragmática y centrada en el dispositivo de la VLC. Mientras que la VLC convencional requiere receptores especializados, la OCC capitaliza la presencia masiva de sensores de imagen (Figura 2.2) en dispositivos comerciales, como teléfonos móviles, relojes inteligentes, portátiles y tablets. Esta distinción no es meramente técnica, sino que altera fundamentalmente el modelo de negocio y las posibilidades de despliegue de la tecnología, moviendo el foco desde el rendimiento puro hacia la integración sin fricciones en la infraestructura de iluminación y consumo existente [11].

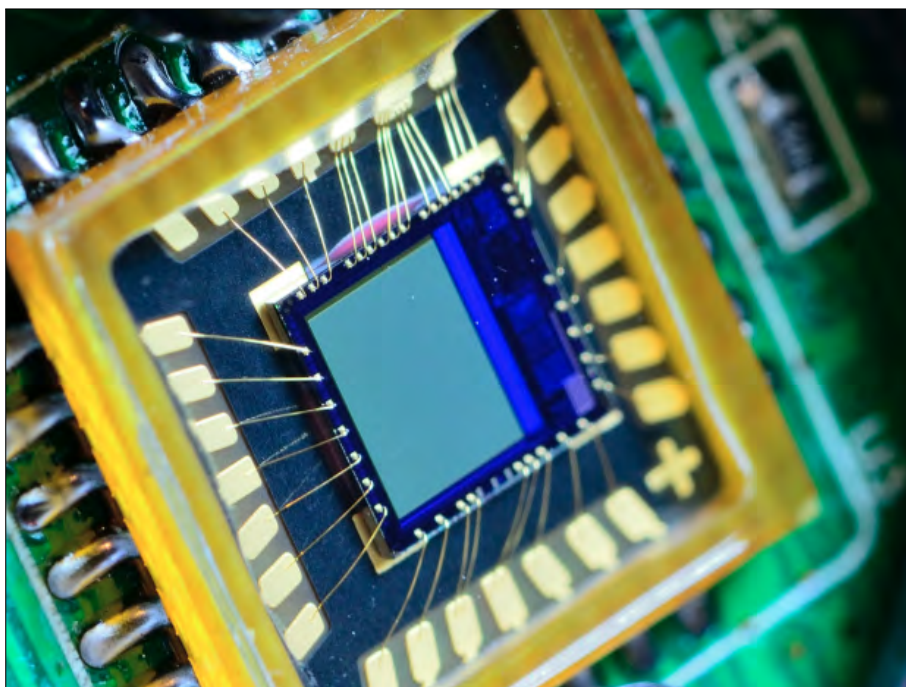


Figura 2.2: Sensor de imagen bajo el microscopio.

2.1.2. El fotodiodo frente al sensor de imagen

La diferencia entre VLC y OCC reside en el transductor que convierte los fotones en electrones. En los sistemas VLC, el receptor estándar es un fotodiodo (Figura 2.1), diseñado para actuar como un sensor de punto único (Figura 2.3) con una sensibilidad excepcional y una latencia mínima. Estos dispositivos, que incluyen variantes como los fotodiodos PIN o los fotodiodo de avalancha (APD), están optimizados para seguir las variaciones rápidas de la intensidad de la luz,

permitiendo anchos de banda que superan con creces los de cualquier sensor de imagen convencional [14].

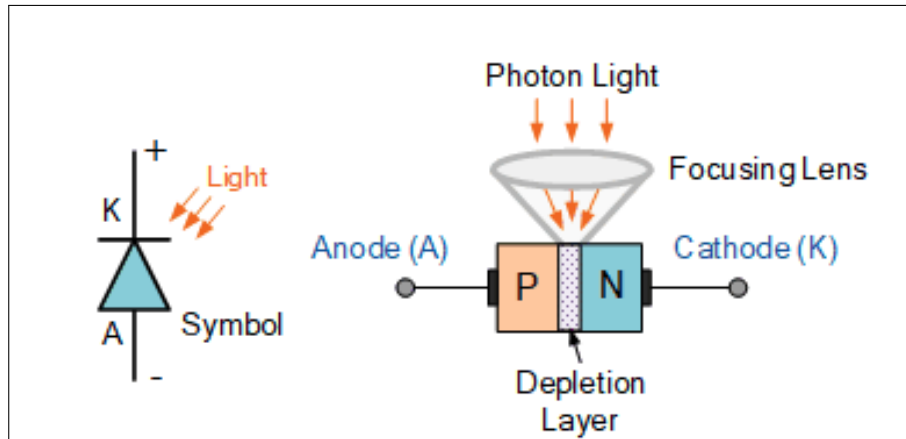


Figura 2.3: Fotón de luz incidiendo en un fotodiodo.

En contraste, OCC utiliza un sensor de imagen como receptor. Un sensor de imagen es, en esencia, una matriz bidimensional de millones de fotodiodos microscópicos conocidos como píxeles. Esta arquitectura matricial introduce una capacidad de procesamiento espacial que es intrínsecamente ajena a los sistemas basados en fotodiodos de punto único. La lente de la cámara proyecta las fuentes de luz sobre diferentes regiones del sensor, lo que permite una separación natural de las señales en el dominio espacial, facilitando la implementación de sistemas de entrada múltiple salida múltiple (MIMO) sin necesidad de ópticas de recepción complejas o múltiples receptores discretos (Figura 2.4) [11].

Esta transición del dominio puntual al espacial permite que el receptor no solo detecte la intensidad lumínica, sino que también extraiga información sobre la posición, el color y la forma de la fuente de luz, facilitando la separación de múltiples señales en un mismo plano de captura mediante técnicas de procesamiento de imágenes [11].

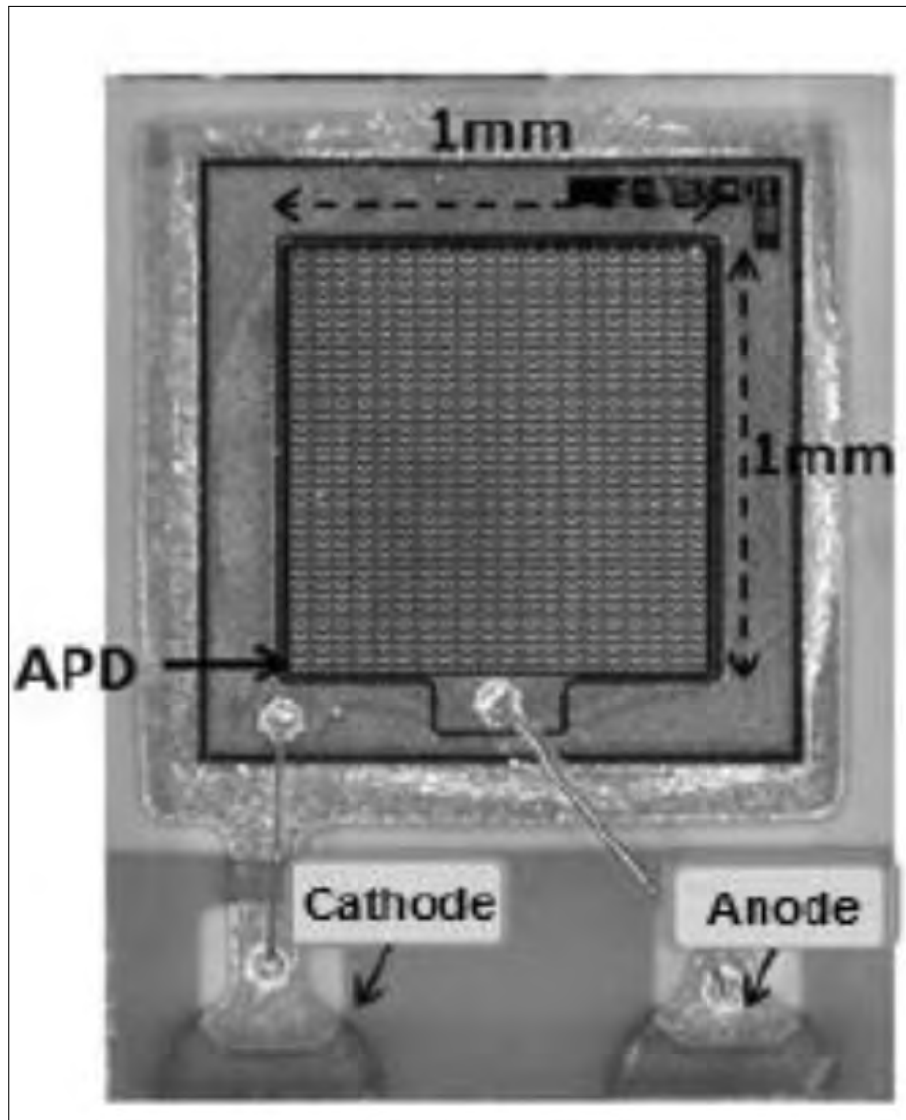


Figura 2.4: Matriz de fotodiodos de avalancha (APD) integrados en un chip de 1 mm².

2.2. OCC en redes de sensores

2.2.1. Revisión de estudios previos: telemetría e identificación en entornos inteligentes e industriales

El despliegue de redes de sensores en el paradigma del Internet de las cosas ha encontrado en la comunicación por OCC una solución eficiente para superar las limitaciones de congestión del espectro de RF. La literatura científica inicial se centró en la reutilización de la infraestructura de iluminación LED preexistente

para la difusión de datos (broadcasting). Autores como Saeed et al. [7] destacan que la capacidad de las cámaras para actuar como receptores permite una «diseminación de datos localizada», donde la información requiere línea de visión directa o la recepción de sus reflexiones, lo cual es intrínsecamente más seguro que las soluciones RF.

En el ámbito de la telemetría de baja velocidad, se han documentado sistemas que emplean indicadores LED de maquinaria industrial para transmitir estados operativos a cámaras de vigilancia centralizadas. Danakis et al. [12] demostraron que incluso con sensores CMOS de consumo, es posible extraer flujos de datos de sensores de temperatura o presión modulados en la fuente de luz, tal como se ilustra en la Figura 2.5. Esta técnica es especialmente valiosa en entornos de Manufactura Avanzada, donde las interferencias electromagnéticas (EMI) impiden el uso de redes Wi-Fi o ZigBee de forma fiable.

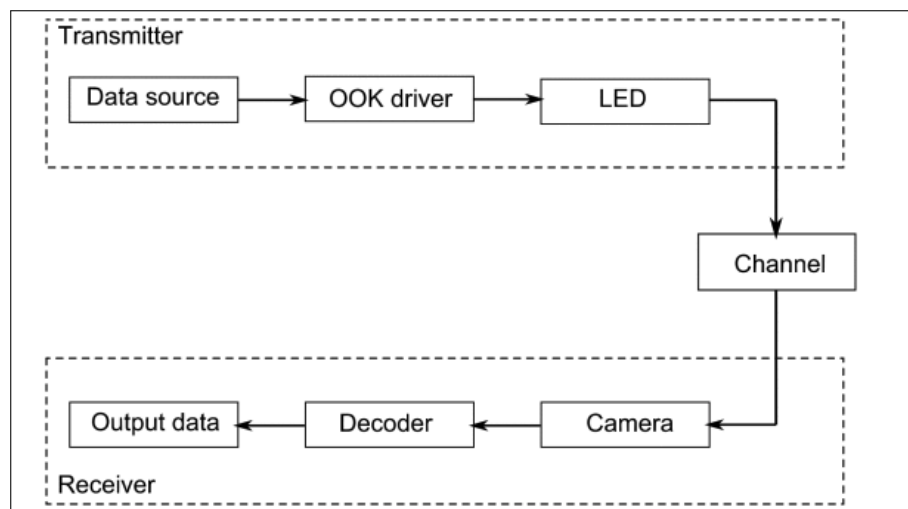


Figura 2.5: Sistema de transmisión y recepción vía OCC con recepción a través de teléfono móvil. Fuente: [12].

Por otro lado, la identificación de dispositivos mediante OCC ha evolucionado hacia sistemas de alta densidad. Mientras que en RF el fenómeno de las colisiones dificulta la lectura simultánea de cientos de etiquetas, Nguyen et al. [15] y Chow et al. [16] argumentan que la selectividad espacial de los sensores de imagen permite que cada píxel o grupo de píxeles actúe como un canal independiente. Esto permite que una sola captura de imagen identifique y recoja datos de múlti-

ples nodos IoT situados en el mismo plano visual, una capacidad conocida como MIMO espacial óptico.

2.2.2. Análisis comparativo de objetivos de diseño y restricciones operativas

El diseño de un sistema OCC para redes de sensores no es uniforme y depende estrictamente del compromiso entre varios factores críticos:

2.2.2.1. Alcance y distancia de comunicación

Los estudios de Nguyen et al. [17] subrayan que la distancia en OCC está directamente vinculada a la resolución del sensor y la óptica empleada. En escenarios como las smart cities, el uso de lentes telescópicas ha permitido alcanzar distancias superiores a los 50 metros. Sin embargo, en redes de sensores en interiores, el diseño se orienta hacia lentes de gran angular para maximizar el campo de visión (campo de visión (FoV)), permitiendo que una sola cámara cubra un área extensa de nodos sensores, aunque a costa de una menor relación señal-ruido (SNR) por nodo.

Investigaciones más recientes han logrado superar esta limitación mediante la implementación de enlaces OCC a nivel de sub-píxel en entornos exteriores. Autores como Matus et al. [18] y Eso et al. [19] han demostrado la viabilidad de establecer comunicaciones estables a distancias de entre 90 y 400 metros utilizando transmisores LED comerciales de dimensiones muy reducidas (5 mm) y sensores de imagen convencionales sin necesidad de alterar la óptica original del dispositivo. Este avance supone un punto de inflexión tecnológico, ya que permite mantener un FoV amplio y explotar la capacidad inherente de multiplexación espacial de las cámaras, un factor crítico para la monitorización simultánea de cientos de nodos en infraestructuras de ciudades inteligentes e IoT.

La viabilidad técnica de esta arquitectura de larga distancia se fundamenta en el comportamiento físico de la luz y el procesamiento digital de señales. Aunque la proyección geométrica de la fuente luminosa a tan gran distancia ocupe teóricamente un área inferior a la de un único píxel físico, las imperfecciones naturales del sistema de lentes provocan una dispersión espacial de la energía lumínica hacia los píxeles adyacentes, fenómeno modelado matemáticamente a través de la función de dispersión de punto (PSF). Mediante algoritmos de correlación y un promediado espacial enfatizado basado en dicha PSF, el receptor es capaz de integrar la energía dispersa, mitigar las adversidades e iluminación de fondo del canal exterior y recuperar la señal de manera robusta, alcanzando niveles de SNR operativos de hasta 20 dB. En consecuencia, esta aproximación empírica demuestra que la tecnología OCC puede extraer flujos de datos confiables a grandes distancias mediante infraestructura lumínica de bajo consumo y *hardware* de recepción convencional de bajo coste (Figura 2.6).



Figura 2.6: Ejemplo de imagen capturada en el entorno de pruebas en exteriores. Las imágenes incrustadas en círculos muestran los estados encendido y apagado de ambos nodos. Fuente: Matus et al. [18].

2.2.2.2. Robustez y ruido óptico ambiental

La robustez de un sistema OCC frente a fuentes de degradación óptica es uno de los factores críticos para su implementación en entornos IoT [6]. A diferencia de los sistemas basados en fotodiodos, donde el ruido ambiental se integra en una única corriente eléctrica, los sensores de imagen permiten una separación

espacial de las fuentes de luz. Sin embargo, el rendimiento se ve condicionado por diversas fuentes de ruido, principalmente el ruido de disparo (shot noise), el ruido térmico y, de manera más disruptiva, la interferencia de luz ambiental (luz solar o iluminación artificial no deseada) [20].

En entornos de interior, el ruido óptico predominante proviene de otras luminarias LED que operan a frecuencias de conmutación similares a las de la señal de datos. Este fenómeno puede mitigar mediante algoritmos de procesamiento de imagen que explotan la arquitectura del *rolling shutter* [20], aunque la saturación del sensor (*blooming*) ante fuentes de alta intensidad puede degradar la SNR. En exteriores, la radiación solar actúa como un ruido de fondo de banda ancha que eleva el nivel de corriente de oscuridad en los píxeles, reduciendo el rango dinámico disponible para detectar la modulación de los sensores IoT [6].

Investigaciones recientes indican que la robustez en OCC se optimiza mediante el control del tiempo de integración y el aprovechamiento de la diversidad espacial, lo que eleva la SNR frente a los receptores de fotodiodos convencionales. La capacidad de esta tecnología para realizar una separación espacial permite discernir entre los píxeles de señal y los de ruido, descartando eficazmente la interferencia de luz ambiental y el ruido de *flicker*. Esto otorga al sistema una resiliencia intrínseca en escenarios de largo alcance, consolidando a OCC como una alternativa viable y robusta para entornos industriales con alta interferencia electromagnética, donde la gestión de los grados de libertad espaciales es crítica [7].

2.2.2.3. Restricciones de muestreo

El muestreo en sistemas OCC representa uno de los desafíos más complejos debido a la discrepancia entre las altas frecuencias de conmutación de los LEDs y las limitadas tasas de captura de los sensores de imagen comerciales. A diferencia de los sistemas de comunicaciones de RF, donde el muestreo es instantáneo y uniforme, en OCC las restricciones vienen impuestas por la arquitec-

tura del *hardware* del sensor y los teoremas fundamentales del procesamiento de señales.

■ El Teorema de Nyquist y el *frame rate*

La restricción primaria en cualquier sistema de comunicación basado en cámaras es la tasa de fotogramas por segundo (FPS). Según Cahyadi et al. [11], en un esquema de muestreo global (*global shutter*), la frecuencia máxima de datos está limitada por el Teorema de Nyquist a la mitad de la tasa de captura del sensor ($f_s/2$). Dado que la mayoría de las cámaras IoT operan a 30 o 60 FPS, la tasa de transmisión efectiva es extremadamente baja, de 15 a 30 bps (Figura 2.7).

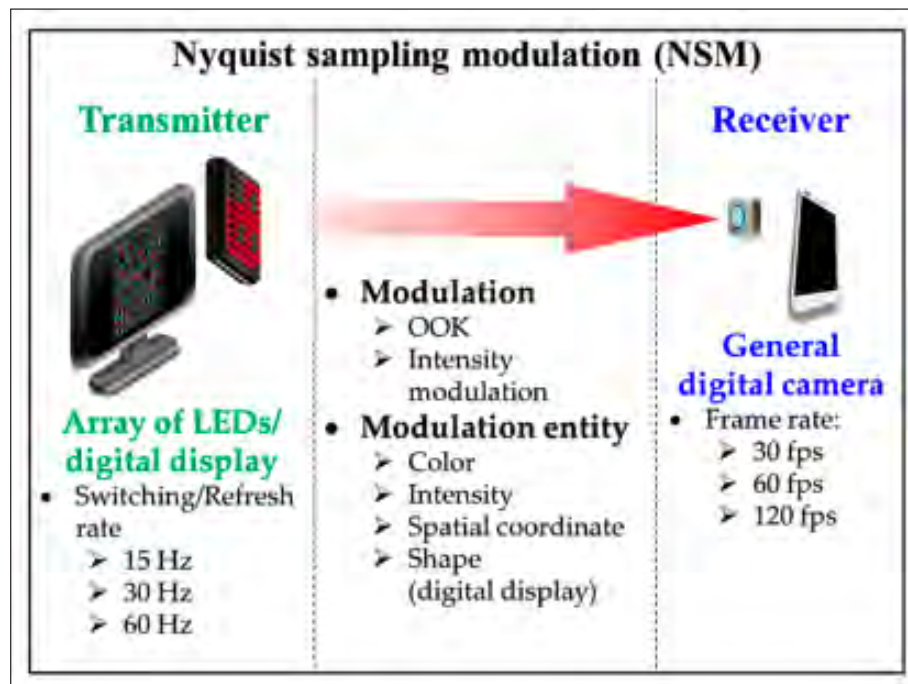


Figura 2.7: Modulación por muestreo de Nyquist. Fuente: [11], pág. 14.

■ Arquitectura *rolling shutter* como mecanismo de sobremuestreo

Para superar la limitación del *frame rate*, la literatura técnica actual se centra en el aprovechamiento del efecto *rolling shutter* (*rolling shutter* (RS)) de los sensores CMOS. Como explican Le et al. [21], el mecanismo RS no expone todos los píxeles simultáneamente, sino que realiza un barrido secuencial línea por línea. Este proceso actúa como un muestreo tempo-

ral progresivo, transformando la señal óptica modulada en el tiempo en un patrón de franjas espaciales en la imagen.

Sin embargo, esta técnica introduce la restricción del tiempo de lectura de línea (t_{row}), que define la resolución temporal del sistema. La frecuencia de muestreo efectiva bajo RS viene dada por $f_{s,RS} = 1/t_{row}$, lo que permite alcanzar anchos de banda de varios kHz. No obstante, Le et al. advierten que si la frecuencia de parpadeo del LED no está perfectamente sincronizada con el tiempo de exposición, se produce el fenómeno de aliasing o aliasing espacial, donde las franjas se vuelven ilegibles o se solapan.

■ **Aliasing espacial**

La robustez del muestreo se ve afectada por la resolución espacial y la distancia de comunicación. Chowdhury et al. [22] destacan que el rendimiento del sistema se mantiene estable frente a variaciones de distancia siempre que el tamaño de la imagen del LED proyectada sobre el sensor no sea inferior al tamaño de un píxel individual. No obstante, a medida que la distancia aumenta, el número de píxeles disponibles para muestrear la fuente de luz disminuye, lo que puede inducir errores de detección si la señal no ocupa al menos una unidad de muestreo mínima en la matriz del sensor. Esta característica de alta resolución espacial permite, sin embargo, que el sistema OCC segregue eficazmente las señales de datos de las fuentes de ruido ambiental, como la luz solar, asignándolas a diferentes posiciones del sensor y evitando así la interferencia mutua.

En el contexto de este proyecto, aunque la literatura científica prioriza el efecto *rolling shutter* para maximizar el ancho de banda, su implementación conlleva una elevada complejidad computacional en el receptor debido a la necesidad de algoritmos de procesamiento espacial para segmentar y corregir distorsiones geométricas en las franjas. Por ello, para simplificar el procesamiento en dispositivos con recursos limitados y maximizar la robustez del enlace, en este trabajo se opta por operar la cámara en un régimen equivalente a *global shutter*. Al ser la tasa de transmisión

binaria del emisor muy baja en comparación con la tasa de refresco (con tiempos de bit muy superiores a la duración de captura de un fotograma completo), la intensidad lumínica de la fuente permanece constante durante la exposición de todo el sensor. Esto evita la formación de patrones de franjas y reduce la decodificación a un análisis de la variación temporal de la luminancia en la región de interés, quedando el análisis de *rolling shutter* en el estado del arte como contexto de los límites de velocidad superiores de la tecnología.

2.2.2.4. Consideraciones prácticas de despliegue

El despliegue de la tecnología OCC en redes de sensores IoT requiere abordar una serie de desafíos prácticos derivados de las limitaciones de *hardware* y de las dinámicas del entorno. A diferencia de los enlaces convencionales basados en fotodiodos, la captura y evaluación continua de fotogramas impone una carga computacional significativa en la arquitectura del sistema. Investigaciones recientes como la de Liu et al. [23] señalan que, en la fase de diseño y experimentación, resulta crítico parametrizar con precisión elementos como la longitud focal de la cámara y el tiempo de exposición para garantizar la viabilidad computacional.

■ Impacto de la ganancia y el tiempo de exposición

El control de la luminancia en el receptor es vital para la estabilidad del enlace. La ganancia del sensor (ISO) debe ajustarse para compensar la atenuación de la señal a largas distancias, aunque un incremento excesivo introduce una componente de ruido adicional que degrada la relación señal-ruido (SNR). Simultáneamente, el tiempo de exposición (t_{exp}) es el parámetro más sensible en sistemas *rolling shutter*; este debe ser lo suficientemente corto para evitar el suavizado de las franjas (blurring), pero lo bastante largo para permitir que el sensor recolecte suficientes fotones para distinguir los niveles lógicos. Si t_{exp} supera la duración de un bit, la integración temporal del sensor actúa como un filtro paso-bajo que elimina la información modulada [22].

■ Resolución y balance de blancos

La resolución del sensor define la densidad de muestras disponibles por cada símbolo transmitido. Según Chowdhury et al. [22], la comunicación es estable siempre que el tamaño de la imagen del LED no sea inferior al tamaño de un píxel, lo que implica que a mayor resolución, mayor es la distancia máxima de comunicación alcanzable antes de que ocurra aliasing espacial. Por otro lado, el balance de blancos (White Balance) suele configurarse en modo manual en despliegues OCC para evitar que algoritmos de corrección automática alteren los niveles de color durante la transmisión. En sistemas que emplean LEDs RGB, un balance de blancos incorrecto provoca *crosstalk* (diafonía) entre los canales de color, dificultando la separación de los bits en el receptor y aumentando drásticamente la BER [24].

El despliegue práctico también exige la implementación de algoritmos de fusión de datos y el manejo de variaciones de fotogramas para estabilizar el enlace frente a las variaciones intrínsecas en la tasa de captura de los sensores comerciales, como los propuestos por Bae et al. [25].

2.3. Técnicas existentes de procesamiento digital de señales y decodificación

El proceso de extracción de la señal óptica en OCC es una cadena crítica que transforma los cambios de intensidad lumínica capturados en los fotogramas de vídeo en información binaria, enfrentando retos como el ruido ambiental, la inestabilidad de la tasa de imágenes y el desenfoque por movimiento.

2.3.1. Selección de la ROI y localización de la fuente

El primer paso fundamental en el receptor OCC es la localización precisa de la ROI en la imagen, eliminando el fondo complejo para reducir la carga computacional y mejorar la SNR.

2.3.1.1. División virtual por cuadrícula (GVD)

Para optimizar la eficiencia en tiempo real se usa la división virtual por cuadrícula (GVD). Este método divide la imagen recibida en una matriz de $n \times m$ bloques (por ejemplo, una cuadrícula de 6×6). En lugar de recorrer cada píxel, el algoritmo realiza un muestreo aleatorio de píxeles dentro de los bloques para localizar rápidamente aquellos con altos valores de escala de grises. Una vez detectados los píxeles candidatos, se fusionan los bloques adyacentes para definir el contorno final y el centro geométrico de la ROI. [26]

2.3.1.2. Detección basada en *deep learning*

En entornos dinámicos y de alta movilidad, los métodos tradicionales de umbralización suelen fallar. Recientemente, se han integrado arquitecturas de aprendizaje profundo como YOLOv8 [27] y YOLOv11n [28] para la detección y seguimiento de LEDs en tiempo real. Estos modelos permiten generar cajas delimitadoras (bounding boxes) que se adaptan dinámicamente a la posición del transmisor, incluso a velocidades de hasta 10 m/s [27], garantizando que la extracción de la señal sea robusta frente a oclusiones y cambios de ángulo.

2.3.2. Procesamiento en escala de grises y generación de vectores

Una vez aislada la ROI, la información cromática de los píxeles debe convertirse en una señal analítica.

Tras la localización, se realiza una conversión a escala de grises. Para compensar desalineaciones entre la cámara y el LED, se aplica una proyección horizontal o vertical de la ROI, sumando o promediando los valores de los píxeles para formar un vector de grises unidimensional que represente los estados «ON» y «OFF» del emisor [29].

2.3.3. Umbralización adaptativa en entornos dinámicos

La conversión del vector de grises en datos lógicos requiere definir un umbral de decisión (T). Dado que la intensidad luminosa varía con la distancia y la interferencia ambiental, los umbrales fijos son ineficaces.

2.3.3.1. Método de Otsu

Se utiliza ampliamente para maximizar la varianza entre las clases de píxeles (fondo y señal), siendo ideal para histogramas bimodales. El método de Otsu se caracteriza por ser adaptativo, evitando el uso de umbrales estáticos que fallarían ante variaciones de la iluminación natural o artificial. Este algoritmo analiza el histograma de grises de la imagen completa y calcula matemáticamente el umbral óptimo que minimiza la varianza dentro de dos clases: los píxeles del fondo (oscuros) y los píxeles de la fuente de luz (brillantes) [30].

2.3.3.2. Umbralización adaptativa local

Calcula un umbral específico para cada píxel basado en las estadísticas de su vecindario (media o ventana Gaussiana). Es fundamental para mitigar el efecto de sombras y gradientes de luz no uniformes en la escena.

A pesar de su efectividad, los umbrales globales como el de Otsu presentan limitaciones severas cuando la iluminación de la escena no es uniforme. Por ejemplo, en un escenario exterior con múltiples emisores situados a diferentes distancias o bajo condiciones de sombreado parcial, un umbral global único puede provocar la pérdida de señales tenues o generar falsos positivos por reflejos solares. Para mitigar este inconveniente, la umbralización adaptativa local no busca un umbral para toda la imagen, sino que calcula un umbral diferente para cada pequeño bloque o vecindario de píxeles. Examina una región (por ejemplo, de 11x11 píxeles) y decide el umbral basándose en la media (o la media ponderada gaussiana) de esos píxeles vecinos. Así, un LED tenue en una zona oscura de la imagen se detectará correctamente, y un LED brillante en una zona clara también [31].

2.3.4. Decodificación temporal y efecto *rolling shutter*

El mecanismo de decodificación depende del tipo de obturador de la cámara. La principal limitación operativa del modo *global shutter* radica en su exposición simultánea: al registrar la escena entera de golpe, el techo de transmisión queda anclado a la tasa de fotogramas -habitualmente entre 30 y 60 FPS-. Frente a este escenario, la captación secuencial propia del *rolling shutter* rompe dicha barrera consiguiendo velocidades de enlace significativamente mayores.

2.3.4.1. Decodificación por franjas

En sensores CMOS con *rolling shutter* (Figura 2.8), las filas de píxeles se exponen secuencialmente. Si el LED parpadea a una frecuencia superior a la tasa de

cuadros, el parpadeo se traduce en un patrón de franjas horizontales brillantes y oscuras en un solo fotograma. Cada franja representa un bit o símbolo, permitiendo alcanzar tasas de transmisión en el orden de los kilobits por segundo (kbps) con cámaras convencionales [32].

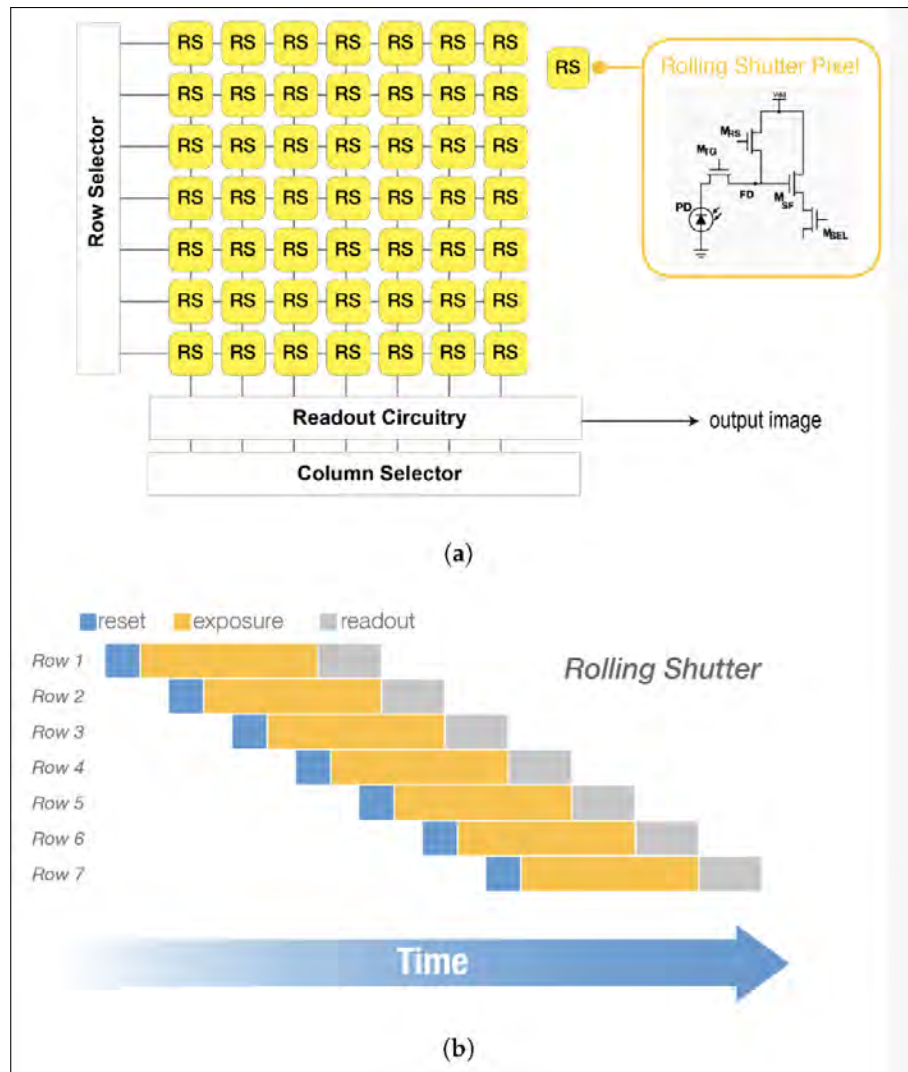


Figura 2.8: Ejemplo de sensor de *rolling shutter*. Fuente: [32].

2.3.4.2. Decodificación basada en transiciones

La decodificación basada en transiciones es una técnica diseñada para mitigar las vulnerabilidades de los receptores *rolling shutter* frente a las degradaciones de la imagen, como el desenfoque por movimiento, el desenfoque de enfoque o el

esparcimiento de la luz (light smear). A diferencia de los enfoques convencionales que dependen de medir estrictamente la anchura espacial de las franjas luminosas («ON» y «OFF») o de aplicar técnicas computacionalmente costosas como el ajuste polinómico o la ecualización de histogramas, este método fundamenta la recuperación de datos en la observación de los cambios de nivel (transiciones) entre dos pulsos de símbolos secuenciales. Específicamente, el algoritmo identifica los patrones de los pulsos: una transición de alto a bajo se decodifica como un bit «0», mientras que una transición de bajo a alto se decodifica como un bit «1». Este enfoque simplifica notablemente la carga de procesamiento del receptor y mejora la precisión de la decodificación bajo diversas condiciones de atenuación.

Para gestionar la recepción de tramas continuas y mantener la sincronización, el algoritmo evalúa la duración del segundo pulso en cada secuencia analizada para determinar si se trata de un «pulso extendido». Un pulso extendido se genera cuando se transmiten niveles idénticos de forma consecutiva (por ejemplo, dos pulsos altos seguidos) y se caracteriza por tener el doble de anchura que un pulso normal. Si el sistema detecta que este segundo pulso es un pulso extendido, lo conserva y lo reutiliza como el primer pulso para el análisis de decodificación del siguiente bit. De lo contrario, si es un pulso normal, no se incluye en la siguiente evaluación. Esta lógica secuencial elimina la dependencia de mediciones de anchura absolutas que suelen verse corrompidas por el desenfoque de la luz, permitiendo un sistema de comunicaciones robusto y computacionalmente eficiente para dispositivos móviles [29].

2.4. Tecnologías emergentes

La evolución de la OCC dentro del marco de las redes 6G ha desplazado el foco de la simple conectividad hacia sistemas inteligentes y resilientes. La reciente formalización del estándar IEEE 802.15.7a-2024 [33] marca un hito en esta disciplina, al definir perfiles para tasas de datos más altas (hasta 100 Mbps), mayores

alcances (hasta 200 m) e integración de inteligencia artificial en las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC). No obstante, la implementación práctica de estos sistemas en dispositivos comerciales sigue enfrentando obstáculos significativos en términos de estandarización de *hardware* multi-propósito, dado que la mayoría de las cámaras actuales no están diseñadas nativamente para satisfacer exigencias como la mitigación de interferencias, demodulación eficiente o la superación de los límites del *frame rate* entre otros.

2.4.1. Mitigación de interferencias por luz ambiental

Uno de los mayores obstáculos en OCC es el ruido de fondo provocado por fuentes de luz natural o artificial no modulada. Las estrategias emergentes proponen el uso de filtros espaciales y temporales avanzados. Mientras que los métodos tradicionales se basan en umbrales estáticos, las tendencias actuales se basan en la predicción matemática de cuánto se expande visualmente cada LED en el sensor según la distancia y la iluminación ambiental, estableciendo una distancia mínima de separación (en píxeles) para que las señales puedan ser demoduladas de forma paralela y sin errores [34].

2.4.2. Demodulación basada en *deep learning*

La demodulación en los sistemas de comunicaciones ópticas por cámara (OCC) ha evolucionado desde el procesamiento de imagen básico hacia modelos de aprendizaje profundo que garantizan la integridad de los datos [35]. El uso de redes neuronales convolucionales (CNN) permite que el sistema aprenda las características visuales de los estados del LED, logrando una demodulación eficiente incluso cuando la señal está degradada por el ruido óptico [36].

Además, estas arquitecturas de IA son fundamentales para gestionar sistemas complejos de múltiples fuentes (MIMO), donde el *deep learning* detecta y separa señales de diferentes LEDs que podrían solaparse debido al movimiento o

al desenfoque de la lente [37]. Un paso crítico en este proceso es la localización inteligente de la fuente de luz mediante redes neuronales, lo que permite al receptor centrarse únicamente en la región de interés (ROI) y realizar una extracción de secuencias de datos mucho más robusta que los métodos tradicionales de umbralización [38].

2.4.3. Superación de los límites del *frame rate*

El ancho de banda en OCC suele estar limitado por la frecuencia de muestreo de la cámara (f_s). Para superar el límite de Nyquist impuesto por los fotogramas por segundo (FPS) de las cámaras comerciales, se ha estandarizado el uso del efecto *rolling shutter* de los sensores CMOS.

Mediante *rolling shutter*, cada fila de píxeles se expone en instantes ligeramente diferentes, convirtiendo la variación temporal de la luz en un patrón espacial de franjas en una sola imagen. Esto permite alcanzar tasas de transmisión en el orden de los kHz utilizando cámaras de apenas 30-60 FPS [21]. Investigaciones recientes exploran el Sub-Nyquist Sampling, utilizando técnicas de *compressive sensing* para reconstruir señales de alta frecuencia a partir de muestras de baja tasa, lo que resulta idílico para sensores IoT de bajo consumo [39].

2.4.4. Demodulación por color

En lugar de solo utilizar el parpadeo de un LED (on/off), se utilizan cambios sutiles en la combinación de colores (RGB). Las cámaras modernas son excelentes detectando variaciones de crominancia, lo que permite codificar más bits por cada símbolo transmitido.

El *color shift keying* (CSK) representa una solución avanzada para la comunicación por OCC, ya que permite transmitir datos mediante la variación de las

proporciones de los colores rojo, verde y azul (RGB) sin alterar la intensidad luminosa total. Este enfoque es fundamental para eliminar el *flicker* perceptible al ojo humano, cumpliendo con los estándares de iluminación mientras se aprovechan los sensores CMOS de las cámaras modernas. Al emplear el espacio de cromaticidad CIE 1931 [40] para mapear los símbolos de información, el sistema logra una modulación multinivel eficiente que puede adaptarse a diferentes niveles de complejidad, como el 4-CSK o el 16-CSK, dependiendo de la fidelidad del sensor y las condiciones del entorno.

La implementación práctica de esta tecnología se encuentra respaldada por el estándar IEEE 802.15.7 [41], que define los parámetros físicos necesarios para garantizar la interoperabilidad en sistemas de luz visible. Investigaciones recientes han demostrado que, mediante el uso de técnicas de submuestreo y calibración precisa del color, es posible alcanzar tasas de transferencia robustas para aplicaciones de posicionamiento en interiores y transmisión de datos de baja velocidad. La bibliografía especializada destaca que el éxito de la demodulación CSK en OCC reside en la capacidad de compensar las no linealidades del sensor de imagen, permitiendo que una simple cámara de smartphone se convierta en un receptor de datos de alta precisión en entornos inteligentes [42].

2.4.5. Integración en redes 6G y sensing

En el ecosistema 6G, la OCC no solo sirve para transmitir datos, sino para «sentir» el entorno mediante un marco de detección y comunicación ópticas integradas (O-ISAC). A través de la modulación avanzada de ondas de luz y el procesamiento fotónico, se han desarrollado sistemas híbridos donde la detección de objetos y la comunicación comparten el mismo *hardware* de manera nativa [43]. Esta arquitectura permite que la luz funcione como un sensor de posicionamiento en interiores con precisión de centímetros y, simultáneamente, como un canal de descarga de datos de baja latencia para dispositivos IoT [44]. Esta convergencia tecnológica resulta fundamental para la sostenibilidad en dispositivos IoT, logran-

do la reducción de energía por bit en comparación con los sistemas tradicionales de RF.

Capítulo 3

Marco teórico

La fundamentación teórica de este trabajo se asienta en la convergencia de dos disciplinas fundamentales para la evolución del IoT: la ingeniería de telecomunicaciones y la ingeniería informática. El punto de partida es el estudio de la OWC, específicamente bajo el paradigma de la VLC. A diferencia de los sistemas de iluminación inteligente que buscan una doble función de alumbrado y transmisión, esta investigación se focaliza en el uso de diodos emisores de luz (LED) como transmisor dedicado para la transferencia de datos. Este enfoque permite aislar las variables físicas del emisor para analizar su comportamiento en entornos de sensores IoT, donde la eficiencia y la precisión en la entrega del dato son prioritarias.

El eje vertebrador de esta investigación reside en la migración hacia la tecnología OCC, una transición que reemplaza los fotorreceptores clásicos por matrices de sensores de imagen CMOS. Esta reconfiguración del enlace redefine por completo la etapa de recepción, la cual pasa a convertirse en un problema de confluencia entre la visión artificial y el procesamiento digital de señales. La gran particularidad de operar con sensores fotográficos es que la señal lumínica trasciende el análisis temporal ordinario -propio de los fotodiodos- para desdoblarse simultáneamente en el dominio espacial.

Una vez que el fenómeno físico es capturado por el sensor, el problema se trasla-

da al ámbito de la ingeniería de *software* y el desarrollo de sistemas distribuidos. El proceso de decodificación digital no es un fin en sí mismo, sino el primer paso de una arquitectura de datos compleja. El desarrollo de algoritmos capaces de procesar los fotogramas en tiempo real, identificar las regiones de interés y extraer la carga útil del mensaje es lo que permite tender un puente hacia las capas superiores de la pila tecnológica. En este contexto, el desarrollo de *software* se vuelve indispensable para transformar señales luminosas en tipos de datos estructurados que puedan ser consumidos por otras aplicaciones. Esta integración exige un conocimiento profundo sobre la eficiencia algorítmica y la gestión de recursos en el sistema encargado de la decodificación.

El ciclo del dato se cierra al levantar una infraestructura *full-stack* orientada a la monitorización en vivo. Volcar los registros obtenidos mediante OCC en un entorno web trasciende la mera captura; exige orquestar soluciones robustas frente a problemas de latencia, concurrencia y persistencia de la información. Al integrar arquitecturas de *backend* modernas y protocolos bidireccionales, se garantiza la disponibilidad remota de las métricas. Esta aproximación consolida la tesis del proyecto: la viabilidad de la tecnología óptica no se limita a la respuesta física de un emisor LED, sino que demanda una cohesión absoluta —capa por capa— hasta alcanzar la lógica de negocio en la aplicación final.

3.1. El canal físico

La propagación de la señal en un canal OCC se produce mayoritariamente en escenarios de línea de visión directa, donde no existen obstáculos entre el emisor LED y el sensor CMOS. En este tipo de canal, la luz se propaga en el espacio libre siguiendo un modelo de radiación lambertiano, lo que implica que la potencia recibida depende de la distancia y del ángulo de emisión. La eficiencia de este enlace óptico viene determinada por la ecuación del enlace, donde la irradiancia disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia. No obstante, en sistemas basados en cámaras, la óptica de la lente juega un papel compensa-

dor fundamental, ya que es capaz de concentrar los fotones provenientes de una fuente puntual en un área reducida de la matriz de píxeles, manteniendo la viabilidad de la comunicación incluso a distancias donde un fotodiodo convencional presentaría una relación señal-ruido insuficiente [45].

Uno de los principales retos técnicos en este canal es la alineación geométrica entre los dispositivos. A diferencia de las radiofrecuencias, donde las antenas pueden ser omnidireccionales, la comunicación óptica es altamente directiva. El rendimiento del sistema está condicionado tanto por el ángulo de salida del emisor como por el FoV de la cámara. Una desalineación mínima o una rotación del sensor pueden provocar que el LED se desplace hacia fuera del fotograma, donde la distorsión de la lente y la viñetación reducen drásticamente la intensidad percibida [11]. Además, el tamaño proyectado del LED en el sensor disminuye con la distancia; si la fuente de luz ocupa muy pocos píxeles, la capacidad de recuperar el patrón de franjas del sensor se ve comprometida, estableciendo un límite físico a la resolución espacial de la señal, punto en el cual las técnicas de *rolling shutter* dejan de ser viables, requiriéndose entonces algoritmos de procesamiento sub-píxel [46].

El canal físico se ve degradado por fuentes de interferencia externas, siendo la iluminación ambiental el factor más crítico. La luz solar o la iluminación artificial preexistente actúan como un ruido de fondo constante que eleva el nivel de corriente de oscuridad y el ruido de disparo (shot noise) en el sensor [45]. Esta saturación del canal óptico puede enmascarar las rápidas conmutaciones del LED de datos, reduciendo el contraste de los patrones capturados [16]. Por tanto, el diseño del sistema OCC debe considerar técnicas de filtrado óptico o algoritmos de compensación en el *software* de recepción para diferenciar la señal modulada del flujo luminoso estático del entorno, garantizando así la integridad de la información en condiciones de operación reales [45, 23, 46].

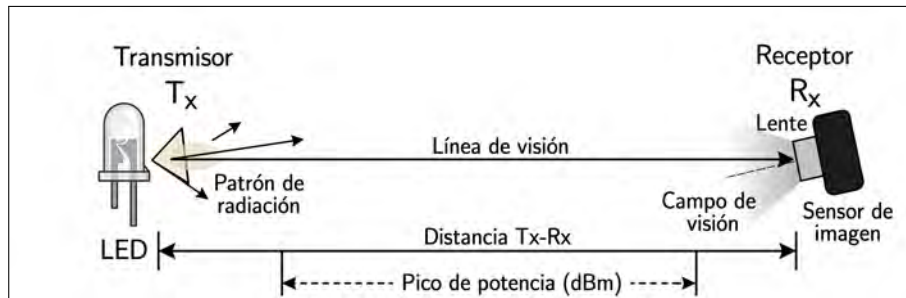


Figura 3.1: Representación del canal de comunicación por luz visible.

3.2. Técnicas de adquisición de sensores de imagen (RS vs. GS)

La eficiencia de un sistema de comunicación OCC depende intrínsecamente del mecanismo de exposición del sensor de imagen. En el contexto de los sensores IoT, existen dos arquitecturas predominantes para la captura de fotogramas: *rolling shutter* (RS) y *global shutter* (*global shutter* (GS)), cuyas diferencias operativas alteran radicalmente la forma en que se recupera la información modulada en la fuente LED.

3.2.1. Patrones espaciales frente a muestreo temporal

El proceso de adquisición mediante *rolling shutter* se caracteriza por una exposición secuencial de las líneas de píxeles del sensor. Dado que cada fila comienza y termina su exposición en instantes ligeramente desplazados, si la fuente de luz LED conmuta a una frecuencia superior a la de refresco de la cámara, el sensor traduce las variaciones temporales de la luz en un patrón de franjas horizontales claras y oscuras en una sola imagen (Danakis et al., 2012 [12]). Este fenómeno, a menudo considerado un defecto en fotografía convencional, permite en OCC aumentar la tasa de datos, ya que una sola captura contiene múltiples muestras del estado del canal, convirtiendo el sensor en un receptor de banda ancha mediante procesamiento espacial (ver Figura 3.2, parte izquierda) [20].

Por el contrario, el mecanismo de *global shutter* expone todos los píxeles de la matriz simultáneamente. En este escenario, no se generan patrones de franjas; el sensor actúa como un fotodiodo de gran área que captura un único valor de intensidad lumínica por cada fotograma. Aquí, la recepción se convierte en un proceso de muestreo puramente temporal, donde la información se decodifica comparando la intensidad media entre fotogramas sucesivos (ver Figura 3.2, parte derecha)[11].

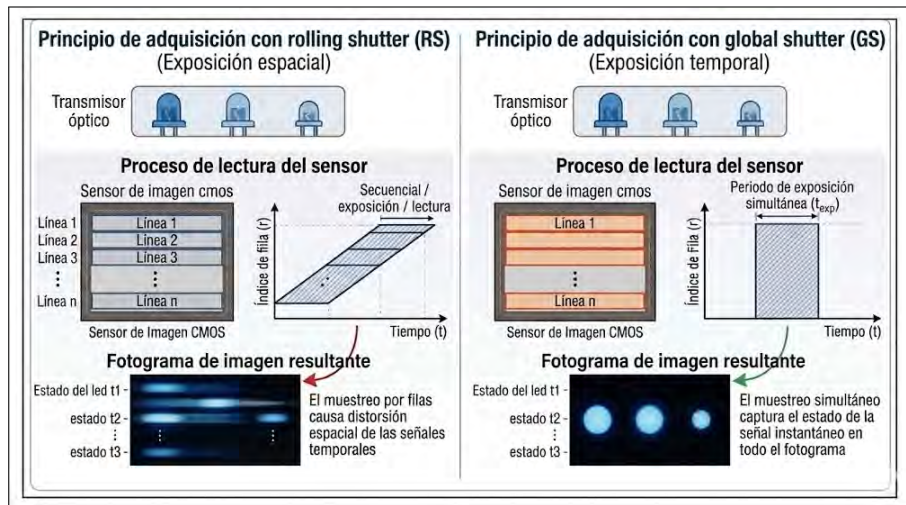


Figura 3.2: Comparativa de los principios de adquisición RS y GS en sistemas OCC: Exposición espacial frente a temporal. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Justificación de *global shutter* en dispositivos IoT de bajo consumo

Para nodos sensores en el ecosistema IoT, la implementación de receptores basados en *global shutter* presenta ventajas críticas en términos de robustez y simplicidad de procesamiento. Mientras que RS exige algoritmos complejos de segmentación de imagen y corrección de distorsiones geométricas para extraer los bits de las franjas, GS permite una demodulación mucho más ligera, ideal para microcontroladores con recursos limitados [47]. En esta configuración, la frecuencia de muestreo del sistema (f_s) queda estrictamente vinculada a la tasa de refresco o frame rate de la cámara (f_{fps}), cumpliéndose que:

$$f_s = f_{fps}$$

Esta relación implica que el sensor debe ser capaz de procesar y transferir fotografías a una velocidad constante para mantener el sincronismo con el transmisor. En dispositivos de bajo consumo, esta tasa suele ser reducida (típicamente entre 30 y 60 FPS), lo que condiciona la velocidad de transmisión, pero garantiza una mayor estabilidad en la recepción a largas distancias y una menor sensibilidad al desenfoque en comparación con las técnicas de RS.

3.2.3. Limitaciones de sub-muestreo y el criterio de Nyquist

El principal desafío técnico del uso de sensores GS en IoT es la limitación del ancho de banda impuesta por el *hardware*. De acuerdo con el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, para recuperar íntegramente una señal analógica, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal transmitida (f_{max}):

$$f_s \geq 2 \cdot f_{max}$$

Sin embargo, debido a que las cámaras comerciales operan a frecuencias de cuadro muy bajas en comparación con las frecuencias de conmutación de los LED (que deben superar los 100 Hz para evitar el parpadeo perceptible o *flicker*), los sistemas GS a menudo operan en un régimen de sub-muestreo [48].

Esta restricción de *hardware* actúa como un filtro paso-bajo inherente que limita severamente el ancho de banda del canal y, por ende, la tasa de símbolos alcanzable. Si la frecuencia de los símbolos excede el límite de Nyquist definido por el *hardware* de la cámara ($f_{fps}/2$), se produce aliasing, lo que imposibilita la recuperación de la señal a menos que se utilicen técnicas de modulación específicas, como el Undersampled Phase Shift ON-OFF Keying (UPSOK), diseñadas para

aprovechar las réplicas espectrales del sub-muestreo [48]. En conclusión, el *throughput* del sensor IoT queda estrictamente limitado por las capacidades de transferencia del bus de datos y por el tiempo de exposición del sensor de imagen.

3.3. Fundamentos del procesamiento digital de imágenes

El procesamiento de imágenes en los receptores de comunicación VLC basados en sensores de imagen (OCC) constituye el núcleo que permite transformar la información lumínica en datos digitales. A diferencia de los receptores VLC convencionales que utilizan fotodiodos dedicados, los sistemas OCC se enfrentan al reto de procesar matrices bidimensionales completas de píxeles. Esto requiere estrategias de visión artificial altamente eficientes para minimizar la carga computacional, un factor crítico cuando se integra en arquitecturas limitadas en recursos como los dispositivos IoT (Hassan et al., 2018 [49]). Las operaciones fundamentales para lograr esta decodificación se describen a continuación.

3.3.1. Conversión a escala de grises

El primer paso estándar en la cadena de recepción es la conversión del fotograma capturado en formato cromático (típicamente RGB) a una escala de grises. Dado que la inmensa mayoría de sistemas OCC codifican los datos modulando únicamente la intensidad de la luz (por ejemplo mediante OOK), la información de color suele resultar redundante. Al transformar la imagen, cada píxel pasa a representar un único valor de intensidad o luminancia [49]. Este procedimiento no solo reduce drásticamente el uso de memoria y los ciclos de procesamiento del nodo IoT, sino que también facilita el análisis de los gradientes de luz espaciales, como las características franjas claras y oscuras generadas cuando se

utilizan cámaras con *rolling shutter* [16].

3.3.2. Umbralización (Thresholding)

Una vez obtenida la matriz de intensidades lumínicas, se aplica un proceso de umbralización para binarizar la imagen y discernir los niveles lógicos (bits «1» y «0») transmitidos por la fuente de luz. Históricamente, se han implementado métodos de umbralización global basados en histogramas, siendo el método de Otsu uno de los más extendidos para determinar el punto de corte óptimo (Kawade et al., 2021 [50]). Sin embargo, en despliegues reales de IoT, las fluctuaciones de la luz ambiental, los reflejos y la atenuación de la señal óptica con la distancia hacen que un umbral fijo degrade severamente la tasa de error de bit (BER). Para solventar este problema, la literatura reciente propone arquitecturas de umbralización adaptativa o enfoques basados en segmentación de píxeles mediante deep learning que logran clasificar el estado de los píxeles incluso en escenarios con severas restricciones de iluminación y ruido de fondo (Osman Ali et al., 2025 [51]).

3.3.3. Extracción de la región de interés (ROI)

La extracción de la ROI se define como el proceso de segmentación espacial encargado de delimitar el área del sensor de imagen que contiene la información útil proveniente del transmisor óptico. Dado que un sensor de imagen captura una matriz de datos masiva, procesar el fotograma completo para extraer los símbolos de luz es computacionalmente ineficiente. Para un nodo IoT con recursos de procesamiento y energía limitados, la identificación precisa de la ROI es el primer paso crítico para reducir el volumen de datos a una submatriz que contenga exclusivamente el área del LED, permitiendo así que el resto de la cadena de decodificación opere con una latencia mínima [52].

A pesar de que la extracción de la ROI es el factor determinante en el rendimiento de un sistema OCC, las técnicas convencionales suelen presentar una complejidad computacional elevada que compromete el procesamiento en tiempo real. Para abordar esta limitación, investigaciones recientes proponen esquemas de división virtual en rejilla (grid virtual division), los cuales optimizan la eficiencia de localización basándose en la disparidad de valores de luminancia entre el emisor y el fondo (Hu et al., 2022 [26]).

Dado que el transmisor proyecta una intensidad lumínica significativamente superior a la del entorno, las áreas que contienen la ROI presentan valores en escala de grises mucho más elevados. El principio de operación de este esquema rápido se fundamenta en la coherencia espacial: si se identifica un píxel con un valor de brillo por encima de un umbral determinado, y dicho nivel se mantiene en un entorno adyacente de ± 10 píxeles, se confirma la presencia de una ROI con símbolos de comunicación [26]. Este método de «escaneado por vecindad» permite localizar la fuente de manera acelerada sin necesidad de analizar cada píxel del fotograma de forma exhaustiva.

Una de las ventajas de este enfoque para dispositivos IoT es su versatilidad morfológica. El algoritmo es capaz de identificar y encuadrar emisores con diversas geometrías (circulares, cuadrados o rectangulares), lo que resulta esencial en entornos industriales donde se pueden emplear distintos tipos de luminarias LED como transmisores. Al segmentar la imagen en estos cuatro pasos fundamentales —captura, detección de picos de intensidad, validación de vecindad y encuadre—, se logra una reducción drástica de la latencia, permitiendo que la información útil sea extraída y entregada a la etapa de decodificación con una carga mínima para el procesador del nodo receptor [26].

3.4. Protocolos de enlace de datos y lógica de decodificación

El empaquetado de datos en OCC representa el proceso crítico de organizar los bits de información en unidades estructuradas denominadas tramas o paquetes. Esta organización no es meramente administrativa; es la base que permite al receptor identificar el inicio de una transmisión, distinguir entre diferentes emisores en un entorno de difusión y validar la integridad de la información recibida bajo condiciones de ruido óptico.

3.4.1. Estructura de la trama y campos de control

En un sistema OCC eficiente, la estructuración de la información debe equilibrar la sobrecarga (*overhead*) con la robustez. Una unidad de datos de protocolo (PDU) típica en OCC se divide en tres segmentos principales: el preámbulo, el encabezado (*header*) y el cuerpo de datos o carga útil (*payload*), junto con mecanismos de detección de errores [33].

■ Preámbulo

El preámbulo es una secuencia de bits conocida que precede a cada trama. Su función principal es permitir que la cámara detecte la presencia de una señal y realice la sincronización inicial. En sistemas que operan bajo el estándar IEEE 802.15.7a-2024, el preámbulo se utiliza no solo para la detección, sino también para la estimación del canal, permitiendo al receptor compensar las distorsiones introducidas por el medio óptico.

■ Encabezado

El encabezado (*header*) actúa como el centro de control del paquete. Contiene metadatos cruciales, como el esquema de modulación empleado (por ejemplo, On-Off Keying - OOK o Manchester), la tasa de reloj de la señal

y la longitud de la carga útil. La importancia del encabezado radica en su capacidad para informar al receptor sobre cómo interpretar el flujo de bits subsiguiente, lo que permite una decodificación adaptativa según las condiciones del canal [53].

- **Carga útil (*payload*)**

Contiene la información que se quiere transmitir.

- **Mecanismos de detección de errores**

Dada la naturaleza del canal OCC, propenso a interferencias de otras fuentes de luz, la implementación de mecanismos de detección de errores en la capa de enlace es obligatoria. Sin embargo, para mantener la eficiencia del receptor, se priorizan las técnicas «ligeras» que consumen pocos recursos de *hardware*.

3.4.1.1. Decodificación basada en correlación

La identificación de patrones válidos dentro del flujo de datos capturado por la cámara es un reto técnico mayor, dado que las imágenes suelen estar contaminadas por ruido térmico, luz ambiental y distorsiones causadas por el movimiento. La decodificación basada en correlación se presenta como la base teórica más robusta para resolver este problema, ofreciendo una solución que equilibra la precisión con la simplicidad computacional [54].

La demodulación por correlación se basa en los siguientes pilares:

1. **Uso de plantillas**

El receptor tiene almacenada una copia ideal de las formas de onda posibles (por ejemplo, cómo debería verse un «1» lógico y un «0» lógico tras pasar por el canal óptico). A esto se le llama filtro adaptado (Matched Filter).

2. **Operación matemática de correlación**

Para cada fragmento de la señal recibida $R(t)$, el sistema calcula la correlación con la plantilla $P(t)$. Matemáticamente, se busca maximizar la similitud:

$$C(k) = \sum_{\text{Suma de Productos}} R(i) \underbrace{P(i-k)}_{\text{Desplazamiento}}$$

Si el resultado de esta operación (el pico de correlación) supera un valor crítico, el sistema decide que ese bit fue transmitido.

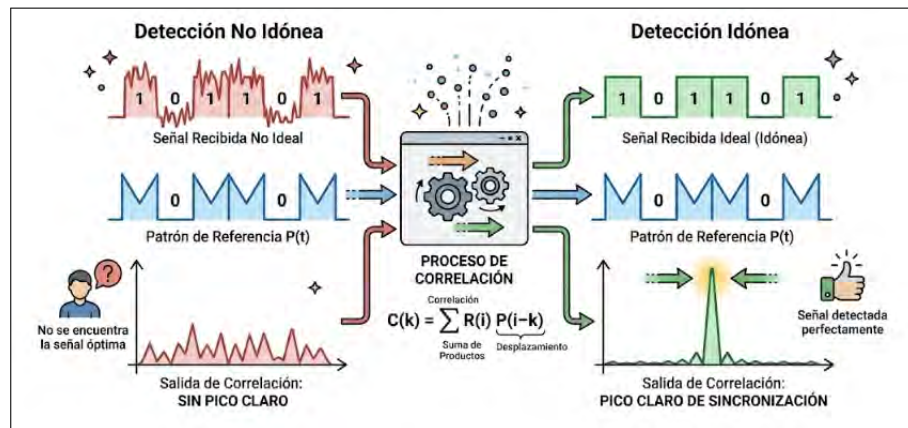


Figura 3.3: Comparativa del mecanismo de sincronización por correlación cruzada. El proceso evalúa la similitud deslizando un patrón de referencia conocido a lo largo de la trama recibida; el éxito de la alineación temporal se evidencia con la aparición de un pico de energía máximo -o su ausencia, en escenarios de detección fallida- a la salida del correlador.

3. Resistencia al ruido y la interferencia

A diferencia de la detección directa, la correlación es extremadamente robusta porque:

- **Filtra el ruido blanco:** El ruido aleatorio no suele «correlacionar» bien con la plantilla, por lo que se cancela parcialmente.
- **Mitiga el flicker:** Permite separar la señal de datos de la iluminación ambiental constante o de otras fuentes de interferencia que no siguen el patrón esperado.

4. Simplicidad computacional y eficiencia en el receptor

Una de las ventajas más críticas de la decodificación basada en correlación es que permite mantener el receptor mucho más simple que las alternativas que exigen una alta carga computacional, como las redes neuronales profundas (red neuronal profunda (DNN)) o los clasificadores basados

en aprendizaje automático (aprendizaje automático (ML)). Mientras que un modelo de *deep learning* como YOLO o una CNN requiere miles de operaciones de multiplicación y suma (operaciones de multiplicación y acumulación (MACs)) a través de múltiples capas para identificar una región de interés o decodificar un símbolo, el método por correlación puede implementarse eficientemente en *hardware* no muy potente [55].

Esta eficiencia es vital en aplicaciones de IoT donde el receptor puede ser un dispositivo con recursos limitados. Además, la decodificación por correlación es intrínsecamente más rápida, lo que reduce la latencia de procesamiento.

3.4.2. Sincronización de símbolos y recuperación de límites de bit

Tras la detección exitosa de la trama mediante correlación, el sistema debe enfrentarse al proceso de sincronización de símbolos. Este proceso es fundamental para determinar el límite exacto del primer bit válido y asegurar que el muestreo de los bits subsiguientes se realice en el centro del intervalo de bit, minimizando la interferencia intersimbólica (ISI).

3.4.2.1. Proceso de sincronización tras la detección del preámbulo

La sincronización de símbolos es un proceso de precisión que busca alinear el reloj interno del receptor con la fase de la señal óptica entrante. Una vez que el preámbulo termina, el receptor debe saber exactamente cuándo comienza el primer bit de información. En los sistemas tradicionales, esto se logra buscando caracteres especiales de inicio de texto (STX), pero en OCC, dadas las variaciones en la tasa de captura de fotogramas, se requieren métodos más dinámicos [56].

3.5. Servicio web y API

Para garantizar que los datos capturados mediante la comunicación VLC-OCC sean consumibles por aplicaciones externas en tiempo real, es necesario establecer una arquitectura de *software* robusta en la capa de aplicación. Esta sección detalla los pilares tecnológicos seleccionados para la exposición y consumo de los datos de los sensores IoT.

3.5.1. Arquitectura RESTful

La elección de REST (Representational State Transfer) como estilo arquitectónico se fundamenta en su capacidad de desacoplar el cliente del servidor, permitiendo que la infraestructura del dispositivo controlador OCC funcione de manera independiente a la interfaz de visualización de los datos. Los principios clave aplicados son:

- **Sin estado (Stateless application)**

Cada petición HTTP desde el cliente (el dashboard web) contiene toda la información necesaria para procesar la solicitud, facilitando la escalabilidad del sistema.

- **Interfaz uniforme**

Se utilizan recursos identificados mediante URIs (ej. `/api/v1/sensors/light`), permitiendo una interacción predecible y estandarizada.

3.5.2. Protocolo de comunicación HTTP

El protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol) actuará como vehículo de transporte en la arquitectura. Para la naturaleza de este proyecto, se definen los siguientes métodos de operación:

- **GET:** Utilizado por la interfaz web para solicitar el estado actual de los sensores tras la decodificación de los frames de vídeo.
- **POST:** Empleado por el dispositivo de procesamiento OCC para enviar los datos ya demodulados hacia el servidor.

3.5.3. Serialización de datos con JSON

Dada la necesidad de una visualización en tiempo real, la eficiencia en el intercambio de datos es crítica. Se ha seleccionado JSON (JavaScript Object Notation) como formato de serialización por las siguientes ventajas:

- **Bajo *overhead*:** A diferencia de XML, JSON reduce el tamaño de los paquetes de datos, minimizando la latencia en la red.
- **Interoperabilidad y serialización:** La capacidad de JSON para representar estructuras de datos complejas mediante pares clave-valor facilita la integración entre el nodo de procesamiento y la interfaz de usuario. En este trabajo, los metadatos extraídos de la comunicación VLC —tales como el ID del sensor, el valor de la magnitud física y el timestamp— son encapsulados en objetos JSON. Este formato permite que frameworks de alto rendimiento consuman la información mediante peticiones asíncronas, asegurando una sincronización fluida entre la captura de los frames de vídeo y su despliegue en el dashboard en tiempo real.

3.5.4. Motivación del diseño para visualización en tiempo real

El diseño de la capa de aplicación busca transformar una señal física (luz parpadeante capturada por el sensor de imagen) en un flujo de información digital estructurado. La combinación de estos servicios web permite que el sistema no solo sea una prueba de concepto de comunicaciones ópticas, sino un sistema IoT funcional donde:

1. El sensor de imagen captura el flujo de datos VLC.
2. El algoritmo OCC decodifica la información.
3. Un servicio API encapsula estos datos en objetos JSON.
4. Por su parte, el servidor web procesa las peticiones HTTP extrayendo el *payload* en formato JSON, y gestiona la persistencia de la información en una base de datos de series temporales para su almacenamiento a largo plazo o su representación en tiempo real.

Capítulo 4

Metodología

Dado que el objetivo principal de este trabajo de fin de máster consiste en realizar un análisis experimental de la viabilidad de la tecnología OCC como interfaz de comunicación para nodos IoT, optimizar los parámetros de captura de la cámara para garantizar la integridad de los datos físicos transmitidos y, finalmente, desarrollar un ecosistema que permita la adquisición, transmisión y almacenamiento de variables sensorizadas; en este capítulo se detalla la metodología y los materiales empleados.

En primer lugar, se describe el diseño del nodo transmisor, basado en la modulación del estado de un LED a partir de las lecturas de una magnitud física real. A continuación, se especifica la configuración del receptor óptico y el entorno experimental diseñado para las pruebas de transmisión. Por último, se detallan las técnicas de procesamiento de imagen aplicadas para la demodulación de la señal y el flujo de trabajo implementado para la publicación y persistencia de los datos en un servidor centralizado. Cabe destacar que los protocolos específicos y la configuración de cada escenario de prueba se detallan de forma pormenorizada en los casos de estudio presentados en los capítulos posteriores.

4.1. Arquitectura del sistema

La arquitectura que se presenta en este capítulo ha sido diseñada para evaluar la viabilidad de un enlace OCC en la transmisión de datos de baja tasa binaria. A diferencia de las implementaciones más comunes en la literatura que explotan el efecto RS para aumentar la velocidad de datos, este diseño apuesta por operar la cámara en un modo equivalente a GS. Aunque el sensor CMOS empleado funciona físicamente mediante barrido de líneas, al ser la velocidad de transmisión de datos significativamente inferior a la velocidad de fotogramas de la cámara, la intensidad de la señal luminosa permanece constante durante la captura completa de cada frame. Esta decisión técnica busca por un lado eliminar las distorsiones geométricas y los artefactos espaciales intrínsecos al barrido de líneas, permitiendo un análisis basado en la variación temporal de la intensidad luminosa de toda la matriz de píxeles de forma síncrona. Por el otro, este enfoque resulta especialmente adecuado dado que los requisitos de caudal de datos para este escenario son moderados, priorizando la robustez de la recepción sobre una alta velocidad de transferencia.

Para facilitar la comprensión del flujo de información y la interacción entre los componentes *hardware* y *software*, el sistema se ha estructurado en un modelo de cuatro etapas funcionales. Este modelo cubre el ciclo de vida completo del dato: desde su captación como magnitud física en el nodo sensor, pasando por su propagación a través del canal óptico inalámbrico, hasta su recepción, procesamiento y posterior exposición en una infraestructura de red para su consumo por aplicaciones finales.

Mirando de izquierda a derecha la Figura 4.1, el sistema de comunicación se inicia en el extremo emisor con el sensor DFRobot LM35 v4, el cual mide la temperatura ambiental y genera una señal analógica de voltaje. Esta señal es recibida por el microcontrolador NodeMCU, encargado de digitalizar el voltaje mediante su conversor analógico-digital y estructurar la información en paquetes binarios. Acto seguido, este flujo eléctrico digital se utiliza para conmutar un diodo LED, el

cual parpadea, transformando los datos en pulsos de luz que viajan a través de un canal inalámbrico óptico.

En el extremo receptor, una Raspberry Pi coordina la captura y el procesamiento de la señal. Primero, un sensor de imagen captura la luz del LED y genera un flujo de vídeo compuesto por una secuencia de fotogramas. Posteriormente, la Raspberry Pi procesa digitalmente estos fotogramas para decodificar los datos, identificando los cambios de luz y reconstruyendo el paquete original de temperatura. Finalmente, la información recuperada se envía a un servidor con base de datos para su almacenamiento y análisis.

A continuación se describen detalladamente cada una de estas etapas, especificando los dispositivos empleados, los protocolos de comunicación y la lógica de procesamiento de señales aplicada en cada una.

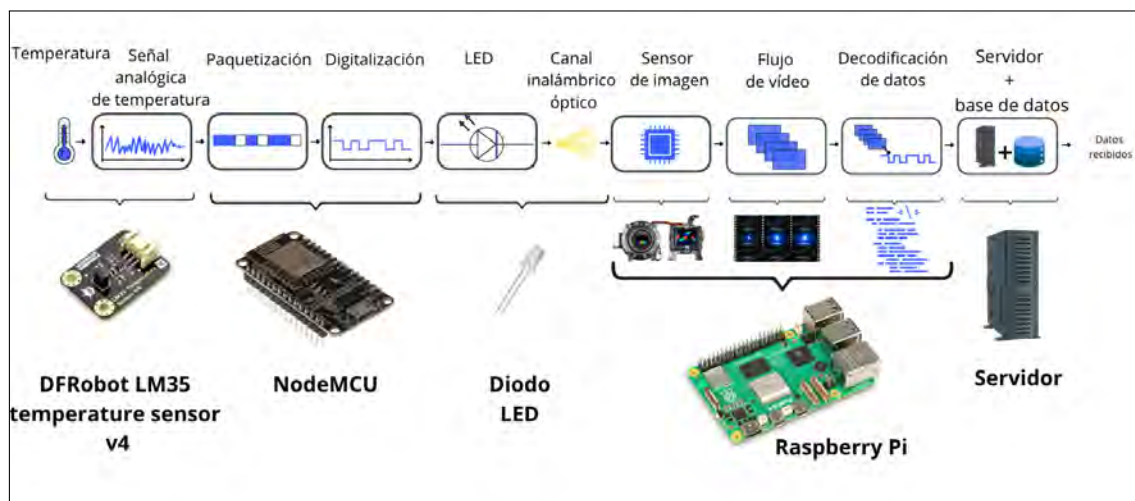


Figura 4.1: Diagrama de bloques general del experimento de comunicación OCC realizado junto a los dispositivos involucrados.

4.2. Etapas del sistema

4.2.1. Primera etapa: captación de la magnitud física

En esta etapa inicial, el objetivo es convertir una variable analógica del entorno (temperatura) en una señal eléctrica procesable que posteriormente será codificada para su transmisión mediante luz visible.

4.2.1.1. Selección del *hardware*: El sensor LM35

Para este análisis experimental, se ha seleccionado el sensor de temperatura LM35 en su versión DFRobot Gravity v4 (Figura 4.2). Esta elección se fundamenta en tres pilares críticos para un nodo sensor IoT:

- **Linealidad:** A diferencia de los termistores NTC, el LM35 ofrece una salida de voltaje linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius.
- **Calibración de fábrica:** El chip viene calibrado directamente en Celsius, lo que elimina la necesidad de procesamiento complejo en el microcontrolador.
- **Bajo consumo:** Opera con corrientes típicas inferiores a 60 μA , ideal para dispositivos IoT.

4.2.1.2. Especificaciones del sensor y funcionamiento

El corazón del módulo es el integrado LM35DZ de Texas Instruments. Su principio de funcionamiento se basa en la variación de la tensión base-emisor de los transistores ante cambios térmicos. La característica técnica más relevante para el diseño del sistema es su factor de escala: 10 mV/°C

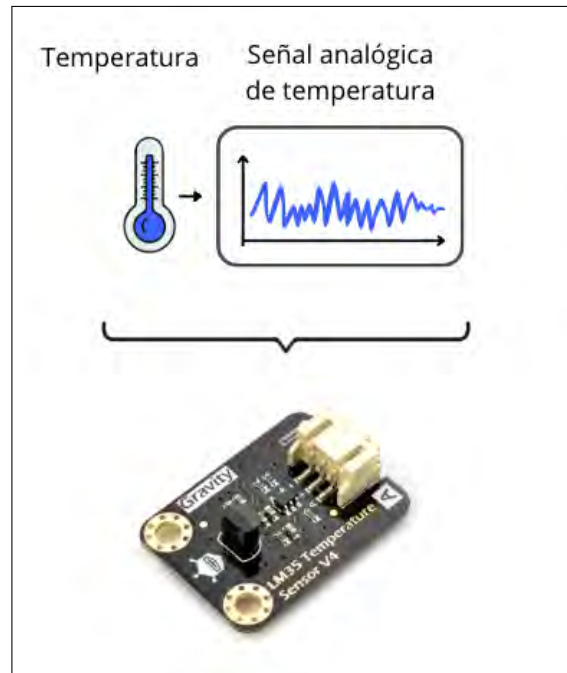


Figura 4.2: Sensor de temperatura LM35 de DFRobot v4.

Esto significa que por cada grado Celsius que aumente la temperatura, el sensor incrementará su salida en 10 mV. El rango de medición oscila entre 0 °C y 100 °C con una precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

4.2.1.3. Diagrama de conexión

El LM35 ofrece un rango funcional de entre 0 °C y 100 °C, con una sensibilidad de 10 mV/°C. En la siguiente tabla se muestra el diagrama de conexión:

LM35 Pin	Uso
VCC	Alimentación
GND	Tierra
Out / Signal	Salida analógica

Tabla 4.1: Resumen de pines del LM35.

4.2.1.4. Implementación del DFRobot v4

El módulo v4 de DFRobot facilita la conexión mediante una interfaz Gravity de 3 pines (A Señal, + VCC y - GND), ver Figura 4.3. Al ser un sensor analógico, es fundamental asegurar que el voltaje de alimentación sea estable, ya que cualquier fluctuación en la línea de 5V/3.3V afectará directamente a la precisión de la lectura del conversor analógico-digital (ADC) y, por ende, a los datos transmitidos por el enlace OCC.

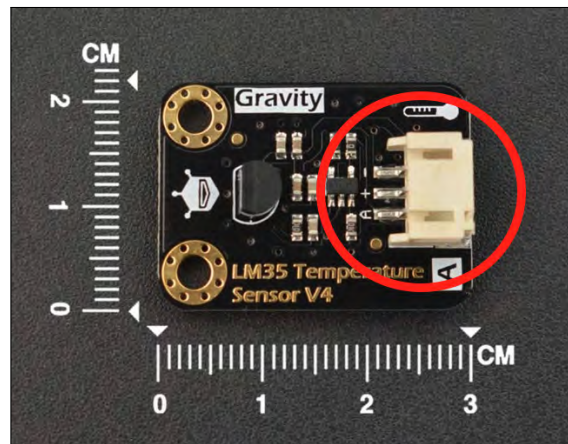


Figura 4.3: Conector de 3 pines del LM35 DFRobot v4.

4.2.2. Segunda etapa: Transmisor

En esta etapa se describe el proceso de captación, adecuación, codificación y conversión de los datos captados por el sensor en señales lumínicas. El transmisor (ver Figura 4.4) actúa como el puente entre el mundo físico analógico y el canal inalámbrico óptico.

4.2.2.1. Selección del *hardware* del transmisor

Para esta parte del desarrollo del análisis experimental se han seleccionado componentes que permiten un control estricto de la temporización, factor crítico en la tecnología OCC:

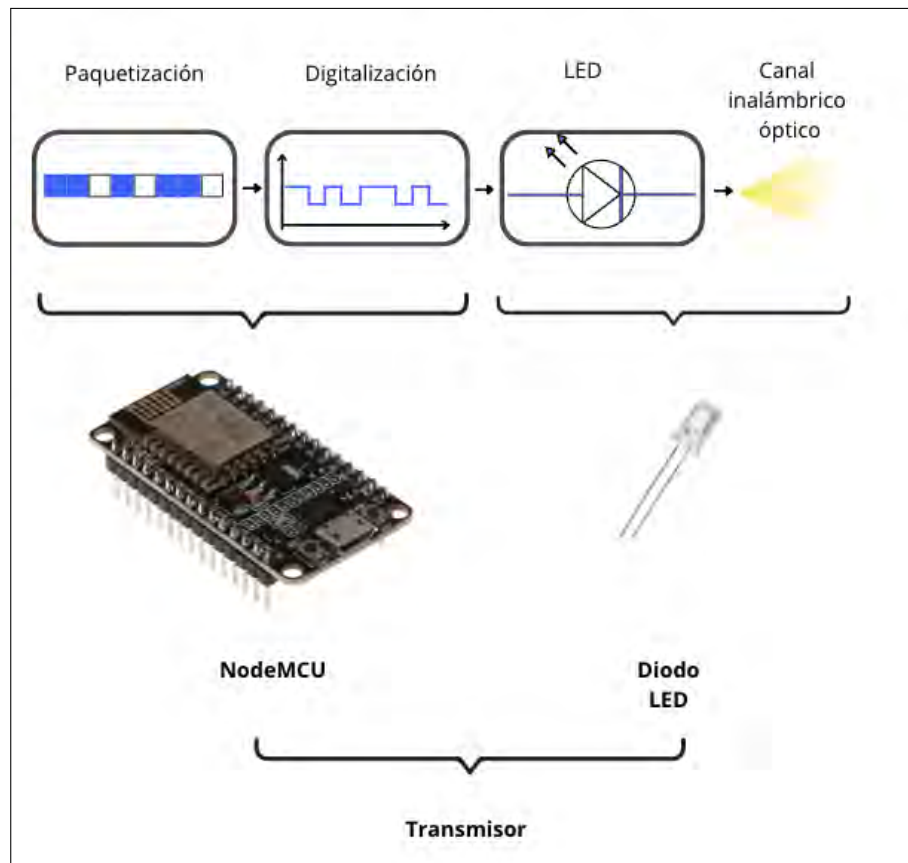


Figura 4.4: Diagrama de bloques del transmisor.

- **Microcontrolador NodeMCU v1.0:** Se ha optado por el módulo ESP12-E (NodeMCU v1.0). Esta plataforma, basada en el SoC ESP8266, ofrece las siguientes ventajas:
 - **Velocidad de reloj:** Su capacidad de operar a 80 MHz permite una granularidad mucho mayor en la creación de los anchos de pulso para la modulación.
 - **Voltaje de operación:** Al trabajar a 3.3V, se alinea con el estándar del sensor utilizado.
 - **Ecosistema IoT:** Su stack TCP/IP integrado permite que, en fases futuras, este nodo pueda reportar su estado vía Wi-Fi simultáneamente a la transmisión por luz visible.
- **Fuente de emisión (LED):** La elección de la fuente emisora de luz para el sistema OCC se ha decantado por un LED de tipo DIP de 5mm debido a

una combinación de factores técnicos y operativos que lo hacen ideal para este análisis experimental. A pesar de la evolución hacia tecnologías de montaje superficial, este encapsulado se mantiene como un estándar plenamente vigente por su extraordinaria versatilidad y presencia masiva en la industria, lo que asegura una integración sencilla en multitud de dispositivos y una disponibilidad constante en el mercado.

Una de las ventajas más determinantes de este componente es su bajo consumo en comparación con otros tipos de encapsulados de alta potencia. Al presentar unos límites máximos absolutos de disipación de potencia de 100 mW y una corriente directa máxima de 20 mA según el fabricante, el LED se presta para operar en regímenes de muy baja potencia. Concretamente, en la fase experimental detallada en el Capítulo 5, el emisor se excita deliberadamente con una corriente directa reducida de apenas 2,17 mA (con una potencia instantánea disipada de 6,52 mW). Esto garantiza una gestión energética eficiente que es prioritaria en sistemas de transmisión de datos donde no se busca una iluminación ambiental, sino una fuente de señal precisa y de bajo impacto térmico.

Aunque su flujo luminoso es discreto, con aproximadamente 2 lúmenes, esta característica refuerza su idoneidad como indicador luminoso y canal de comunicación, donde la fidelidad de la conmutación y el ahorro de energía prevalecen sobre la potencia de iluminación.

Se muestran las características de este diodo LED en la Tabla 4.2.

Especificación	valor / rango
Características eléctricas	
Intensidad de corriente	20 mA
Temperatura de trabajo	-30 ~ 80 °C
Vida útil	50.000 h
Características físicas	
Diámetro	5 mm
Características ópticas	
Color	Azul
Longitud de onda	465 nm
Apertura del haz	30°
Flujo lumínico	2 lm
Intensidad lumínica por chip	7500 mcd
Eficiencia lumínica	20 lm/W
Dimable	Sí

Tabla 4.2: Tabla de características del diodo LED azul.

4.2.2.2. Especificaciones del transmisor y funcionamiento

A continuación se detallan los componentes y la lógica de operación de la etapa transmisora, la cual constituye el primer eslabón de la cadena de comunicación VLC-OCC. El objetivo es capturar la variable física analógica y convertirla en una señal óptica modulada capaz de ser procesada por un receptor basado en OCC.

Para llevar a cabo la adquisición de datos se utiliza, como se ha descrito anteriormente, el microcontrolador NodeMCU que actúa como la unidad central de procesamiento, encargándose de transformar las variaciones de tensión enviadas por el sensor de temperatura en información digital.

La lectura se realiza a través del pin A0 (ver Figura 4.5), el único pin de entrada

analógica disponible en este dispositivo. Internamente, el NodeMCU dispone de un ADC. Cuando el sensor entrega una señal de voltaje (entre 0V y 1V), el ADC cuantifica esta magnitud eléctrica en 1024 niveles distintos.

Esta segmentación permite que cada incremento en el valor digital represente una fracción mínima del voltaje total ($V_{ref}/1024$), proporcionando una fidelidad suficiente para monitorizar los cambios de temperatura (ver precisión del sensor de temperatura en la sección 4.2.1.2).

Una vez que el dato analógico ha sido digitalizado, no se envía de forma aislada. Para garantizar que el receptor OCC pueda identificar, sincronizar y validar la información entre los pulsos de luz, el dato se encapsula en una trama de datos que se explica más adelante (ver sección 4.3 Diseño de la capa de enlace de datos).

4.2.2.3. Diagrama de conexión

El flujo de operación comienza con la adquisición de datos a través del sensor LM35. La señal analógica proporcional a la temperatura se introduce en el pin A0 (ADC0) del NodeMCU, donde el convertidor analógico-digital (ADC) interno procesa la información. Posteriormente, el microcontrolador codifica estos datos y genera una señal digital en el pin D2 (GPIO4). Esta señal es la encargada de conmutar el estado del LED, realizando así la modulación de la luz visible necesaria para el enlace VLC/OCC.

En la Figura 4.5 se muestra el diagrama de conexión físico del transmisor.

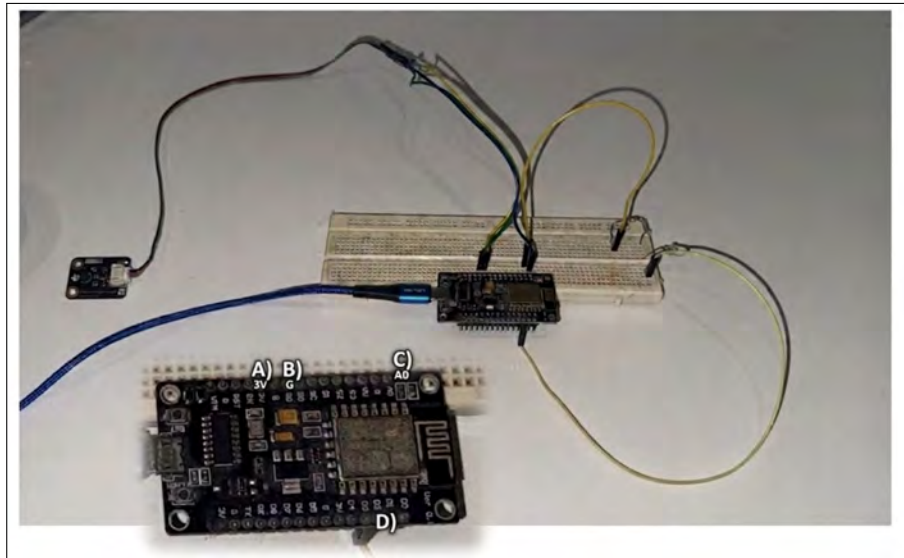


Figura 4.5: Diagrama de conexión físico del NodeMCU con el sensor LM35 y el diodo LED.

A) 3V: Pin de salida de alimentación que proporciona un nivel de tensión continua de 3,3 voltios, utilizado para suministrar energía de forma estable al sensor de temperatura.

B) G: Pin de conexión a tierra, el cual establece el nivel de referencia de cero voltios indispensable para cerrar el circuito eléctrico de todos los elementos conectados.

C) A0: Pin de entrada analógica del microcontrolador, cuya función es leer valores de tensión variable (comprendidos entre 0 y 3,3 V) procedentes del sensor y convertirlos a formato digital mediante su (ADC) interno.

D) D2: Pin de entrada y salida digital de propósito general (GPIO), configurable mediante software, utilizado para la transmisión o recepción de señales lógicas discretas entre la placa y los componentes externos.

Pin NodeMCU	Componente	Función
A0	LM35 (Signal)	Entrada de datos analógicos
3V3 / Vin	LM35 (VCC)	Alimentación del sensor
GND	LM35 / LED	Referencia común
D2 (GPIO4)	LED (Ánodo)	Salida de señal modulada VLC

Tabla 4.3: Diagrama de conexiones de la etapa transmisora.

4.2.2.4. Implementación del NodeMCU

En esta sección, se detalla el diseño lógico y físico necesario para transformar variables capturadas por el sensor de temperatura en señales luminosas interpretables por el receptor de imagen.

Para garantizar una transmisión eficiente y fiable dentro del paradigma OCC, la implementación se divide en dos ejes fundamentales que se describen a continuación:

■ Metodología de lectura y conversión

Para integrar este sensor en el sistema, el microcontrolador debe realizar una lectura analógica a través de su ADC. El proceso de obtención de la temperatura real es el siguiente:

• Digitalización

El ADC convierte el voltaje de entrada (V_{out}) en un valor digital (ADC_{val}) según la resolución del convertidor (10 bits en el caso del NodeMCU utilizado o dicho de otra forma, en 1024 niveles).

$$V_{out} = \frac{ADC_{val} \times V_{ref}}{2^n - 1}$$

Donde V_{ref} es el voltaje de referencia (1V) y n es el número de bits del ADC.

• Cálculo de la temperatura

Una vez obtenido el voltaje, se aplica el factor de escala inverso:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{V_{out}(\text{V})}{0,01 \text{ V}/^{\circ}\text{C}}$$

■ Técnica de modulación en OCC

La selección de la técnica de modulación representa un pilar fundamental en el diseño de cualquier sistema de OCC, especialmente cuando el receptor es un sensor de imagen comercial integrado en un nodo IoT. En este trabajo, se ha optado por implementar la modulación OOK. Esta decisión se fundamenta, en primer lugar, en la naturaleza binaria intrínseca de los dispositivos emisores LED, los cuales permiten una conmutación rápida entre estados de alta y baja luminancia. Al ser una variante de la modulación por amplitud de pulso (PAM), la OOK minimiza la complejidad del transmisor, permitiendo que sensores IoT con recursos limitados puedan gestionar la señalización sin necesidad de *hardware* de DSP avanzado.

Abordar la demodulación desde la óptica del receptor evidencia la gran ventaja del esquema OOK: simplifica radicalmente la extracción de datos a partir de las secuencias de vídeo. Considerando que la cámara ejerce de muestreador a muy baja frecuencia, apostar por esta modulación binaria viabiliza el uso de rutinas de umbralización (*thresholding*) dinámicas -estrategias notablemente más ligeras a nivel computacional-. Semejante eficiencia resulta innegociable bajo las estrictas cuotas de latencia y consumo energético que imponen las topologías IoT. Además, al descartar modulaciones de fase o multinivel -muy penalizadas si no existe una SNR elevada y una respuesta óptica perfectamente lineal-, el sistema gana en inmunidad frente a la contaminación lumínica y las imperfecciones del canal.

La integración de OOK en este análisis experimental permite establecer una línea base sólida para evaluar el rendimiento del sistema en términos de BER y *throughput*. Al reducir la carga computacional asociada a la codificación y decodificación, es posible dedicar los recursos del sistema a la compensación de efectos propios del sensor, como la fluctuación en la frecuencia de cuadros. Por tanto no solo simplifica la prueba de concepto, sino que asegura la viabilidad técnica del sistema propuesto bajo las restricciones de *hardware* de dispositivos IoT.

4.2.3. Tercera etapa: Receptor

En este apartado se detalla el *hardware*, el diseño realizado, la arquitectura de *software* y la implementación técnica de la etapa de recepción del sistema OCC. La recepción se fundamenta en la tecnología OCC, utilizando un sensor de imagen matricial CMOS acoplado a una Raspberry Pi. A diferencia de los sistemas tradicionales basados en fotodiodos, el uso de un sensor de imagen introduce desafíos particulares relacionados con la discretización temporal del proceso de captura de tramas y la influencia de los algoritmos automáticos internos del dispositivo de captura *image signal processor* (ISP).

Para mitigar estas no linealidades y garantizar un canal de comunicación determinista, el *software* desarrollado implementa una arquitectura multiproceso que desacopla la adquisición de *hardware* del procesamiento analítico de la señal. A continuación, se describe el *hardware* empleado, los mecanismos de configuración de bajo nivel del sensor óptico, el flujo de extracción y procesamiento digital de las muestras, y las estrategias matemáticas de estimación estadística empleadas para la demodulación dinámica de los datos.

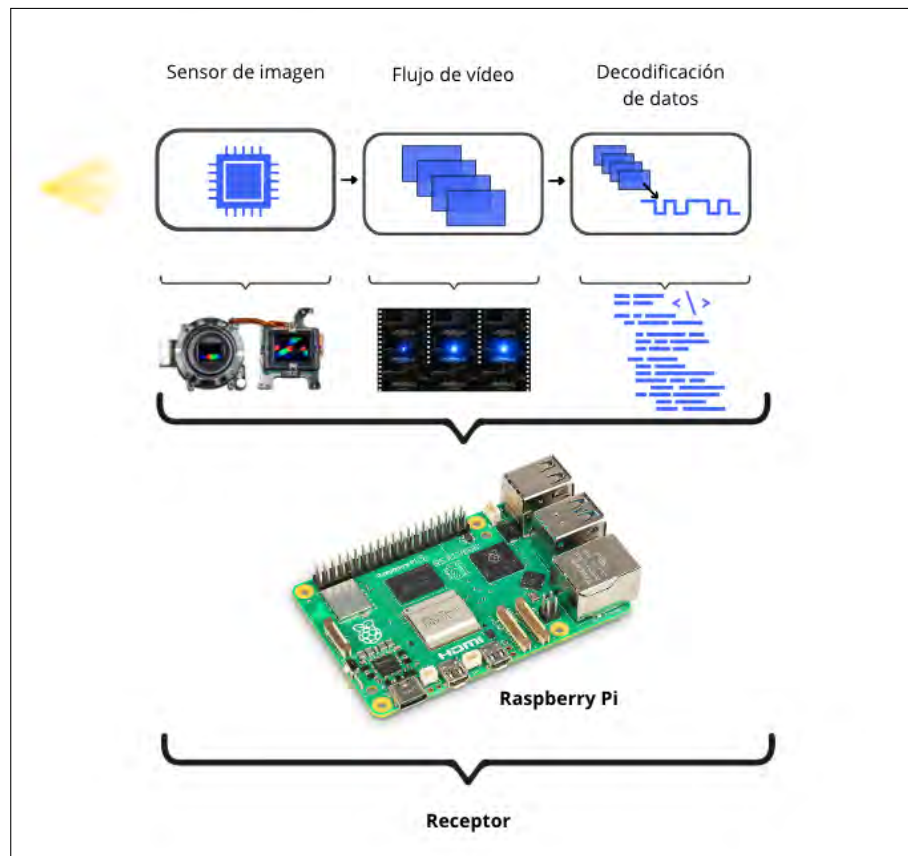


Figura 4.6: Diagrama de conexión físico de la Raspberry Pi 5 con cámara.

4.2.3.1. Selección del *hardware* del receptor

Para la materialización del experimento se requiere de una cuidadosa selección de la plataforma de procesamiento y del transductor óptico en el extremo receptor. A diferencia de los sistemas basados en fotodiodos, donde el ancho de banda del canal está limitado principalmente por la electrónica de acondicionamiento analógico, en OCC el cuello de botella físico se desplaza hacia la tasa de adquisición de fotogramas del sensor de imagen y la capacidad de procesamiento del dispositivo en cuestión.

Para satisfacer las restricciones de un nodo de IoT en términos de consumo energético, coste y dimensiones, y simultáneamente garantizar el procesamiento digital de señales en tiempo real mediante técnicas estocásticas complejas (como los modelos de mezclas gaussianas), se ha seleccionado una arquitectura

basada en la Raspberry Pi 5 acoplada a un módulo de cámara de alta definición fundamentado en el sensor OmniVision OV5647. Esta combinación ofrece un equilibrio óptimo entre la flexibilidad de un sistema operativo Linux embebido y el control de bajo nivel sobre los registros del sensor óptico necesarios para anular algunos ajustes que realiza la cámara de forma automática como son la ganancia y la exposición.

A continuación se detalla cada uno de estos dispositivos:

■ Raspberry Pi 5

La elección de la Raspberry Pi 5 como dispositivo controlador del receptor OCC está plenamente justificada por su salto cualitativo en la arquitectura de entrada/salida (I/O) y su potencia de procesamiento numérico en comparación con las plataformas de generaciones anteriores. El dispositivo cuenta con un procesador Broadcom BCM2712 de cuatro núcleos ARM Cortex-A76 corriendo a 2.4 GHz, lo que permite la ejecución paralela y eficiente de algoritmos de visión artificial y optimización matemática (algoritmo de esperanza-maximización para modelos de mezclas gaussianas (GMM)).

Desde la parte óptica, la innovación más disruptiva de la Raspberry Pi 5 es la inclusión del RP1, un chip controlador de E/S (Southbridge) diseñado por la propia fundación Raspberry Pi. Este componente implementa un ISP de *hardware* avanzado y gestiona directamente los puertos de interfaz de cámara interfaz de procesador de la industria móvil (MIPI) (interfaz serie de cámara 2 (CSI-2)). La Raspberry Pi 5 dispone de dos transceptores MIPI de cuatro líneas y cuatro carriles (4-lane), capaces de soportar un ancho de banda teórico de hasta 1.5 Gbps por carril. En este diseño, la cámara se acopla mediante un cable flexible FPC (Flexible Printed Circuit, ver Figura 4.7) a uno de estos puertos dedicados, lo que minimiza la latencia de transporte de datos desde el plano del sensor hasta la memoria RAM del sistema, eliminando cualquier pérdida de tramas provocada por buses compartidos como el USB.

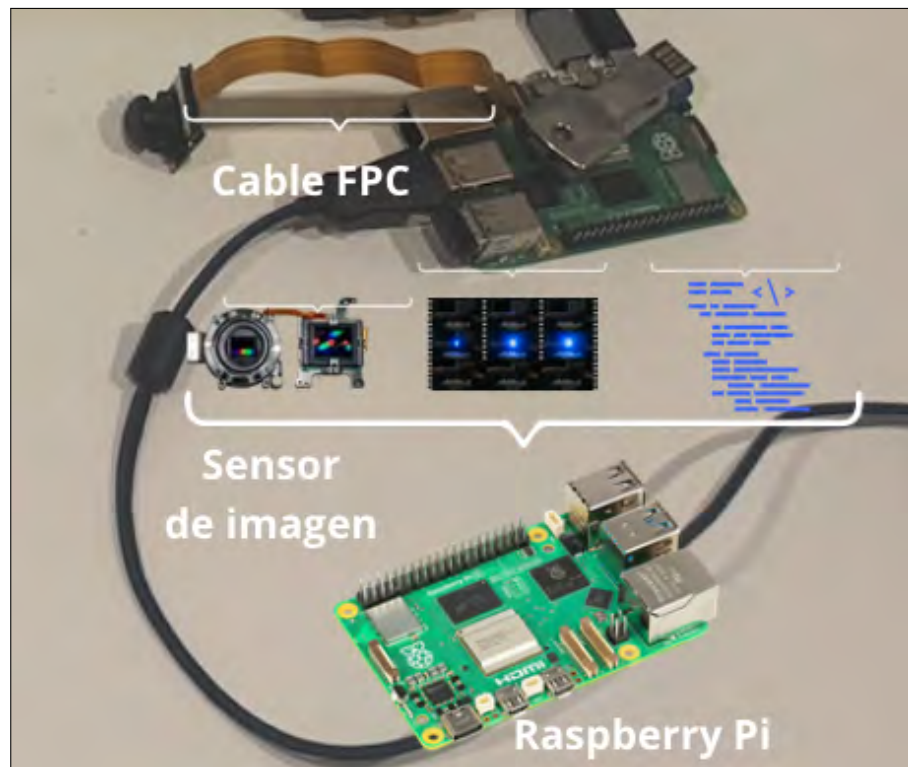


Figura 4.7: Cámara conectada a la Raspberry Pi 5 a través del cable FPC.

■ Sensor CMOS OmniVision OV5647

El elemento transductor encargado de transformar los fotones incidentes del emisor VLC en señales eléctricas discretas es el módulo de cámara basado en el sensor OmniVision OV5647. Se trata de un sensor de imagen color CMOS tipo QSXGA (5 megapíxeles) con un tamaño de formato óptico de 1/4 de pulgada.

A nivel de arquitectura de sensor, el OV5647 destaca por las siguientes características técnicas clave para el enlace OCC especificadas en la siguiente tabla:

Parámetro	Especificación
Tipo de sensor	OmniVision OV5647 color CMOS QSXGA
Tamaño del sensor	3,67 × 2,74 mm (1/4 de pulgada)
Resolución	5 megapíxeles
Campo de visión (FOV)	Fov(D) = 90°, Fov(H) = 72°
Ángulo de visión	90°
Número de píxeles	2592 × 1944
Distancia focal	2,8 mm
Enfoque	Ajustable
Apertura (F/N)	2,2
Tamaño de píxel	1,4 × 1,4 μm
Resolución de vídeo	1080p a 30 FPS / 720p a 60 FPS
Dimensiones de la placa	39 × 39 mm
Distorsión de TV	< -17 %
Ángulo de rayos principales (CRA)	10°
Iluminación relativa	52 %
Elemento óptico	4G+IR

Tabla 4.4: Especificaciones técnicas del sensor de la cámara (OmniVision OV5647).

4.2.3.2. Especificaciones del receptor y funcionamiento

A continuación se detallan los componentes específicos y la lógica de operación de la etapa receptora, la cual constituye el último eslabón de la cadena de comunicación VLC-OCC. El objetivo principal de esta etapa es capturar la señal óptica modulada en intensidad proveniente del entorno, aislar espacialmente el canal de comunicación y transformar las variaciones de luminancia captadas por el sensor en una secuencia digital idéntica a la transmitida originalmente por el nodo emisor.

Para llevar a cabo la adquisición de datos de luz visible se utiliza, como se ha

descrito anteriormente, una Raspberry Pi 5. Esta actúa como la unidad central de procesamiento de datos, encargándose de coordinar tanto la captura de imágenes como el procesamiento matricial de las tramas de imágenes recibidas.

La conversión de la señal óptica en magnitudes eléctricas se realiza a través del módulo de cámara equipado con el sensor CMOS OmniVision OV5647. Internamente, el sensor realiza la integración de los fotones incidentes en su matriz activa de píxeles. Cuando la luz modulada impacta sobre la ROI seleccionada, el convertidor analógico-digital (ADC) interno del sensor cuantifica esta magnitud eléctrica, distribuyendo la intensidad lumínica originalmente en 1024 niveles discretos de salida.

Posteriormente, en el flujo de procesamiento, OpenCV normaliza y procesa esta matriz en una escala estandarizada de grises de 8 bits (equivalente a 256 niveles de luminancia, comprendidos en el rango entero $[0, 255]$). Esta segmentación lineal permite que cada pequeña variación de brillo detectada en el píxel direccionado represente una fracción mínima de la irradiancia total del canal, denotada matemáticamente por la relación:

$$\Delta Y = \frac{Y_{\max}}{256}$$

Esta cuantificación proporciona una fidelidad y sensibilidad suficientes para monitorizar con alta precisión los cambios rápidos de estado del emisor (encendido/apagado) incluso ante la presencia de luz ambiental espuria o ruido térmico.

Una vez que el nivel de luminancia del píxel ha sido muestreado y digitalizado en cada trama temporal, el dato no se evalúa de manera aislada. Para garantizar que el receptor OCC pueda recuperar la información de forma íntegra, se ha implementado un algoritmo dinámico basado en GMM que calcula el umbral óptimo por máxima verosimilitud (ML). Este umbral permite discriminar y reconstruir la trama de datos encapsulada originalmente por el NodeMCU, contrastando la secuencia binaria cruda recibida con las reglas de sincronización, temporización e

integridad de la trama definidas en el Diseño de la capa de enlace de datos (ver sección 4.3).

4.2.3.3. Diagrama de conexión

El flujo de la señal óptica se inicia en el espacio libre, donde el canal óptico modulado por el nodo transmisor (NodeMCU) incide directamente sobre la óptica del módulo de la cámara (ver Figura 4.8).



Figura 4.8: Imagen del experimento donde se aprecia el canal óptico, el sensor de imagen y la Raspberry Pi conectada a este último.

Este transductor óptico, basado en el sensor OmniVision OV5647, se encuentra conectado a la placa de desarrollo Raspberry Pi 5 mediante un cable flexible plano de baja impedancia, y de forma directa a uno de los puertos serie dedicados MIPI CSI-2, como se ve en la Figura 4.9.

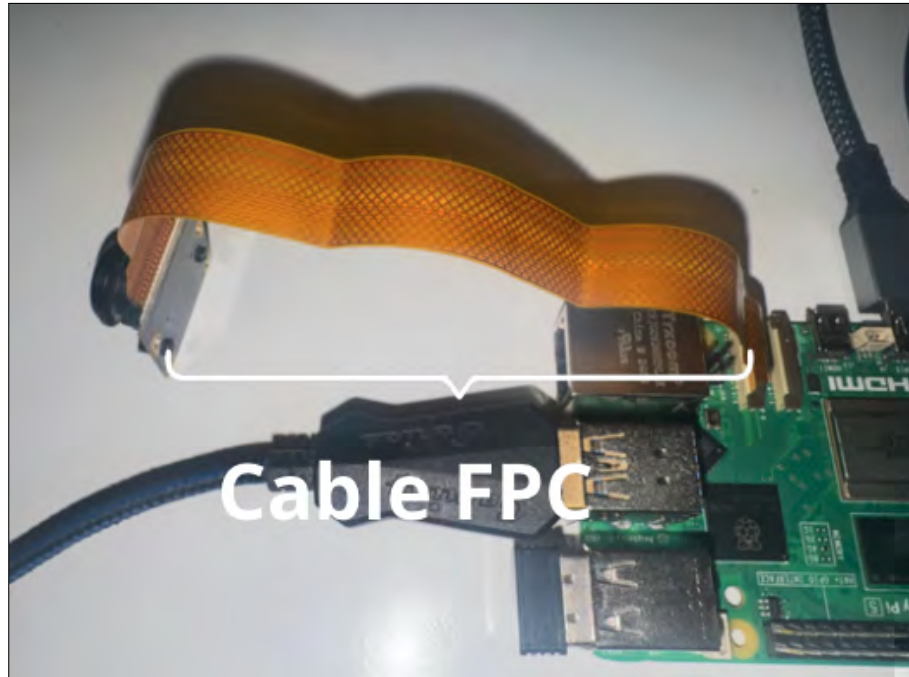


Figura 4.9: Conexión del sensor de imagen al patillado CAM/DSPO de la Raspberry Pi 5 con el cable FPC.

Esta configuración de *hardware* permite que las matrices de píxeles digitalizadas por el sensor se transmitan mediante caminos diferentes de alta velocidad hacia el circuito integrado RP1 de la Raspberry Pi 5, garantizando que el flujo de tramas llegue de forma síncrona al *pipeline* de ejecución del *software* de demodulación.

4.2.3.4. Flujo de procesamiento DSP

Para garantizar la integridad en la recepción de los datos y minimizar los efectos adversos del canal óptico, las capturas de vídeo se someten a un *pipeline* de DSP estructurado en dos fases y cuatro etapas que se detallan a continuación:

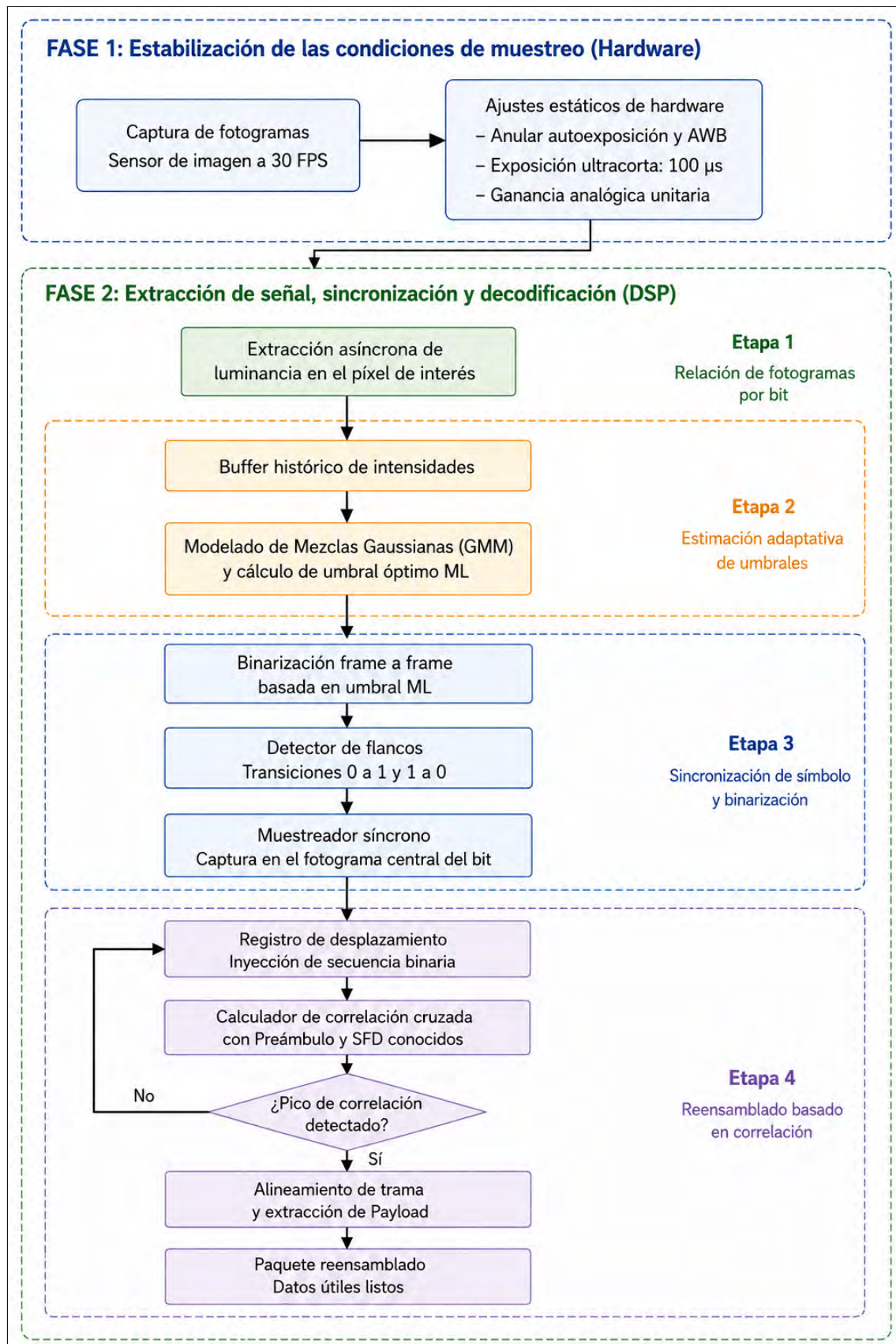
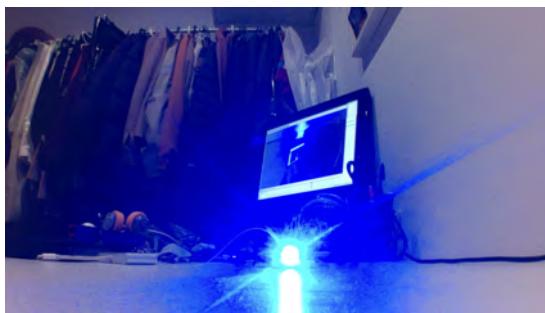


Figura 4.10: Diagrama de recepción con las 2 fases y 4 etapas.

■ Estabilización de las condiciones de muestreo

El primer paso del flujo DSP se sitúa a nivel de *hardware* con la configuración de los parámetros del sensor de imagen (Picamera2). Con el objetivo de garantizar condiciones de muestreo isomórficas y constantes durante todo el proceso de adquisición, se anula por completo el control automático de algunos parámetros de la cámara (como la exposición y la ganancia). Específicamente, se fija un tiempo de exposición ultracorto ($100\ \mu\text{s}$) y una ganancia analógica unitaria (equivalente al ajuste de ISO base, ver Figura 4.11). Esta subexposición deliberada actúa como un filtro espacial analógico primario: discrimina de forma drástica la irradiancia de fondo (luz ambiental) y mitiga el fenómeno de saturación o ensanchamiento espacial del haz de luz (*blooming*) en el plano de los píxeles. Asimismo, se imponen límites estrictos a la duración del fotograma para fijar la tasa de muestreo a 30 FPS, acotando el *jitter* temporal y asegurando un reloj de muestreo uniforme para el análisis posterior.



(a) Captura con exposición y ganancia ajustada automáticamente por la cámara.



(b) Captura con exposición y ganancia ajustada en código.

Figura 4.11: Comparativa de capturas con ajuste automático y manual de parámetros.

■ Extracción de señal, sincronización y decodificación

Una vez capturado el flujo de fotogramas, la señal se procesa de forma asíncrona mediante la extracción de la luminancia en el píxel de interés (coordenadas del LED seleccionado). El flujo de trabajo para la conversión de este vector de intensidades temporales en datos binarios estructurados se compone de las siguientes etapas:

1. Relación de fotogramas por bit

Debido a que la frecuencia de parpadeo del emisor está acotada por la tasa de muestreo de la cámara (30 FPS), se establece una relación de sobremuestreo donde cada bit lógico transmitido se sostiene durante un número entero de fotogramas ($N_{f_{pb}} = 3$). Esto asegura que el estado del LED sea capturado de forma estable en tres fotogramas, lo que equivale a un tiempo de bit de 100 ms a una tasa de captura de 30 FPS.

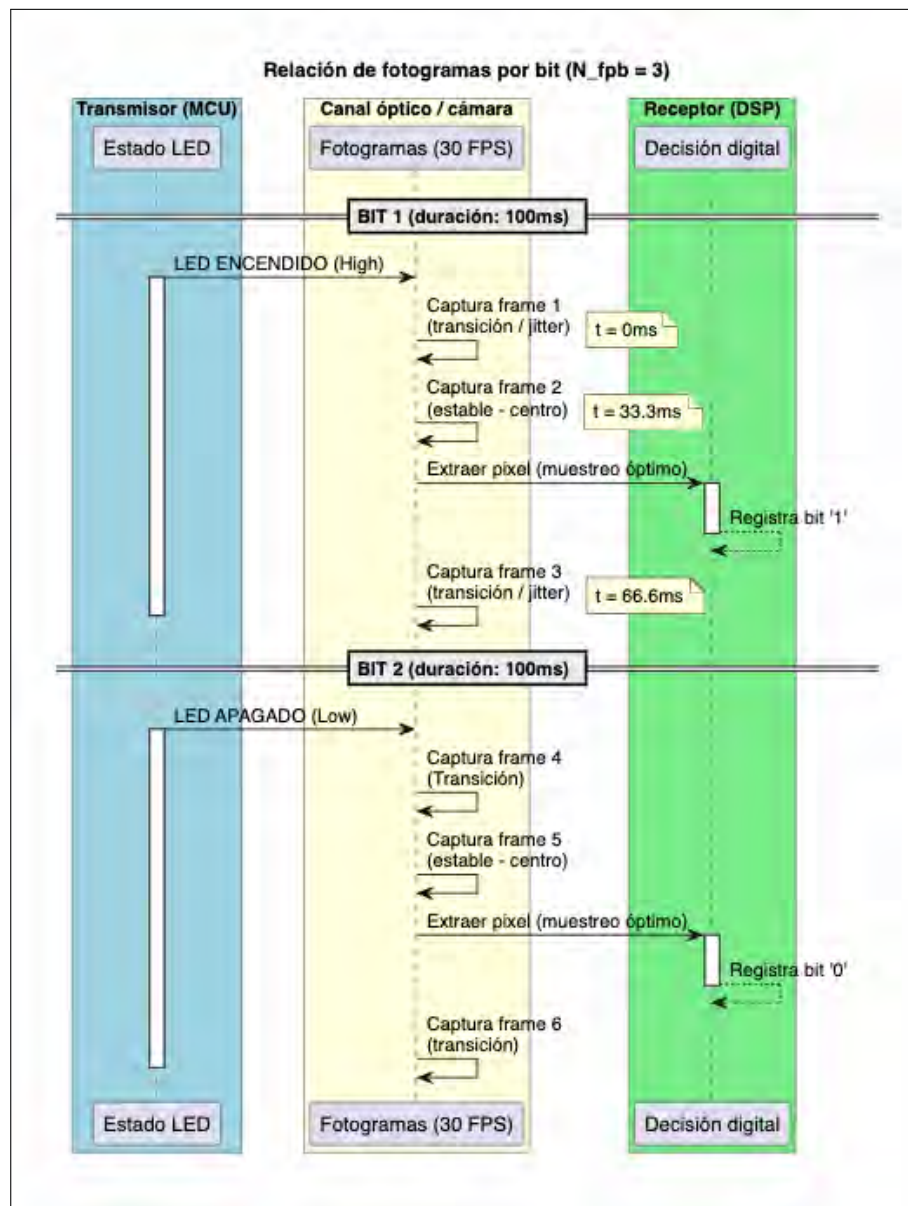


Figura 4.12: Relación de sobremuestreo de 3 fotogramas por bit.

2. Estimación adaptativa de umbrales

A partir de un histórico de intensidades almacenado en un *buffer*, se modela la naturaleza bimodal de la señal mediante GMM (las dos gaussianas azul y verde en la Figura 4.13). Aplicando el criterio de máxima verosimilitud (ML), se calcula dinámicamente la intersección de las PDF (Probability Density Functions) de los estados «0» y «1» (línea roja vertical en la Figura 4.13). Este umbral óptimo se actualiza de forma adaptativa para absorber variaciones en la distancia o atenuación del canal.

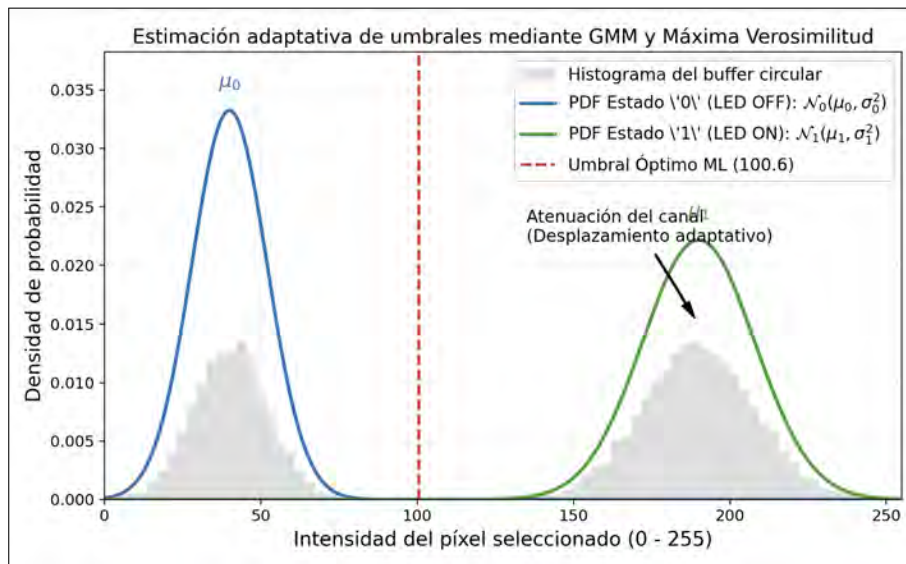


Figura 4.13: Estimación adaptativa de umbrales.

3. Generación de la secuencia binaria y sincronización de símbolo

La señal continua de luminancia se binariza frame a frame utilizando el umbral ML calculado. Posteriormente, el algoritmo de sincronización localiza las transiciones de flanco (0 a 1 y 1 a 0) para corregir el desfase de fase entre los relojes asíncronos del microcontrolador y la cámara, muestreando la señal en el instante óptimo (punto medio del bit).

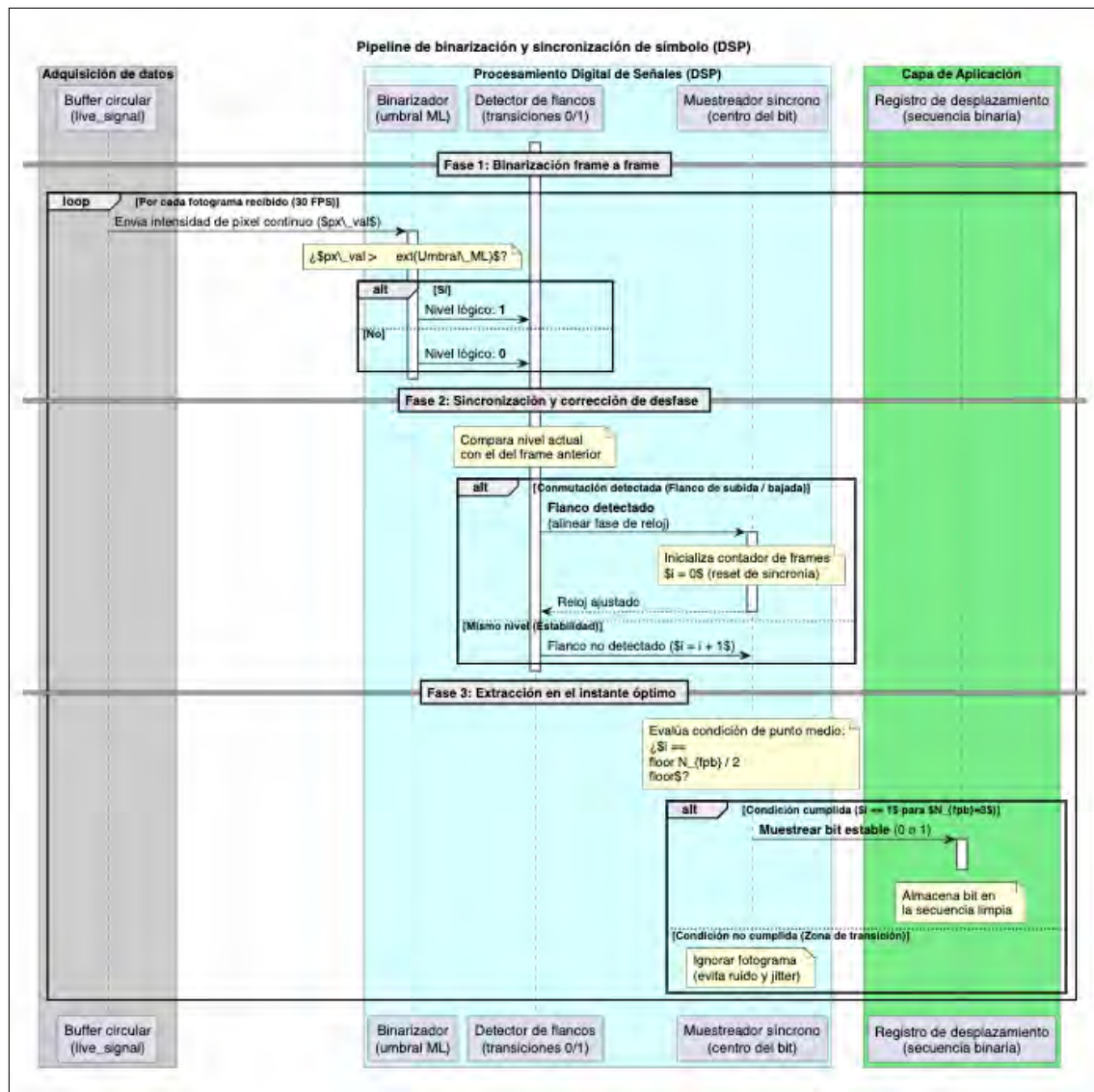


Figura 4.14: Proceso de generación de la secuencia binaria y sincronización de símbolo.

4. Reensamblado de tramas basado en correlación

La secuencia binaria sincronizada se introduce en un registro de desplazamiento donde se calcula de forma continua la correlación cruzada con una secuencia de sincronización conocida (el preámbulo y el delimitador de inicio de trama (SFD)).

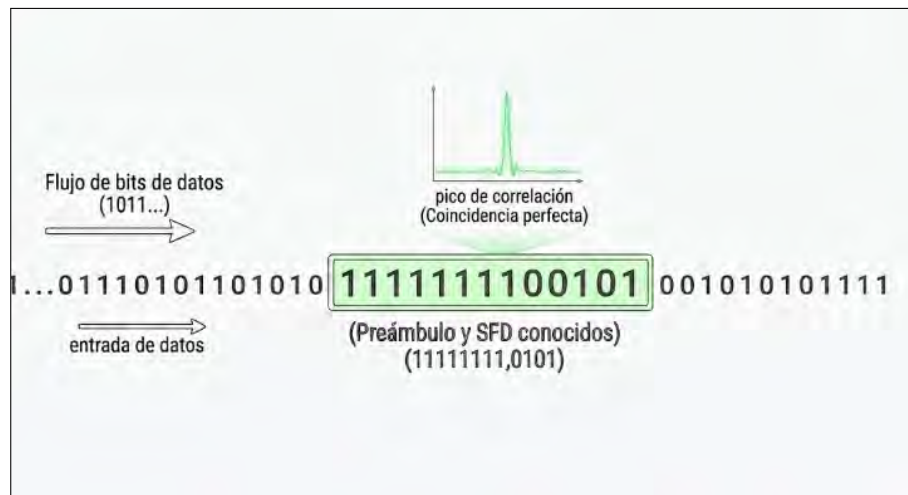


Figura 4.15: Mecanismo de detección del pico de correlación para la alineación del receptor.

Al detectarse el pico de correlación, se establece el alineamiento de la trama, permitiendo la lectura de la carga útil (*payload*) y el reensamblado final de la trama de datos.

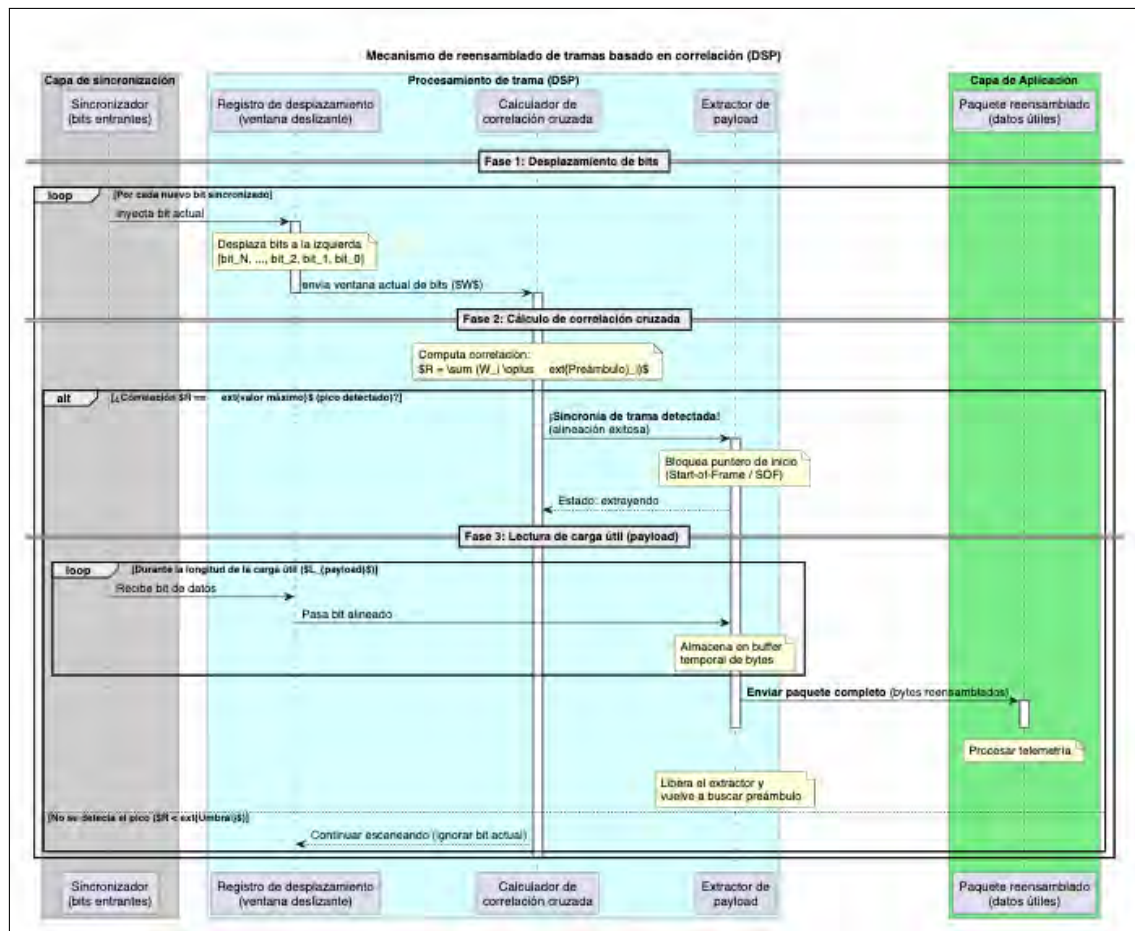


Figura 4.16: Mecanismo de reensamblado y lectura final de la trama de datos OCC.

4.2.4. Cuarta etapa: capa de aplicación

El diseño de la capa de aplicación (ver Figura 4.17) representa la etapa final de la arquitectura propuesta en este trabajo. El objetivo es actuar como puente entre la complejidad del dominio físico y de enlace —donde ocurre la modulación óptica y el procesamiento de imágenes OCC— y el dominio del usuario final o de los sistemas de monitorización. El flujo de los datos sigue un camino lineal desde el *hardware* hasta la interfaz de usuario.

La complejidad inherente al canal VLC queda completamente aislada en esta etapa. A partir de aquí, esta capa asume el control del dato. Toda lectura decodificada recibe un tratamiento analítico exhaustivo y se almacena. El ciclo concluye

al habilitar la consulta de estos datos.

4.2.4.1. Arquitectura general y flujo de telemetría

Para procesar y almacenar las mediciones, se ha diseñado una arquitectura web completa orientada a telemetría. La solución elegida utiliza Java en el *backend* e InfluxDB [57] como base de datos de series temporales, lo cual representa una solución excelente para garantizar alta disponibilidad, velocidad de escritura y eficiencia en el almacenamiento.

El ecosistema se divide en dos grandes responsabilidades, desacoplando la lógica de negocio de la persistencia de datos:

1. **Servidor de aplicaciones (*backend*)**

Desarrollado en Java utilizando el framework Spring Boot [58]. Actúa como el motor de orquestación, recibiendo los datos del subsistema OCC, validándolos y gestionando la conexión con la base de datos.

2. **Base de datos de series temporales (TSDB)**

Representada por InfluxDB v3, optimizada específicamente para almacenar grandes volúmenes de datos ordenados cronológicamente con marcas de tiempo (timestamps) de alta precisión.

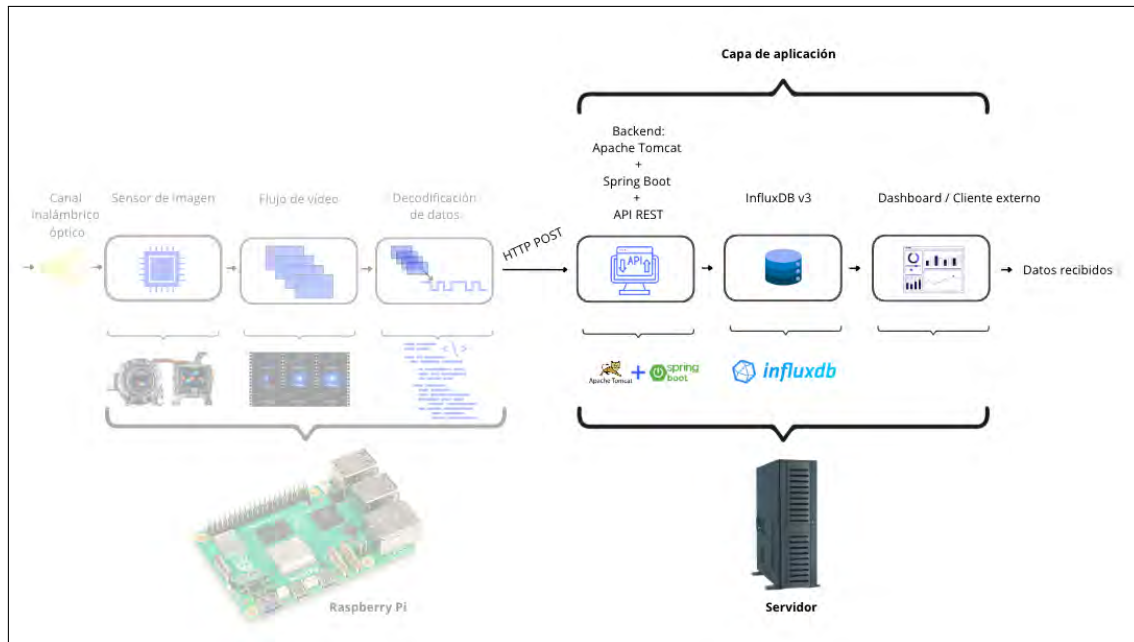


Figura 4.17: Arquitectura de *software* de la capa de aplicación y flujo unidireccional de datos de telemetría.

4.2.4.2. Diseño e implementación de la API REST

La comunicación entre el nodo decodificador OCC y el de datos se realiza mediante protocolo HTTP de forma síncrona. Una vez que el algoritmo de visión artificial extrae con éxito la carga útil (*payload*) de los fotogramas, este actúa como cliente, emitiendo peticiones HTTP POST hacia el servidor (ver Figura 4.18).



```

9
10 /**
11  *
12  * @author jose
13  */
14 @RestController
15 @RequestMapping("/api/v1/telemetry")
16 public class TelemetryController {
17
18     private final InfluxDBService influxDBService;
19
20     public TelemetryController(InfluxDBService influxDBService) {
21         this.influxDBService = influxDBService;
22     }
23
24     @PostMapping("/temperature")
25     public ResponseEntity<String> postMeasurement(@RequestBody TemperatureMeasurement measurement) {
26         if (measurement.getSensorId() == null || measurement.getTemperature() == null) {
27             return ResponseEntity.badRequest().body("Faltan campos: sensorId o temperature");
28         }
29         try {
30             influxDBService.writeTemperature(measurement.getSensorId(), measurement.getTemperature());
31             return ResponseEntity.ok("Medición registrada en InfluxDB");
32         } catch (Exception e) {
33             return ResponseEntity.internalServerError().body("Error: " + e.getMessage());
34         }
35     }
36 }

```

Figura 4.18: Código de Spring para el despliegue de la API REST en el servidor.

El *backend* expone un *endpoint* REST específico bajo la ruta `/api/v1/telemetry/temperature`. La arquitectura interna de esta API en Spring Boot sigue el patrón de diseño modelo-vista-controlador (MVC), estructurándose en las siguientes capas lógicas:

- **Controlador - (TelemetryController)**

Es el punto de entrada de la red. Recibe la petición HTTP, verifica que el cuerpo del mensaje esté correctamente formateado e invoca a la capa de servicio.

- **Servicio - (InfluxDBService)**

Contiene la lógica de negocio principal. Gestiona el ciclo de vida de la conexión con la base de datos utilizando el cliente oficial de InfluxDB, inyectando de forma segura las credenciales (URL y token de autenticación).

- **Modelo de datos (objeto de transferencia de datos (DTO))**

Un objeto de transferencia de datos (TemperatureMeasurement) que mapea el JSON entrante a un objeto en Java.

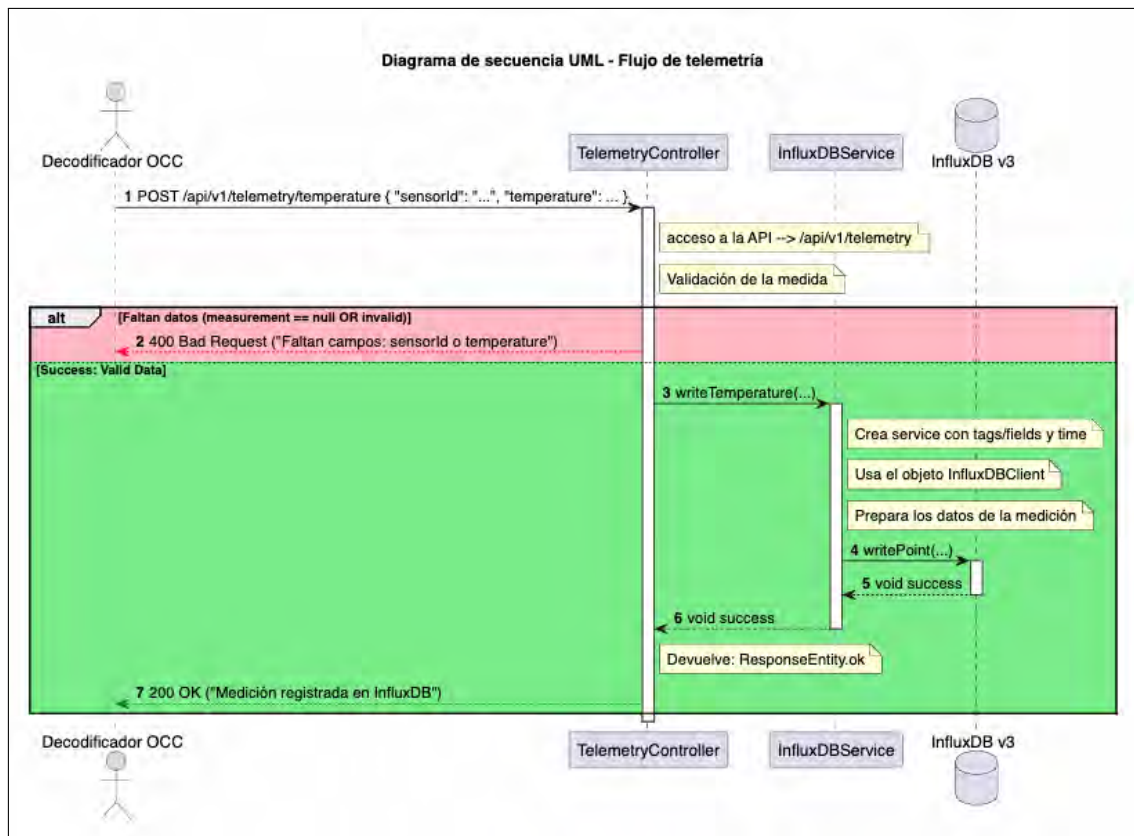


Figura 4.19: Diagrama de secuencia del registro de una nueva medición en el sistema.

4.2.4.3. Modelo de datos e inyección en InfluxDB

A diferencia de las bases de datos relacionales tradicionales (SQL), donde es necesario definir tablas y columnas rígidamente por adelantado, InfluxDB es una base de datos schemaless (sin definición de la estructura de datos). Esta característica es fundamental en entornos IoT, ya que permite que la estructura de almacenamiento se cree y evolucione automáticamente en el instante en que se envía el primer dato. Cuando el DTO de Java llega a la capa de servicio, la información se transforma al formato nativo de escritura de la base de datos, conocido como Line Protocol. La estructura topológica de la información dentro del bucket (base de datos) se divide semánticamente de la siguiente manera:

1. Measurement (medición)

Equivalente al nombre de la tabla clásica. En esta arquitectura, se designa

dinámicamente como «temperature» en el mismo momento de la instancia-
ción del objeto en Java.

2. Tags (etiquetas)

Metadatos indexados diseñados para agilizar las operaciones de búsqueda y filtrado. El identificador único del transmisor VLC (sensorId) se almacena como una etiqueta. Esto garantiza que, si la red escala a múltiples sensores al mismo tiempo, o a múltiples diodos LED transmitiendo simultáneamente, las consultas analíticas mantengan una complejidad temporal óptima.

3. Fields (campos)

El valor numérico de la magnitud física (en este caso, la temperatura) no se indexa, sino que se almacena en crudo bajo el identificador «value» para ahorrar espacio en disco y acelerar la inserción.

4. Timestamp (tiempo)

La marca de tiempo con precisión de nanosegundos, generada en el instante en que el *backend* recibe y procesa la trama lumínica válida.

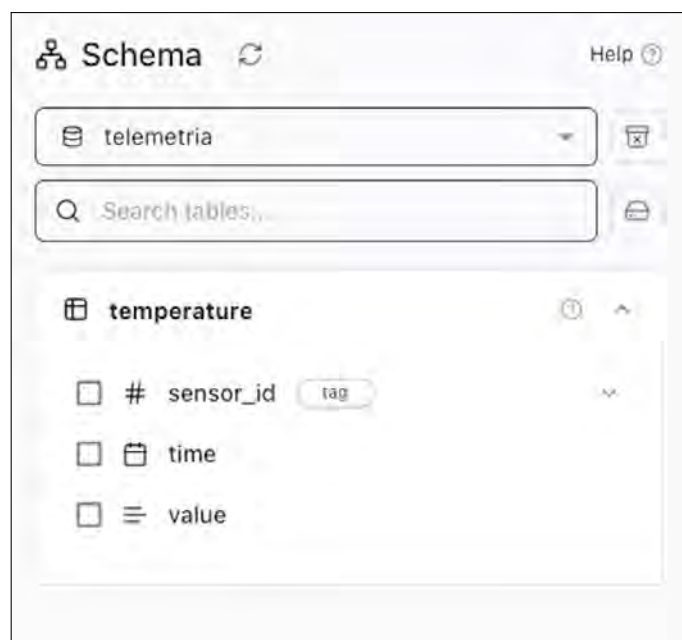


Figura 4.20: Información dentro del bucket «telemetría».

Nota: La medición es «temperature», la etiqueta en este caso es el «sensor_id», el campo a guardar es «value» y por último el registro del tiempo se hace en «time».

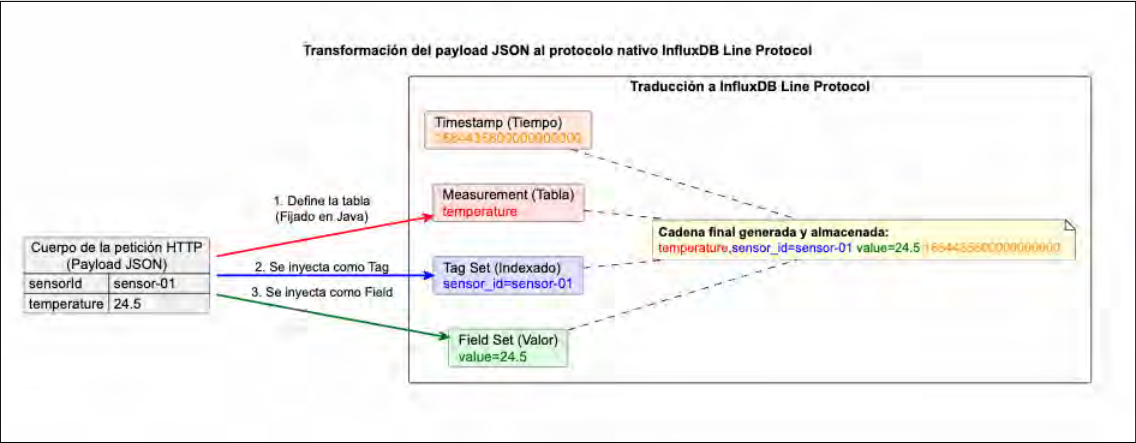


Figura 4.21: Transformación del *payload* JSON al protocolo nativo Line Protocol de InfluxDB.

4.3. Diseño de la capa de enlace de datos

La capa de enlace de datos desempeña un papel fundamental al garantizar que la información enviada por el sensor IoT sea correctamente identificada y recuperada por el receptor. A diferencia de los sistemas de radiofrecuencia, en OCC debemos enfrentarnos a retos específicos como el ruido ambiental lumínico y la necesidad de una sincronización precisa basada en la frecuencia de muestreo del sensor de imagen. El diseño de la trama propuesto busca un equilibrio entre robustez y ligereza, optimizando el ancho de banda disponible mediante una estructura de 28 bits.

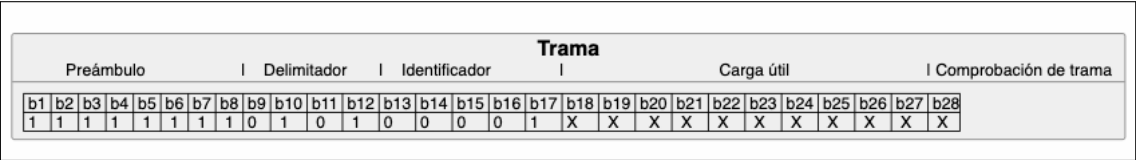


Figura 4.22: Bits de la trama completa.

4.3.1. Preámbulo

El preámbulo constituye la primera parte de la trama y su función principal es permitir al algoritmo de procesamiento de imágenes detectar la presencia de una transmisión activa y estabilizar la recuperación del reloj. En este diseño, el preámbulo consta de 1 byte (8 bits) compuestos por una secuencia repetitiva de unos lógicos. Esta configuración de máxima intensidad lumínica facilita la distinción entre el estado de reposo del emisor y el inicio de una ráfaga de datos, permitiendo al receptor ajustar los umbrales de binarización de manera dinámica (ver Figura 4.23).

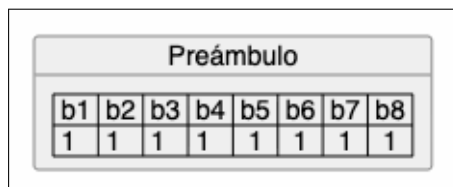


Figura 4.23: Preámbulo de la trama.

4.3.2. Delimitador de inicio de trama (SFD)

Inmediatamente después del preámbulo, se sitúa el SFD. Este campo emplea un patrón único de 4 bits diseñado para romper la periodicidad del preámbulo y señalar el comienzo exacto de la información útil. Su importancia es crítica en OCC para evitar falsos positivos en la decodificación; el algoritmo de recepción buscará este patrón específico para alinear el puntero de lectura de los bits siguientes, asegurando que el identificador y el *payload* se interpreten en sus posiciones correctas dentro de la matriz de píxeles capturada. La composición en bits de este delimitador se muestra en la Figura 4.24.

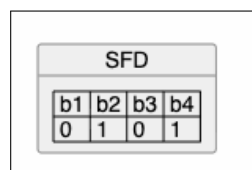


Figura 4.24: Delimitador de inicio de la trama.

4.3.3. Identificador

Para dotar al sistema de capacidad de direccionamiento y permitir su escalabilidad a múltiples sensores, se ha incluido un campo de identificador de 5 bits. Esta dimensión permite direccionar hasta $2^5 = 32$ sensores únicos de forma simultánea en el campo de visión de la cámara. El uso de un ID integrado en la trama permite que el receptor discrimine la procedencia de los datos en escenarios donde varios sensores VLC estén transmitiendo a través del mismo LED de comunicación, facilitando la gestión de la comunicación multipunto a punto. Para este estudio se le ha asignado el identificador 1 (ver Figura 4.25).

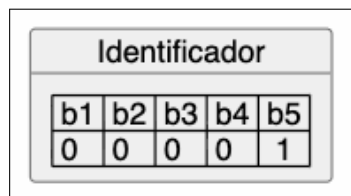


Figura 4.25: Identificador de la trama.

4.3.4. Carga útil (*Payload*)

La carga útil es el núcleo de la trama y contiene la información sensorizada que se desea transmitir. Se han destinado 10 bits para este campo, lo que permite representar fielmente los 1024 niveles de cuantificación que entrega el conversor analógico-digital de 10 bits del NodeMCU. Esta resolución es suficiente para la mayoría de aplicaciones de monitorización, proporcionando una precisión elevada sin sobrecargar la longitud total de la trama (ver Figura 4.26).

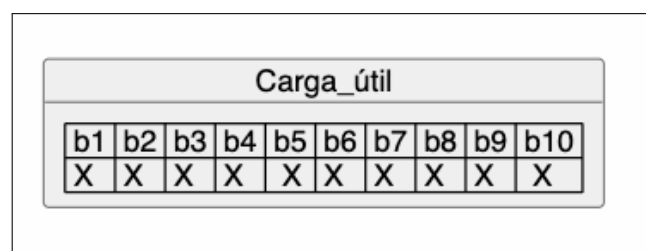


Figura 4.26: Carga útil de la trama.

4.3.5. Comprobación de trama

Como mecanismo de control de errores y para garantizar la integridad de los datos transmitidos, la trama finaliza con 1 bit de paridad. Se ha optado por este mecanismo elemental frente a técnicas de detección más complejas, como el uso de un checksum o código de verificación de redundancia cíclica (CRC), debido a que presenta una carga computacional significativamente menor, algo ideal para nodos IoT con recursos limitados. En el diseño propuesto, el tiempo de bit se ha establecido en 100 ms. Dada esta restricción temporal —y considerando que las variaciones térmicas son procesos físicos lentos—, el sistema se puede permitir el lujo de descartar una o varias tramas si la transmisión sufre alteraciones. De este modo, si la paridad calculada en la recepción no coincide con este bit, permitiendo detectar errores simples, la trama se descarta de forma directa. Así se evita el procesamiento de lecturas de temperatura erróneas provocadas por interferencias externas lumínicas, sin que la pérdida ocasional de paquetes comprometa la monitorización general.

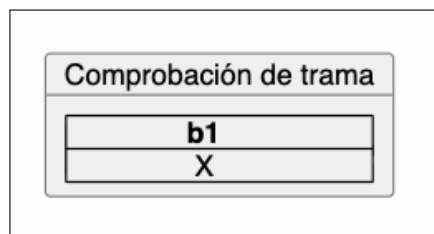


Figura 4.27: Comprobación de la trama.

Capítulo 5

Análisis de resultados y discusión

Este capítulo se presenta como el espacio para la evaluación objetiva y cuantitativa del sistema desarrollado. Tras haber definido el marco teórico y la arquitectura de implementación en los capítulos anteriores, este apartado tiene como propósito confrontar el comportamiento empírico del sistema desarrollado con las expectativas y modelos teóricos descritos en la literatura.

El despliegue de la fase empírica somete a examen directo las premisas de diseño. Mediante la monitorización de indicadores de rendimiento como la BER y la SNR, se audita el comportamiento real del enlace óptico. Interpretar estos registros trasciende la mera confirmación de viabilidad. Su verdadera utilidad científica radica en delimitar con precisión matemática los cuellos de botella del sistema, contrastando el marco hipotético con la exigencia del entorno físico.

5.1. Entorno y configuración experimental

En esta sección se describe detalladamente el escenario de pruebas y la parametrización de los dispositivos empleados para la validación empírica del sistema OCC diseñado. Con el objetivo de garantizar la replicabilidad de los experimentos, se especifican las condiciones del entorno físico, los ajustes ópticos y de

captura de la cámara, así como los criterios geométricos y posicionales adoptados durante la toma de datos.

5.1.1. Escenario físico y condiciones de iluminación ambiental

El montaje experimental se desplegó sobre una superficie de trabajo plana (ver Figura 5.1). Para la evaluación del enlace OCC, el nodo emisor (LED) y el sensor óptico receptor se fijaron a una distancia exacta de 60 cm entre sí. Ambos dispositivos se dispusieron de manera estrictamente alineada, compartiendo el mismo eje principal (línea de vista directa o LoS) con un ángulo de incidencia nulo. Esta configuración geométrica estática resulta fundamental para aislar el experimento, ya que maximiza la potencia óptica captada por la cámara y elimina las fluctuaciones o pérdidas de paquetes provocadas por desalineaciones físicas o vibraciones.



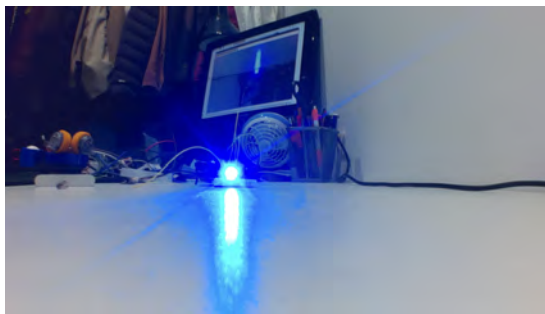
Figura 5.1: Diagrama físico del experimento.

El diagrama físico del experimento ha seguido la posición de los dispositivos del diagrama de bloques general detallado en la Figura 4.1 (ver sección 4.1).

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en una habitación cerrada, bajo un entorno controlado que permitió aislar y evaluar el impacto de la radiación óptica externa. Para el análisis del sistema se contemplaron cuatro escenarios

lumínicos diferenciados: en primer lugar, un escenario de oscuridad relativa (atenuación de luminarias artificiales, con un nivel de iluminancia residual inferior a los 10 lux), orientado a caracterizar el comportamiento del enlace en condiciones ideales. En segundo lugar, se evaluó el sistema bajo iluminación ambiental activa (combinando luz LED del techo y luz natural indirecta, registrando valores estables de entre 300 lux y 500 lux en la superficie del receptor). Por otro lado se repitieron los mismos escenarios con una pantalla (monitor de ordenador) de fondo al LED transmisor. Ver Figura 5.2.

Estos cuatro escenarios permitieron cuantificar la degradación de la relación señal-ruido óptico (SNR_o) provocada por fuentes interferentes continuas y parásitas comunes en entornos IoT reales.



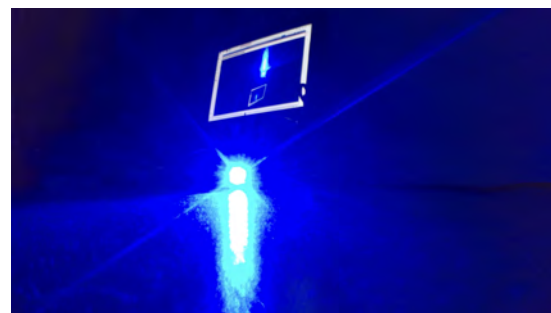
(a) Escenario de captura con luz de techo encendida y pantalla tras el LED también encendida.



(b) Escenario de captura con luz de techo apagada y pantalla tras el LED también apagada.



(c) Escenario de captura con luz de techo encendida y pantalla tras el LED apagada.



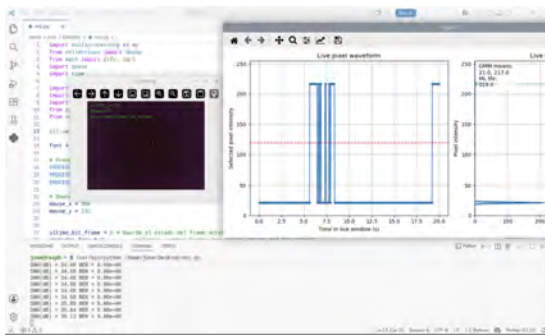
(d) Escenario de captura con luz de techo apagada y pantalla tras el LED encendida.

Figura 5.2: Comparativa de escenarios de capturas.

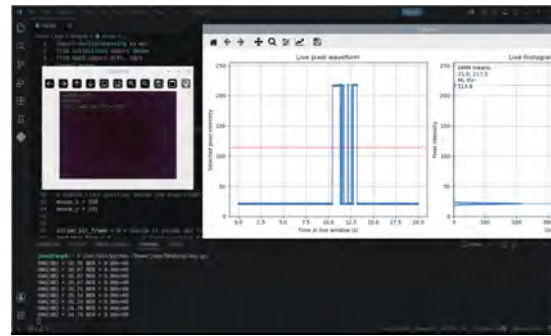
Para estos cuatro mismos escenarios los niveles de SNR y BER recibidos fueron los que se pueden ver en la Figura 5.3.

En esta figura, la gráfica «Live pixel waveform» representa en tiempo real el perfil de intensidad lumínica (en niveles de gris de 0 a 255) capturado por la cámara a lo largo de una línea de píxeles. En ella se aprecian claramente los «picos» altos cuando el LED está encendido y los «valles» bajos cuando está apagado, lo que visualiza de forma directa cómo el parpadeo de la luz se convierte en datos binarios (ceros y unos) separados por la línea de umbral roja.

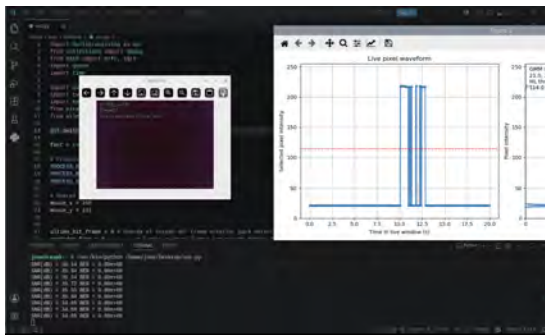
La relación directa con el cálculo de la SNR radica en que esta gráfica contiene los dos elementos matemáticos necesarios para la fórmula: la señal útil, que se obtiene midiendo la diferencia de altura entre la cima del pico y el fondo del valle, y el ruido, que se calcula midiendo el «rizado» (desviación estándar) en las zonas estables de la onda. En los escenarios con luz de techo y pantalla encendidas, el fondo de la gráfica se eleva y se vuelve más inestable, lo que reduce la altura neta de los picos y aumenta el ruido, provocando una caída del valor de la SNR en comparación con los escenarios a oscuras.



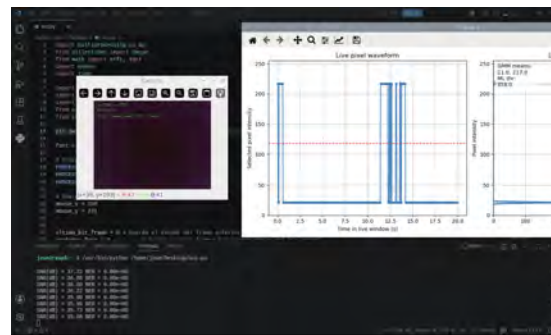
(a) Escenario de captura con luz de techo encendida y pantalla tras el LED también encendida.



(b) Escenario de captura con luz de techo apagada y pantalla tras el LED también apagada.



(c) Escenario de captura con luz de techo encendida y pantalla tras el LED apagada.



(d) Escenario de captura con luz de techo apagada y pantalla tras el LED encendida.

Figura 5.3: Comparativa de SNR con los 4 escenarios con los ajustes establecidos a la cámara para la toma de datos.

En la evaluación del rendimiento del enlace OCC, la SNR empírica y su impacto en la tasa de error de bit (BER) revelan una alta robustez del sistema frente a la iluminación ambiental. A partir de los datos registrados mediante la clasificación por el GMM ilustrados en la Figura 5.3, se justifica el siguiente comportamiento bajo los cuatro escenarios analizados:

1. **Estabilidad de los niveles lógicos:** A través de los cuatro escenarios, las medias de las distribuciones GMM se mantienen prácticamente constantes (con un nivel bajo '0' en torno a una intensidad de píxel de 20 y un nivel alto '1' cercano a 217). Esta amplia separación dinámica, lograda mediante los

ajustes fijos de la cámara, es el factor determinante para el rendimiento del enlace.

2. **Inmunidad frente al ruido ambiental (escenarios a, c y d):** Contrario a lo que se podría intuir en un entorno hostil, la introducción de luz cenital encendida (c), una pantalla retroiluminada directa tras el LED (d), o la combinación de ambas (a), no degrada significativamente la calidad de la señal en la ROI. Los valores de SNR registrados fluctúan en una franja muy estrecha y elevada, situándose la peor lectura del escenario más ruidoso (a) en 34.68 dB, el escenario (c) en 34.68 dB, y el escenario (d) en 35.68 dB.
3. **Escenario de referencia (b):** En condiciones de oscuridad (luz y pantalla apagadas), el sistema registra una SNR de 34.76 dB. Las ligeras variaciones decimales entre este entorno ideal y los escenarios con interferencias se atribuyen a fluctuaciones naturales del ruido térmico del sensor CMOS o ajustes menores de cuantificación en las capturas de ese instante, más que a un impacto real de la iluminación externa.

Por otro lado, la métrica de BER se mantiene por debajo del límite experimental de $2,5 \times 10^{-4}$ para todos los casos probados. Este umbral corresponde a la transmisión ininterrumpida y libre de errores de un volumen de 3,920 bits (equivalente a 140 tramas de 28 bits, transmitidas en ciclos de 12,8 segundos). La excepcional estabilidad de la SNR por encima del umbral de los 34 dB demuestra que, bajo la configuración de cámara establecida, el sistema OCC es altamente inmune a las fuentes de contaminación lumínica analizadas. Las colas de probabilidad de los niveles '0' y '1' están tan alejadas del umbral de decisión que el enlace garantiza una fiabilidad total sin pérdida de paquetes en el tramo evaluado.

Escenario	Luz de techo	Pantalla tras LED	SNR (dB)	BER
(a)	Encendida	Encendida	34.68	$< 2,5 \times 10^{-4}$
(b)	Apagada	Apagada	34.76	$< 2,5 \times 10^{-4}$
(c)	Encendida	Apagada	34.68	$< 2,5 \times 10^{-4}$
(d)	Apagada	Encendida	35.68	$< 2,5 \times 10^{-4}$

Tabla 5.1: Comparativa de SNR y (BER) bajo diferentes condiciones de iluminación ambiental.

Nota: Valores extraídos de la peor lectura en consola del sistema basados en clasificación GMM. Las variaciones en la SNR son mínimas y no afectan a la BER, demostrando la robustez del sistema frente al ruido ambiental.

5.1.2. Parámetros del sensor de imagen

La etapa de captura y demodulación del nodo receptor está implementada sobre un módulo de cámara de la arquitectura Raspberry Pi, gestionado mediante la interfaz de programación Picamera2. Para garantizar una lectura ágil en tiempo real y acotar la carga computacional del DSP, la resolución espacial del sensor se fijó en 640×480 píxeles con un formato de captura RGB que posteriormente se transforma a escala de grises para la evaluación de intensidad luminosa. Para preservar la linealidad y fiabilidad del canal óptico, resulta imperativo evitar que el *hardware* modifique la imagen de manera autónoma. Por ello, se deshabilitaron por *software* los algoritmos de autoexposición (`AeEnable = False`) y el balance de blancos automático (`AwbEnable = False`). El sistema se forzó a operar con una tasa de captura constante y bloqueada de 30 FPS. En base a esta frecuencia, el diseño del enlace de comunicaciones estableció una relación de sobremuestreo de 3 fotogramas por bit ($N_{f_{pb}} = 3$), lo que permite a la lógica del receptor alinearse y muestrear el estado del LED (modulación OOK, modelada en el receptor mediante GMM de 2 componentes) de forma segura en el fotograma central de cada bit transmitido. A nivel radiométrico, se ajustaron dos parámetros críticos de bajo nivel para aislar la señal útil del ruido ambiental: el tiempo de exposición

y la ganancia del sensor. El tiempo de exposición (exposure time) se redujo de manera extrema a $100 \mu\text{s}$. Esta obturación ultrarrápida es clave en OCC, ya que atenúa drásticamente la captación de luz parásita de fondo e impide la saturación del píxel al observar directamente la fuente LED. Por su parte, la ganancia analógica del *hardware* (analogue gain) se fijó en su valor unitario (1,0), minimizando así la inyección de ruido electrónico térmico y de amplificación en la matriz de píxeles.

Parámetro / componente	Configuración / valor	Propósito
Distancia del enlace (d)	60 cm	Establecimiento de una línea de vista (LoS) estática sobre la zona de trabajo.
Resolución del sensor	640×480 píxeles	Alivio computacional. Reduce drásticamente la latencia del DSP por cada toma.
Frecuencia de captura	30 FPS fijos	Condición innegociable para fijar el anclaje temporal con la fuente emisora.
Tasa de sobremuestreo	3 fotogramas / bit	Búsqueda del símbolo óptimo centrando la lectura en la imagen intermedia.
Exposición y ganancia	$100 \mu\text{s}$ / Analógica 1.0	Evitar saturación por luz ambiental y minimizar ruido electrónico.
Controles automáticos	Autoexposición y AWB OFF	Garantía de linealidad absoluta a lo largo de todo el proceso de muestreo.

Tabla 5.2: Resumen de la configuración por *software* de los parámetros del sensor de imagen receptor.

Nota: Parámetros implementados directamente sobre el *hardware* de captura mediante la interfaz Picamera2 de Python para aislar el experimento de variables lumínicas externas.

5.2. Rendimiento del procesamiento digital de señales

5.2.1. Rendimiento en términos de memoria RAM

Para evaluar la viabilidad del despliegue del receptor OCC, se ha llevado a cabo un perfilado dinámico del consumo de memoria (*memory profiling*). Mediante la herramienta de análisis *memray*, se ha monitorizado la evolución temporal de la asignación de memoria durante la ejecución del algoritmo de recepción y demodulación.

En la Figura 5.4 se detalla la evolución del tamaño de la memoria residente, que representa la memoria RAM física total asignada al proceso.

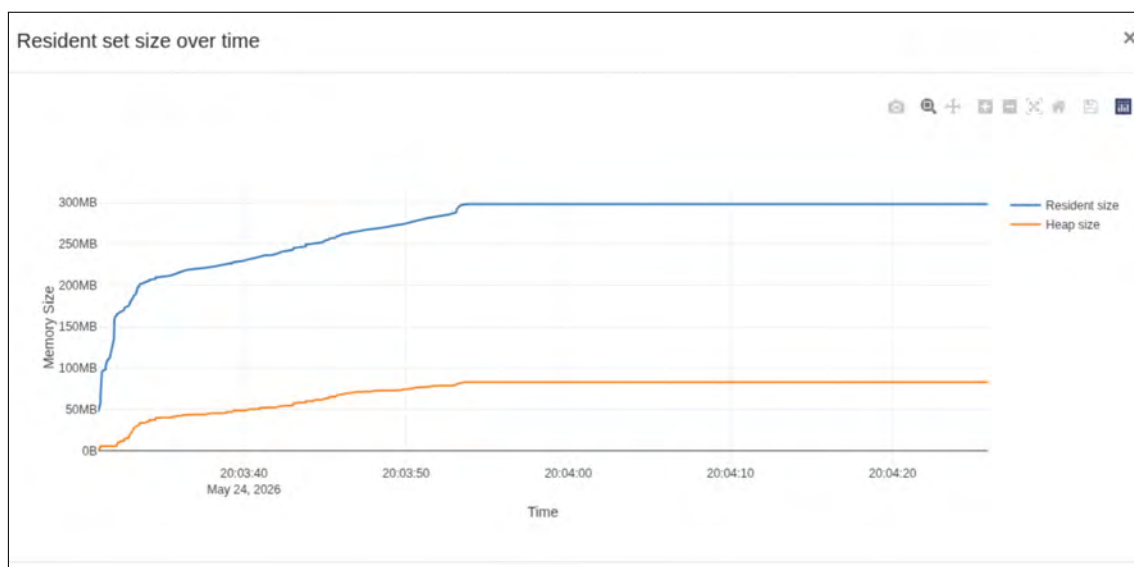


Figura 5.4: Consumo de memoria de la aplicación receptora OCC.

La monitorización de la huella temporal saca a la luz una dualidad operativa muy marcada:

- **Fase transitoria (*overhead* de inicialización)**

Rozando los 300 MB de pico, el consumo de memoria RSS sufre un incremento escalonado masivo durante los primeros 20 segundos. Detrás de esta saturación se esconde la carga inicial del entorno. El motor algorítmico

arrastra consigo dependencias extremadamente pesadas (SciPy, los modelos de mezcla gaussiana de Scikit-Learn y las rutinas de visualización de Matplotlib). Al tratarse de módulos apoyados en extensiones precompiladas en C/C++, su importación asesta un golpe computacional crítico. El resultado directo es una penalización insalvable en los tiempos de arranque en frío.

■ Régimen permanente

Una vez superada la fase de inicialización, la curva de memoria alcanza una línea estable. El *Heap* dinámico oscila de forma sostenida en torno a los 80-90 MB, mientras que el RSS se mantiene estático por debajo de los 300 MB. Esta estabilización es un indicador de robustez en la implementación del bucle principal de procesamiento de la señal de vídeo; confirma la correcta gestión de los recursos durante la extracción continua de los frames y garantiza la ausencia de fugas de memoria que pudieran comprometer la disponibilidad del nodo IoT en despliegues prolongados.

Hay que tener en cuenta en este análisis que se ha decidido realizar teniendo activadas todas las métricas y ventanas de visualización de datos. El dispositivo en producción tendría desactivadas estas opciones y descargaría bastante el consumo de memoria.

5.2.2. Rendimiento en términos de tiempo

La viabilidad de un receptor OCC basado en dispositivos de bajo coste depende críticamente de su capacidad para ejecutar los algoritmos de demodulación en tiempo real. Dado que el sensor captura de forma ininterrumpida a una frecuencia de 30 FPS, el sistema dispone de una ventana temporal estricta de 33,33 ms por fotograma. Si el ciclo de decodificación excede este umbral, los fotogramas se acumularán en la memoria, provocando un desbordamiento del búfer, la pérdida de datos y la desincronización del enlace óptico.

Para auditar el rendimiento y localizar posibles cuellos de botella, se creó el código implementando un perfilado de tiempos de ejecución de alta resolución (*time.perf_counter*). El ciclo completo de una iteración en el nodo receptor se segmentó en cuatro etapas críticas, delimitadas por las marcas de tiempo t_0 a t_4 . Los resultados, promediados en ventanas de 30 iteraciones, se dividen de la siguiente manera:

1. Extracción de cola comunicación entre procesos (IPC) ($t_1 - t_0$)

Esta etapa registra un tiempo medio de 11,80 ms, un valor que requiere una interpretación precisa. Esta latencia no representa una carga de cómputo puro, sino que está compuesta por dos factores. En primer lugar, la sobrecarga de la IPC: la serialización (*pickling*) y transferencia de matrices de imagen de un megabyte entre los espacios de memoria aislados de la cámara y el decodificador requiere tiempo de CPU. En segundo lugar, y de mayor impacto, actúa como una barrera de sincronización: dado que el procesamiento algorítmico (DSP + visualización) consume apenas unos 17 ms, el hilo decodificador finaliza su ciclo antes de que el sensor fotográfico (limitado a 33,33 ms por sus 30 FPS) capture la siguiente imagen. En consecuencia, la función de extracción entra en un estado de bloqueo inactivo (*blocking wait*), esperando la disponibilidad del siguiente fotograma y auto-regulando el ritmo del procesador.

2. Matemáticas DSP ($t_2 - t_1$)

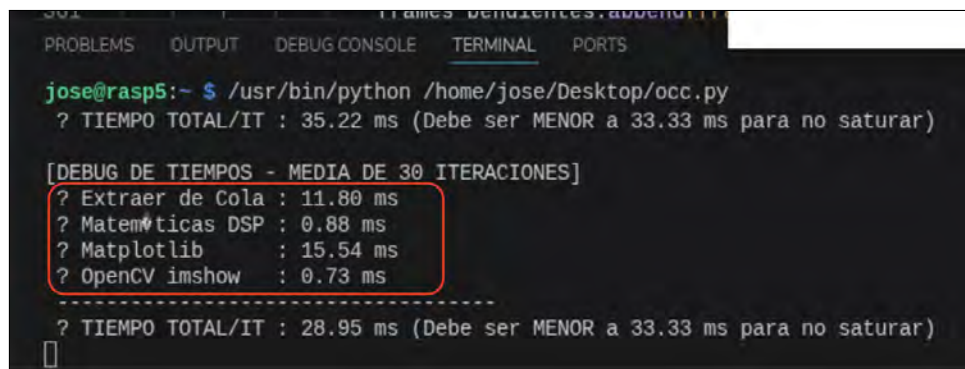
Este intervalo encarna el auténtico motor computacional del receptor. Aquí se cronometra exclusivamente la carga algorítmica que exige la demodulación. El proceso arranca capturando la intensidad a nivel de píxel para estructurarla de inmediato mediante *batching*. A continuación, el sistema ejecuta una binarización adaptativa. El código fuerza entonces la sincronización de símbolo avanzando sobre los flancos de la señal. Todo este esfuerzo analítico finaliza en el desensamblado de la trama óptica: el programa localiza el preámbulo, aísla el *payload* útil y obtiene la operación certificando la paridad del mensaje.

3. Procesamiento analítico y gráfico ($t_3 - t_2$)

Esta etapa gestiona la carga impuesta por la biblioteca *Matplotlib*. Involucra la actualización dinámica del osciloscopio virtual, el histograma en vivo y, periódicamente, la ejecución de la inferencia estadística mediante el ajuste espacial por modelos de mezclas gaussianas (GMM de 2 componentes), responsable de estimar la SNR, la BER y el umbral dinámico de decisión.

4. Renderizado de interfaz visual ($t_4 - t_3$)

Contabiliza el sobrecoste introducido por la biblioteca *OpenCV* (`cv2.imshow`) y el dibujo matricial en pantalla de los metadatos geométricos, como las cruces de selección de píxel y las etiquetas de estado superpuestas sobre el flujo de vídeo en tiempo real.



```
jose@rasp5:~ $ /usr/bin/python /home/jose/Desktop/occ.py
? TIEMPO TOTAL/IT : 35.22 ms (Debe ser MENOR a 33.33 ms para no saturar)

[DEBUG DE TIEMPOS - MEDIA DE 30 ITERACIONES]
? Extraer de Cola : 11.80 ms
? Matemáticas DSP : 0.88 ms
? Matplotlib      : 15.54 ms
? OpenCV imshow  : 0.73 ms
-----
? TIEMPO TOTAL/IT : 28.95 ms (Debe ser MENOR a 33.33 ms para no saturar)
```

Figura 5.5: Consumo de tiempo de la aplicación receptora OCC.

El análisis de estos intervalos demuestra empíricamente que el procesado puramente matemático y lógico (DSP) es extremadamente eficiente. La carga computacional predominante del sistema recae en las bibliotecas de representación visual gráfica y en la extracción de los frames de la cola. No obstante, al modular la frecuencia de actualización de estas gráficas, el sistema logra mantener el tiempo total de ciclo (la suma de las cuatro etapas) estrictamente por debajo del umbral crítico de los 33,33 ms, garantizando una ejecución robusta, fluida y sin pérdida de información temporal.

5.3. Métricas de comunicación y evaluación de potencia óptica

A diferencia de las pruebas de atenuación geométrica convencionales donde se varía la distancia física, en esta fase experimental se optó por un paradigma estático. El nodo emisor y el sensor de imagen se mantuvieron fijos y perfectamente alineados en su línea de vista (LoS). La variable de estudio fue la potencia óptica radiada por el emisor, controlada de forma precisa mediante modulación por ancho de pulsos (PWM) desde el microcontrolador.

Este enfoque permite caracterizar la sensibilidad límite del receptor de cámara, analizando cómo la degradación puramente energética del canal afecta a la SNR y, consecuentemente, a la BER.

5.3.1. Modelo matemático de potencia de emisión

El nodo emisor utiliza un diodo LED de espectro azul. Para determinar la potencia real consumida y radiada en cada escenario de prueba, es necesario analizar el circuito eléctrico de polarización, compuesto por una fuente de alimentación de 3.3 V (V_{pin}) y una resistencia limitadora en serie de 138 ohmios (R_{serie}). Asumiendo una caída de tensión nominal en polarización directa para un LED azul de 3.0 V (V_{LED}), la corriente instantánea (I) que atraviesa el componente en estado alto lógico se define por la Ley de Ohm:

$$I = \frac{V_{pin} - V_{LED}}{R_{serie}}$$

$$I = \frac{3,3 - 3,0}{138} \approx 0,00217 \text{ A} \quad (2,17 \text{ mA})$$

Esta corriente de 2.17 mA resulta óptima y segura para los pines GPIO del No-

deMCU. La potencia instantánea (P_{inst}) disipada por el LED durante su estado de encendido es:

$$P_{inst} = V_{LED} \cdot I = 3,0 \cdot 0,00217 \approx 0,00652 \text{ W} \quad (6,52 \text{ mW})$$

Dado que el protocolo transmite datos utilizando un esquema OOK, la potencia promedio final (P_{avg}) depende del ciclo de trabajo PWM (D), el cual viene dado por la relación entre el valor de tensión del registro del NodeMCU (ledIntervaloTension) y la resolución del ADC de 10 bits (1023). Por ejemplo, para una modulación al 50 %:

$$D = \frac{512}{1023} \approx 0,50$$

$$P_{avg} = P_{inst} \cdot D = 6,52 \text{ mW} \cdot 0,50 \approx 3,26 \text{ mW}$$

Este modelo permite mapear de forma exacta el porcentaje de ciclo de trabajo asignado en el emisor con la potencia en milivatios radiada hacia el canal óptico.

5.3.2. Análisis de SNR y BER frente a la potencia del LED

Para evaluar el impacto de la potencia en la decodificación, se realizó un barrido experimental desde el 50 % de la capacidad de emisión (3.26 mW) descendiendo progresivamente hasta alcanzar el umbral de fallo del sistema.

Durante los escenarios de alta potencia (entre el 30 % y el 50 %), el sistema demostró un comportamiento excepcionalmente robusto, registrando BER por debajo de $2,5 \times 10^{-4}$, con una SNR superior a los 24 dB. Resulta de especial interés observar que el punto de máxima SNR no se alcanzó a máxima potencia (50 %, SNR $\approx$ 24 dB), sino al 30 % de potencia (1.96 mW, SNR $\approx$ 33 dB). Este fenómeno se justifica por la saturación del sensor CMOS: a potencias muy elevadas a distancias cortas, los fotodiodos de la cámara alcanzan su pozo de

capacidad máxima (valor de píxel 255), introduciendo recortes en la señal que degradan ligeramente la separación gaussiana calculada por el GMM.

El sistema mantiene la viabilidad del enlace descendiendo hasta el 25 % (1.63 mW). Sin embargo, al cruzar la frontera de los 1.50 mW, la métrica SNR experimenta una caída abrupta (efecto acantilado). Como se detalla en la Tabla 5.3, a una potencia del 22 % (1.43 mW) la SNR se desploma hasta los 7.7 dB, elevando la BER al rango de 10^{-4} .

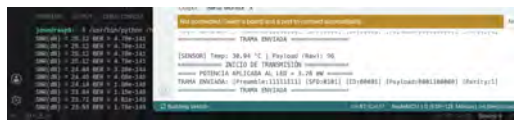
El umbral crítico de ruptura del canal se identificó experimentalmente en el 21 % de potencia (1.36 mW). En este punto, la energía óptica captada por el píxel se confunde con el ruido térmico y ambiental del entorno; el modelo predictivo de decodificación arroja fallos constantes en la verificación de paridad de la trama reensamblada. Por debajo de este nivel de excitación (20 % y 18 %), el algoritmo es incapaz de alinear la ventana deslizante con el preámbulo, resultando en una pérdida total del enlace OCC.

Ciclo PWM	Potencia LED	SNR media	BER estimada	Estado de la trama	
50 %	3.26 mW	24.84 dB	$< L.E.$	Válida	(Paridad OK)
40 %	2.61 mW	27.72 dB	$< L.E.$	Válida	(Paridad OK)
30 %	1.96 mW	33.79 dB	$< L.E.$	Válida	(Rendimiento Óptimo)
25 %	1.63 mW	27.67 dB	$< L.E.$	Válida	(Paridad OK)
23 %	1.50 mW	12.25 dB	$2,91 \times 10^{-9}$	Válida	(Paridad OK)
22 %	1.43 mW	7.71 dB	$8,15 \times 10^{-5}$	Válida	(Margen Crítico)
21 %	1.36 mW	7.48 dB	$6,78 \times 10^{-5}$	Error	(Paridad Fallida)
20 %	1.30 mW	8.17 dB	$1,23 \times 10^{-4}$	Sin datos	(Pérdida de sincronía)
18 %	1.17 mW	8.75 dB	$6,48 \times 10^{-9}$	Sin datos	(Pérdida de sincronía)

Tabla 5.3: Evolución empírica de las métricas del enlace OCC en función de la potencia óptica transmitida.

Nota: El sistema encuentra su límite físico de decodificación en 1.36 mW. Por debajo de esta energía, la relación señal a ruido se aproxima a niveles que impiden la convergencia del modelo GMM y el reensamblado del preámbulo.

(*) $< L.E.$ (Límite Experimental): Valores teóricos de BER infinitesimales que caen por debajo de la capacidad empírica de medición del experimento. Al no registrarse errores en el volumen de datos transmitido, se establece empíricamente que la $BER < 2,5 \times 10^{-4}$.



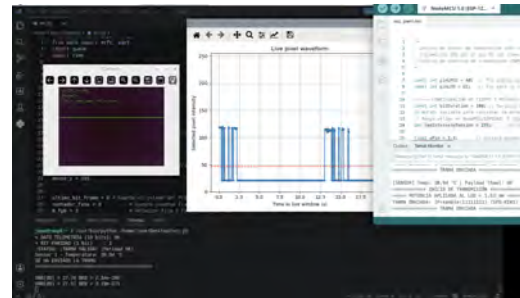
(a) Potencia al 50 % (3.26 mW)



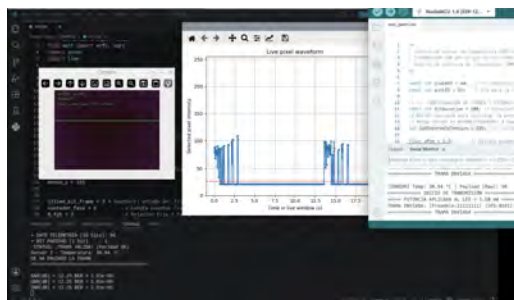
(b) Potencia al 40 % (2.61 mW)



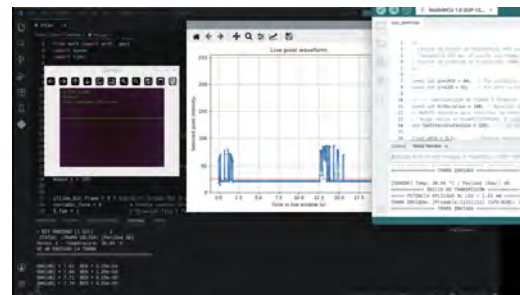
(c) Potencia al 30 % (1.96 mW) - Óptimo



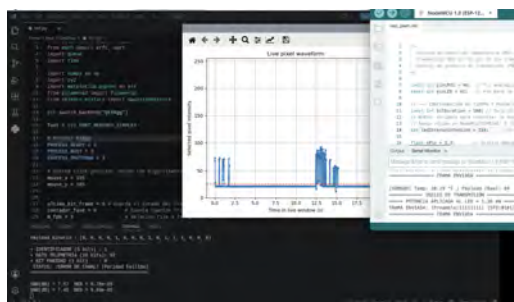
(d) Potencia al 25 % (1.63 mW)



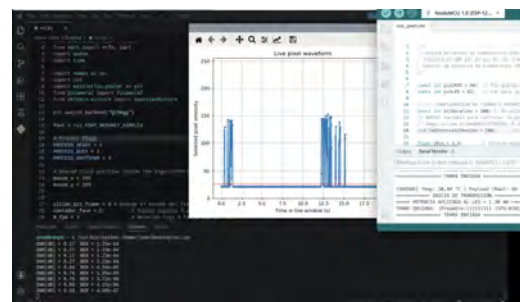
(e) Potencia al 23 % (1.50 mW)



(f) Potencia al 22 % (1.43 mW)



(g) Potencia al 21 % (1.36 mW) - Umbral crítico



(h) Potencia al 20 % (1.30 mW) - Pérdida total

Figura 5.6: Comparativa del impacto de la potencia de emisión del LED en la reconstrucción de la señal, relación señal a ruido y lectura de la trama de datos OCC en el receptor.

5.4. Latencia de extremo a extremo

En el diseño y evaluación de sistemas de comunicación para el IoT, garantizar una alta fiabilidad en la decodificación (BER nula o SNR óptima) es solo una parte del desafío. Resulta igualmente crítico asegurar que la información temporal del entorno físico fluya a través de la red y llegue a las aplicaciones del usuario final dentro de unos márgenes de tiempo operativos. Por tanto, este apartado se centra en definir y cuantificar la latencia de extremo a extremo (End-to-End o E2E) del enlace OCC implementado.

Para abordar este análisis con rigor metodológico, es necesario definir un modelo teórico que desglose la latencia total del sistema en sus diferentes etapas físicas y de *software*. La latencia total (t_{total}) se modela como la suma de tres grandes bloques secuenciales:

$$t_{total} = t_{adq} + t_{proc} + t_{serv}$$

Donde cada componente representa una fase distinta del flujo de datos:

1. Tiempo de adquisición (t_{adq})

Comprende el intervalo necesario para que el microcontrolador interroge al entorno físico. Abarca la lectura del voltaje analógico proporcionado por el sensor de temperatura LM35, la transformación matemática, la estructuración de los 28 bits de la trama OCC (con su correspondiente cálculo de paridad) y el envío a través de la modulación física del diodo LED.

2. Tiempo de canal y procesamiento (t_{proc})

Representa el lapso que transcurre desde la emisión óptica hasta la obtención del dato digitalizado en el receptor. Incluye el tiempo de propagación de la luz en el espacio libre (técnicamente despreciable a distancias de laboratorio), el tiempo de integración del sensor de la cámara (fijado en 100 μ s)

y, fundamentalmente, la carga computacional en el nodo receptor. Esto engloba la extracción de los fotogramas de la memoria compartida (cola IPC) y la ejecución completa del algoritmo DSP y el modelo GMM en Python. Tal y como se demostró empíricamente en el análisis de rendimiento previo evaluado sobre la Raspberry Pi 5, este bloque domina la latencia intrínseca de recepción, asumiendo un coste temporal aproximado de 30 ms.

3. Tiempo de servicio o exposición de la API (t_{serv})

Contabiliza el retraso introducido en la última parte del *software*. Se inicia en el instante en que el script de demodulación valida la paridad de la trama reensamblada y finaliza cuando el valor de la telemetría es debidamente empaquetado (en formato JSON) y expuesto de forma exitosa a través del protocolo de red de la capa de aplicación (HTTP) para su consumo por un cliente y se recibe la confirmación por parte del servidor.

4. Tiempo total (t_{total}): $t_{adq} + t_{proc} + t_{serv}$

5.4.1. Tiempo de adquisición (t_{adq})

El primer eslabón de la cadena de latencia corresponde al tiempo de adquisición y preparación del dato en el nodo emisor. Para cuantificar empíricamente este valor, se instrumentó el firmware del microcontrolador (NodeMCU) utilizando los temporizadores internos del *hardware* de alta resolución. Se estableció el inicio del ciclo métrico en la instrucción previa a la interrogación del ADC y su finalización inmediatamente después de empaquetar la trama de datos OCC, justo antes de ejecutar la rutina de modulación óptica del LED.

```
[SENSOR] Temp: 30.29 °C | Payload (Raw): 94
===== INICIO DE TRANSMISIÓN =====
===== POTENCIA APLICADA AL LED = 1.36 mW =====
TRAMA ENVIADA: [Preamble:11111111] [SFD:0101] [ID:00001] [Payload:0001011110] [Parity:0]
===== TRAMA ENVIADA =====
[METRICAS] Tiempo de adquisicion (t_adq): 169 microsegundos.
```

Ln 160, Col 37 NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module) on /dev/cu.usbserial-10 2

Figura 5.7: Consola de depuración del NodeMCU donde se puede ver qué se ha impreso a través del puerto serie, a parte de otra información, el tiempo de adquisición.

Las mediciones experimentales obtenidas a través de la consola arrojan un tiempo de adquisición sostenido de 169 μ s (0.169 ms) (ver Figura 5.7). Este intervalo temporal engloba las siguientes operaciones a nivel de procesador: la lectura física del canal analógico acoplado al sensor LM35, la ejecución de operaciones algebraicas en coma flotante para la traducción del voltaje a grados centígrados, el empaquetado de las cabeceras (preámbulo, identificador y carga útil) mediante operaciones de desplazamiento lógico (bit-shifting) y, finalmente, el cálculo del bit de paridad par iterando sobre la trama completa.

Considerando que la arquitectura del microcontrolador opera a una frecuencia de reloj de 80 MHz, la ejecución de este bloque secuencial se resuelve de manera muy rápida. En el cómputo global de la latencia de extremo a extremo (E2E), estos 169 μ s suponen un impacto temporal casi despreciable. Esto demuestra que la etapa de lectura física e inyección de datos lógicos en el canal emisor opera con una eficiencia óptima y no representa un cuello de botella para el despliegue de esta tecnología en aplicaciones IoT.

Por tanto, ya se dispone de el primer dato:

$$t_{adq} = 0,169 \text{ ms}$$

5.4.2. Tiempo de canal y procesamiento (t_{proc})

Este valor ya se ha calculado anteriormente en el apartado Rendimiento en términos de tiempo (ver Figura 5.5), arrojándonos un tiempo de unos 30 ms. Por tanto:

$$t_{proc} = 30 \text{ ms}$$

5.4.3. Tiempo de servicio o exposición de la API (t_{serv})

Para evaluar el rendimiento temporal del sistema y medir la latencia introducida en el volcado de datos, se ha implementado otro mecanismo de *profiling* directamente en la capa de transmisión de la aplicación desarrollada en Python. El objetivo de esta medición es cuantificar el retardo extremo a extremo desde el instante en que el sistema de visión computacional y el DSP validan la trama OOK reconstruida, hasta que la información es registrada físicamente en el motor de base de datos de series temporales, InfluxDB.

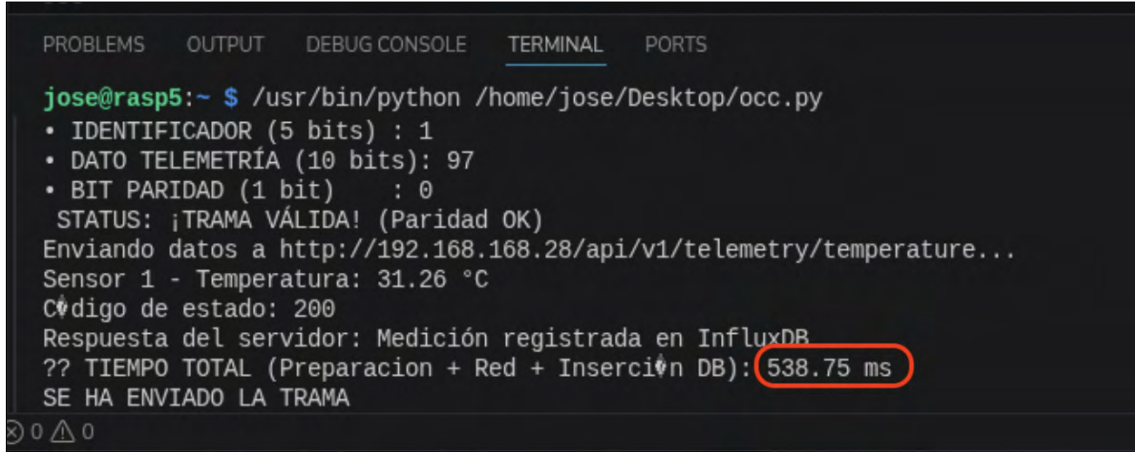
El temporizador se inicializa inmediatamente antes de la fase de preparación del *payload* JSON, englobando así el tiempo de serialización de los datos.

La transmisión se realiza a través del protocolo HTTP empleando una arquitectura RESTful. Se realiza una petición de tipo POST al *endpoint* del servidor Spring Boot:

/api/v1/telemetry/temperature

Para asegurar la validez de la medición, el sistema detiene el cronómetro y calcula la diferencia temporal única y exclusivamente cuando se verifica que la transacción ha sido exitosa. Esto se logra interrogando el código de estado HTTP

(*response.status_code*) devuelto por el servidor. Solo si se recibe un código de éxito de la serie 2xx, típicamente 200 OK o 201 Created (lo que implica que la base de datos ha confirmado la escritura en disco sin excepciones), se consolida la métrica.



```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
jose@rasp5:~ $ /usr/bin/python /home/jose/Desktop/occ.py
• IDENTIFICADOR (5 bits) : 1
• DATO TELEMETRÍA (10 bits): 97
• BIT PARIDAD (1 bit) : 0
STATUS: ¡TRAMA VÁLIDA! (Paridad OK)
Enviando datos a http://192.168.168.28/api/v1/telemetry/temperature...
Sensor 1 - Temperatura: 31.26 °C
Código de estado: 200
Respuesta del servidor: Medición registrada en InfluxDB
?? TIEMPO TOTAL (Preparacion + Red + Inserción DB): 538.75 ms
SE HA ENVIADO LA TRAMA
```

Figura 5.8: Consola de depuración del script receptor en Python donde se muestra el tiempo de servicio para el envío y registro exitoso de la telemetría en InfluxDB.

Como se puede observar en las pruebas experimentales realizadas (ver Figura 5.8), tras la demodulación y reconstrucción exitosa de una trama —identificando el sensor 1 y calculando una temperatura física de 31.26 °C tras superar la comprobación de paridad par— el sistema procesa la inserción en la base de datos InfluxDB con un tiempo total consolidado de 538.75 ms. Este tiempo engloba todo el ciclo de vida de la red: preparación del paquete de aplicación, latencia propia del enlace de red local hacia la IP 192.168.168.28, procesamiento en el controlador Java y escritura final en el bucket de InfluxDB.

Por tanto:

$$t_{serv} = 538,75 \text{ ms}$$

5.4.4. Tiempo total (t_{total})

El retardo extremo a extremo asociado al ciclo de vida completo de la información puede modelarse matemáticamente mediante la suma de sus componentes temporales según la expresión:

$$t_{total} = t_{adq} + t_{proc} + t_{serv}$$

$$t_{total} = 0,169 \text{ ms} + 30 \text{ ms} + 538,75 \text{ ms}$$

$$t_{total} = 568,919 \text{ ms} \approx 568,9 \text{ ms}$$

El análisis de esta suma evidencia que, mientras los tiempos de adquisición y procesamiento local ($t_{adq} + t_{proc}$) se mantienen en márgenes altamente eficientes debido a la optimización del procesamiento por bloques, el término del servicio (t_{serv}) actúa como el factor determinante en la latencia total, estando estrechamente ligado a la sobrecarga inherente del protocolo de aplicación HTTP y al tiempo de sincronización y persistencia de datos en InfluxDB.

Capítulo 6

Conclusiones, limitaciones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado con éxito la viabilidad técnica de un sistema de sensorización para IoT basado en la tecnología OCC, utilizando *hardware* comercial de bajo coste. Se han cumplido íntegramente los tres objetivos principales propuestos en la investigación:

En primer lugar, se validó el enlace OCC mediante el diseño e implementación de un transmisor basado en un microcontrolador NodeMCU con un diodo LED estándar de 5mm y un nodo receptor compuesto por una Raspberry Pi 5 y una cámara CMOS convencional. Las pruebas experimentales evidenciaron que el sistema posee una alta inmunidad frente a las interferencias lumínicas ambientales, logrando mantener una BER nula y una SNR superior a los 34 dB al operar con los parámetros de la cámara estrictamente fijados, como un tiempo de exposición ultracorto de 100 μs y una ganancia analógica unitaria.

En segundo lugar, se desarrolló satisfactoriamente un flujo de procesamiento digital de señales eficiente para decodificar la modulación OOK. Este canal de *soft-*

ware implementó algoritmos dinámicos basados en GMM para el cálculo de umbrales adaptativos por máxima verosimilitud, permitiendo una binarización precisa incluso ante atenuaciones del canal.

Y tercero, se alcanzó la completa interoperabilidad del sistema mediante el desarrollo de una capa de aplicación robusta. Se implementó una arquitectura web orientada a telemetría empleando una API RESTful (desarrollada con Spring Boot) y una base de datos de series temporales (InfluxDB) para la persistencia de datos.

El resultado final confirma que es plenamente factible desplegar redes de sensores OCC fiables y fácilmente integrables en arquitecturas de red modernas, prescindiendo del uso de infraestructuras complejas o costosos fotodetectores dedicados.

6.2. Limitaciones

La fase de pruebas arroja, indudablemente, un balance muy favorable. El experimento cumple su cometido. Sin embargo, extrapolar este despliegue hacia entornos de uso real destapa carencias insalvables. Las barreras físicas inherentes al canal óptico, sumadas a la rigidez metodológica de la captación, vetan por completo la viabilidad operativa del sistema lejos de un escenario de laboratorio estrictamente controlado.

La principal restricción de la capa física es el requerimiento estricto de mantener una línea de visión directa entre los dispositivos. El enlace experimental demostró su robustez operando en un entorno estático con una alineación perfecta a 60 cm de distancia. Sin embargo, el sistema exhibe una alta sensibilidad al posicionamiento de la cámara; cualquier desalineación, vibración o rotación geométrica puede desplazar la proyección geométrica del LED transmisor fuera del campo de visión del sensor o de la ROI, por lo que se reduciría drásticamente la intensidad percibida y corrompería el enlace.

Por otro lado, la capacidad de canal está fuertemente limitada por una baja tasa de transferencia de datos. Al basar la recepción en un muestreo temporal equivalente a un obturador *global shutter*, la frecuencia de muestreo máxima está acotada por la tasa de fotogramas del sensor (fijada a 30 FPS). Esta limitación física, sumada a la necesidad de mantener una relación de sobremuestreo de 3 fotogramas por bit para asegurar la estabilidad, restringe por completo el ancho de banda por el límite de Nyquist.

Por último, existen importantes cuellos de botella a nivel de procesamiento que penalizan la latencia de extremo a extremo. Si bien el bloque puramente matemático del DSP es bastante eficiente (ejecutándose en fracciones de milisegundo), la latencia total del sistema asciende a unos 568,9 ms. Este tiempo está completamente dominado por el sobrecoste introducido en la capa de aplicación durante el tiempo de servicio HTTP y la escritura en la base de datos, así como por los retrasos de la comunicación entre procesos al extraer pesadas matrices de imagen desde la cámara.

6.3. Trabajo futuro

Para solucionar las limitaciones identificadas y aumentar las capacidades de la red OCC, se proponen múltiples líneas de investigación futura y extensiones del sistema.

Para independizar el sistema de la estricta alineación y su sensibilidad geométrica se plantea la integración de técnicas de seguimiento dinámico de la ROI apoyadas en *machine learning* y *deep learning*. La incorporación de redes neuronales convolucionales (como YOLOv8) permitiría adaptar la detección en entornos de alta movilidad o lidiar con oclusiones temporales, reemplazando la extracción espacial estática por un encuadre inteligente en tiempo real.

En el nivel de enlace de datos la actual comprobación de errores depende de un bit de paridad básico que fuerza el descarte completo de la trama ante una

alteración mínima de la trama. La inclusión de técnicas de corrección de errores hacia adelante (FEC) aumentaría considerablemente la robustez del canal óptico y mitigaría la pérdida de paquetes a mayores distancias. Del mismo modo, el sistema está preparado para escalar hacia despliegues con múltiples transmisores mediante un enfoque *MIMO* espacial, aprovechando que cada píxel de la cámara funciona como un receptor independiente. A esto se podría sumar una mejora del caudal de datos migrando de modulaciones de intensidad como la usada a sistemas multiplexados por color (*color shift keying*, CSK), por ejemplo.

Por último, para superar de manera radical los bajos índices de transmisión observados, resulta imprescindible cambiar hacia el aprovechamiento del efecto *rolling shutter*. Mientras que este trabajo se basó en un paradigma de exposición simultánea para garantizar la simplicidad matemática y la ausencia de distorsiones en nodos IoT, la arquitectura *rolling shutter* ejecuta un barrido secuencial de las líneas del sensor. Esta técnica permite transformar las veloces modulaciones temporales del LED en un patrón denso de franjas espaciales dentro de un único fotograma. La adopción e implementación de algoritmos de decodificación por franjas o basados en transiciones permitiría sobrepasar el cuello de botella del *frame rate* comercial (30-60 FPS) y escalar las velocidades de comunicación al orden de los kilobits por segundo empleando exactamente el mismo *hardware* analizado en este trabajo.

Bibliografía

- [1] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015. (Citado en la pág. 1.)
- [2] Statista, "Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2023, with forecasts from 2024 to 2030." <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>, 2024. Accedido: 11 de abril de 2026. (Citado en la pág. 1.)
- [3] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, M. S. Islam, and Y. M. Jang, "A comparative survey of optical wireless technologies: Requirements and applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 92327–92359, 2020. (Citado en la pág. 1.)
- [4] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, 2015. (Citado en las págs. 2, 3 y 4.)
- [5] L. U. Khan, "Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges," *Digital communications and networks*, vol. 3, no. 2, pp. 78–88, 2017. (Citado en la pág. 2.)
- [6] S. R. Teli, V. Matus, O. Younus, K. Eöller-Jarošíkova, X. Li, N. B. Hassan, B. Lin, M. Figueiredo, L. N. Alves, A. M. Vegni, S. Zvanovec, R. Perez-Jimenez, and Z. Ghassemlooy, "Optical camera communications: concept,

- marketing, implementation, challenges and applications,” *Science China Information Sciences*, vol. 68, 2025. (Citado en las págs. 2, 5, 19 y 20.)
- [7] N. Saeed, S. Guo, K.-H. Park, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Optical camera communications: Survey, use cases, challenges, and future trends,” *Physical Communication*, vol. 37, p. 100900, 2019. (Citado en las págs. 2, 17 y 20.)
- [8] K. Mahalakshmi, K. S. Kumari, D. Yuvaraj, R. Keerthika, *et al.*, “Healthcare visible light communication,” *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 118, no. 11, pp. 345–348, 2018. (Citado en la pág. 3.)
- [9] M. A. Arfaoui, M. D. Soltani, I. Tavakkolnia, A. Ghayeb, M. Safari, C. M. Assi, and H. Haas, “Physical layer security for visible light communication systems: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1887–1908, 2020. (Citado en la pág. 3.)
- [10] N. Saha, M. S. Ifttekhar, N. T. Le, and Y. M. Jang, “Survey on optical camera communications: challenges and opportunities,” *Int Optoelectronics*, vol. 9, no. 5, pp. 172–183, 2015. (Citado en la pág. 4.)
- [11] W. A. Cahyadi, Y. H. Chung, Z. Ghassemlooy, and N. B. Hassan, “Optical camera communications: Principles, modulations, potential and challenges,” *Electronics*, vol. 9, no. 9, p. 1339, 2020. (Citado en las págs. 4, 14, 15, 21, 36 y 38.)
- [12] C. Danakis, M. Afgani, G. Povey, I. Underwood, and H. Haas, “Using a cmos camera sensor for visible light communication,” in *2012 IEEE Globecom Workshops*, pp. 1244–1248, IEEE, 2012. (Citado en las págs. 5, 17 y 37.)
- [13] A. G. Bell, “On the production and reproduction of sound by light,” *American Journal of Science*, vol. s3-20, no. 118, pp. 305–324, 1880. (Citado en la pág. 13.)
- [14] T.-C. Yu, W.-T. Huang, W.-B. Lee, C.-W. Chow, S.-W. Chang, and H.-C. Kuo, “Visible light communication system technology review: Devices, architectu-

- res, and applications,” *Crystals*, vol. 11, no. 9, 2021. (Citado en las págs. 13 y 15.)
- [15] H. Nguyen, N. T. Le, D. T. A. Le, and Y. M. Jang, “Design and implementation of a hybrid optical camera communication system for indoor applications,” *Sensors*, vol. 24, no. 1, 2024. (Citado en la pág. 17.)
- [16] C.-W. Chow, C.-Y. Chen, and S.-H. Chen, “Visible light communication using mobile-phone camera with data rate higher than frame rate,” *Opt. Express*, vol. 23, pp. 26080–26085, Oct 2015. (Citado en las págs. 17, 36 y 41.)
- [17] T. Nguyen, A. Islam, T. Hossan, and Y. M. Jang, “Current status and performance analysis of optical camera communication technologies for 5g networks,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 4574–4594, 2017. (Citado en la pág. 18.)
- [18] V. Matus, V. Guerra, C. Jurado-Verdu, J. Rabadan, and R. Perez-Jimenez, “Demonstration of a sub-pixel outdoor optical camera communication link,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 10, pp. 1798–1805, 2021. (Citado en las págs. 18 y 19.)
- [19] E. Eso, S. Teli, N. B. Hassan, S. Vitek, Z. Ghassemlooy, and S. Zvanovec, “400m rolling-shutter-based optical camera communications link,” *Opt. Lett.*, vol. 45, pp. 1059–1062, Mar 2020. (Citado en la pág. 18.)
- [20] T. Zinda, K. Ito, and W. Chujo, “Rolling-shutter-based optical camera communication using distributed led array,” in *2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP)*, pp. 1–4, 2018. (Citado en las págs. 20 y 37.)
- [21] N.-T. Le and Y. M. Jang, “Performance evaluation of mimo optical camera communications based rolling shutter image sensor,” in *2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 140–144, 2016. (Citado en las págs. 21 y 31.)

- [22] M. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam, and Y. M. Jang, "A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 01 2018. (Citado en las págs. 22, 23 y 24.)
- [23] A. Liu, W. Shi, M. Safari, W. Liu, and J. Cao, "Design guidelines for optical camera communication systems: A tutorial," *IEEE Photonics Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 1–25, 2024. (Citado en las págs. 23 y 36.)
- [24] S.-H. Chen and C.-W. Chow, "Color-shift keying and code-division multiple-access transmission for rgb-led visible light communications using mobile phone camera," *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 1–6, 2014. (Citado en la pág. 24.)
- [25] J. Bae, N. T. Le, and J. T. Kim, "Smartphone image receiver architecture for optical camera communication," *Wireless Personal Communications*, vol. 93, pp. 1043–1066, jan 2017. (Citado en la pág. 24.)
- [26] X. Hu, P. Zhang, Y. Sun, X. Deng, Y. Yang, and L. Chen, "High-speed extraction of regions of interest in optical camera communication enabled by grid virtual division," *Sensors*, vol. 22, no. 21, p. 8375, 2022. (Citado en las págs. 25 y 42.)
- [27] O. S. Sitanggang, V. L. Nguyen, H. Nguyen, R. F. Pamungkas, M. M. Faridh, and Y. M. Jang, "Design and implementation of a 2d mimo occ system based on deep learning," *Sensors*, vol. 23, no. 17, 2023. (Citado en la pág. 25.)
- [28] H. Herfandi, O. Sanjerico Sitanggang, M. Rangga Aziz Nasution, I. Bagus Krishna Yoga Utama, M. Minhazur Rahman, H. Nguyen, S. Mon Ko, and Y. M. Jang, "Implementation of a multiple-transmitter rs-ofdm-based occ system with advanced bytetrack for mobility environments," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 119411–119426, 2025. (Citado en la pág. 25.)
- [29] B. W. Kim, J.-H. Lee, and S.-Y. Jung, "Transition-based data decoding for optical camera communications using a rolling shutter camera," *Curr. Opt. Photon.*, vol. 2, pp. 422–430, Oct 2018. (Citado en las págs. 26 y 29.)

- [30] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979. (Citado en la pág. 26.)
- [31] N. Buhl, "Image thresholding in image processing." <https://encord.com/blog/image-thresholding-image-processing/>, sep 2023. Accedido: 01-mayo-2026. (Citado en la pág. 27.)
- [32] R. Huang and T. Yamazato, "A review on image sensor communication and its applications to vehicles," *Photonics*, vol. 10, no. 6, 2023. (Citado en la pág. 28.)
- [33] IEEE Standards Association, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications Amendment 1: Higher Rate, Longer Range Optical Camera Communication (OCC)," Tech. Rep. IEEE 802.15.7a-2024, IEEE, 2024. (Citado en las págs. 29 y 43.)
- [34] Y. Onodera, Y. Nakayama, H. Takano, and D. Hisano, "Avoiding inter-light sources interference in optical camera communication," in *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, 2021. (Citado en la pág. 30.)
- [35] H. Wang, Z. Wu, S. Lu, H. Zhang, G. Ding, and S. Li, "Deep learning for signal demodulation in physical layer wireless communications: Prototype platform, open dataset, and analytics," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 30792 – 30801, 03 2019. (Citado en la pág. 30.)
- [36] K. Yu, J. He, and Z. Huang, "Decoding scheme based on cnn for mobile optical camera communication," *Applied Optics*, vol. 59, pp. 7109–7113, 08 2020. (Citado en la pág. 30.)
- [37] E. Bagheri, A. Gholami, and B. Nazari, "Mitigating inter-pixel interference in mimo-occ systems with deep learning: addressing out-of-focus blur and very

- low-resolution effects,” *Appl. Opt.*, vol. 64, pp. 9481–9488, Nov 2025. (Citado en la pág. 31.)
- [38] X. Sun, W. Shi, Q. Cheng, W. Liu, Z. Wang, and J. Zhang, “An led detection and recognition method based on deep learning in vehicle optical camera communication,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 05 2021. (Citado en la pág. 31.)
- [39] R. Arie, A. Brand, and S. Engelberg, “Compressive sensing and sub-nyquist sampling,” *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, vol. 23, no. 2, pp. 94–101, 2020. (Citado en la pág. 31.)
- [40] D. B. Judd, “The 1931 i. c. i. standard observer and coordinate system for colorimetry,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 23, pp. 359–374, Oct 1933. (Citado en la pág. 32.)
- [41] S. Rajagopal, R. Roberts, and S.-K. Lim, “Ieee 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support,” *IEEE Communications Magazine - IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, pp. 72–82, 03 2012. (Citado en la pág. 32.)
- [42] F. V. V. Vera, L. Muñoz, F. Pérez, L. B. Alvarez, S. Montejo-Sánchez, V. M. Icaza, L. Rodríguez-López, and G. Saavedra, “High-accuracy deep learning-based detection and classification model in color-shift keying optical camera communication systems,” *Sensors*, vol. 25, no. 17, 2025. (Citado en la pág. 32.)
- [43] A. Bansal, A. Bhatnagar, V. Sharma, and N. Sharma, “Optical integrated sensing and communication (o-isac): a unified framework for 6g and ai-powered intelligent networks,” *Journal of Optical Communications*. (Citado en la pág. 32.)
- [44] A. Boixader, C. Labella, M. Catalan, and J. Paradells, “A high-accuracy, scalable and affordable indoor positioning system using visible light positioning

- for automated guided vehicles,” *Electronics*, vol. 13, no. 1, 2024. (Citado en la pág. 32.)
- [45] P. Chavez-Burbano, S. Vitek, S. Teli, V. Guerra, J. Rabadan, R. Perez-Jimenez, and S. Zvanovec, “Optical camera communication system for internet of things based on organic light emitting diodes,” *Electronics Letters*, vol. 55, no. 6, pp. 334–336, 2019. (Citado en la pág. 36.)
- [46] V. Matus Icaza, *Contribution to the Experimental Channel Evaluation of Optical Camera Communication for Wireless Sensor Networks*. Doctoral dissertation, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España, July 2021. (Citado en la pág. 36.)
- [47] X. Zhang, A. A. Dowhuszko, M. Rêgo, P. Fonseca, L. N. Alves, J. Hämäläinen, and R. Wichman, “Symbol rate maximization in rolling-shutter occ: Design and implementation considerations,” *arXiv preprint arXiv:2602.08474*, 2026. (Citado en la pág. 38.)
- [48] P. Luo, Z. Ghassemlooy, H. Le Minh, X. Tang, and H.-M. Tsai, “Undersampled phase shift on-off keying for camera communication,” in *2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 1–6, 2014. (Citado en las págs. 39 y 40.)
- [49] M. K. Hasan, M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, V. T. Nguyen, and Y. M. Jang, “Performance analysis and improvement of optical camera communication,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 12, 2018. (Citado en la pág. 40.)
- [50] A. Kawade, W. Chujo, and K. Kobayashi, “Space division multiplexing by adaptive thresholding for uplink optical camera communication using smartphone screen,” *IEICE Communications Express*, vol. 10, no. 12, pp. 954–960, 2021. (Citado en la pág. 41.)
- [51] M. O. Ali, M. K. Hasan, Y. Wang, M. Shehata, J. Fu, S. Luong, and K. Wang, “U-net-based optical camera communication in intensity-constrained scena-

- rios,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 43, no. 10, pp. 4712–4721, 2025. (Citado en la pág. 41.)
- [52] X. Hu, P. Zhang, Y. Sun, X. Deng, Y. Yang, and L. Chen, “High-speed extraction of regions of interest in optical camera communication enabled by grid virtual division,” *Sensors*, vol. 22, no. 21, 2022. (Citado en la pág. 41.)
- [53] L. Bober, A. Ebmeyer, J. Andree, F. Dressler, and V. Jungnickel, “Optical wireless for industrial communication: Practical results using ieee std 802.15.13,” in *2024 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, (Berlin, Germany), 2024. Invited Paper. (Citado en la pág. 44.)
- [54] P. X. C. Burbano, *Optical Camera Communication for Internet of Things in Urban Environments*. PhD thesis, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España, 2021. (Citado en la pág. 44.)
- [55] P. Zhang, Z. Liu, X. Hu, Y. Sun, X. Deng, B. Zhu, and Y. Yang, “Constraints and recent solutions of optical camera communication for practical applications,” *Photonics*, vol. 10, no. 6, 2023. (Citado en la pág. 46.)
- [56] F. Halsall, *Computer networking and the Internet*. Addison-Wesley, 2005. (Citado en la pág. 46.)
- [57] InfluxData, “Influxdb v3.” <https://www.influxdata.com/>, 2026. Base de datos de series temporales (TSDB) de alto rendimiento, optimizada para el almacenamiento, consulta y análisis en tiempo real de grandes volúmenes de datos cronológicos, métricas y eventos. (Citado en la pág. 78.)
- [58] Spring, “Spring boot.” <https://spring.io/projects/spring-boot>, 2026. Framework de código abierto basado en Java diseñado para simplificar la creación y el despliegue de aplicaciones y microservicios independientes con una configuración mínima. (Citado en la pág. 78.)

Lista de acrónimos

ADC *Analog-to-Digital Converter* (Conversor analógico-digital) (Citado en la pág. 55, 59–61, 68, 100, 105.)

APD *Avalanche Photodiode* (Fotodiodo de avalancha) (Citado en la pág. 14, 16.)

API *Application Programming Interface* (Interfaz de programación de aplicaciones) (Citado en la pág. 7, 8, 11, 49, 80, 105, 111.)

BER *Bit Error Rate* (Tasa de error de bits) (Citado en la pág. 6, 8, 24, 41, 62, 87, 90–93, 98–102, 104, 110.)

CMOS *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (Semiconductor de óxido metálico complementario) (Citado en la pág. 4, 5, 8, 9, 11, 12, 17, 21, 27, 31, 32, 34, 35, 51, 63, 66–68, 92, 100, 110.)

CNN *Convolutional Neural Networks* (Redes neuronales convolucionales) (Citado en la pág. 30, 46.)

CRC *Cyclic Redundancy Check* (Código de verificación de redundancia cíclica) (Citado en la pág. 86.)

CSI-2 *Camera Serial Interface 2* (Citado en la pág. 65, 69.)

CSK *color shift keying* (Citado en la pág. 31.)

DNN *Deep Neural Network* (Red neuronal profunda) (Citado en la pág. 45.)

- DSP** *Digital Signal Processing* (Procesamiento de señales digitales) (Citado en la pág. 6, 9, 12, 62, 70, 72, 93, 94, 97, 98, 105, 107, 112.)
- DTO** *Data Transfer Object* (Objeto de transferencia de datos) (Citado en la pág. 80, 81.)
- EI** *Smart Environments* (Entornos inteligentes) (Citado en la pág. 1.)
- EMC** *Electromagnetic Compatibility* (Compatibilidad electromagnética) (Citado en la pág. 3.)
- EMI** *Electromagnetic Interferences* (Interferencias electromagnéticas) (Citado en la pág. 1, 3, 17.)
- FEC** *Forward Error Correction* (Corrección de errores hacia adelante) (Citado en la pág. 113.)
- FoV** *Field of View* (Campo de visión) (Citado en la pág. 18, 36.)
- FPS** *Frames Per Second* (Fotogramas por segundo) (Citado en la pág. 5, 21, 27, 31, 39, 67, 72, 73, 93, 94, 96, 97, 112, 113.)
- FSO** *Free Space Optical communication* (Comunicación óptica en el espacio libre) (Citado en la pág. 2.)
- GMM** *Gaussian Mixture Models* (modelos de mezclas gaussianas) (Citado en la pág. 65, 68, 74, 91, 93, 98, 101, 102, 105, 111.)
- GS** *Global Shutter* (Citado en la pág. 37–39, 51.)
- IIoT** *Industrial Internet of Things* (Internet de las cosas industrial) (Citado en la pág. 1.)
- IoT** *Internet of Things* (Internet de las cosas) (Citado en la pág. 1–8, 10, 12, 18–21, 23, 31, 32, 34, 37–42, 46–48, 50, 53, 62, 64, 81, 83, 86, 96, 104, 106, 110, 113.)

- IPC** *Inter-Process Communication* (Comunicación entre procesos) (Citado en la pág. 97, 105.)
- ISI** *Intersymbol Interference* (Interferencia intersimbólica) (Citado en la pág. 46.)
- ISP** Procesador de señal de imagen (Citado en la pág. 63, 65.)
- Li-Fi** *Light Fidelity* (Li-Fi) (Citado en la pág. 2.)
- LPI** *Low Probability of Intercept* (Baja probabilidad de interceptación) (Citado en la pág. 3.)
- MACs** *Multiply-Accumulate operations* (Operaciones de multiplicación y acumulación) (Citado en la pág. 46.)
- MIMO** *Multiple-Input Multiple-Output* (Entrada múltiple salida múltiple) (Citado en la pág. 15, 18, 30, 113.)
- MIPI** *Mobile Industry Processor Interface* (Citado en la pág. 65, 69.)
- ML** *Machine Learning* (Aprendizaje automático) (Citado en la pág. 46.)
- MVC** *Model-View-Controller* (Modelo-Vista-Controlador) (Citado en la pág. 80.)
- O-ISAC** *Optical Integrated Sensing and Communication* (Detección y comunicación ópticas integradas) (Citado en la pág. 32.)
- OCC** *Optical Camera Communication* (Comunicaciones ópticas por cámara) (Citado en la pág. , 2–7, 9–20, 22–25, 29–32, 34–38, 40, 42–44, 46–52, 55, 56, 58, 59, 61–68, 77–79, 83, 84, 87, 88, 91, 92, 94–96, 98, 101–105, 110–112.)
- OOK** *On-Off Keying* (Modulación por conmutación de encendido y apagado) (Citado en la pág. 7, 9, 11, 40, 43, 62, 93, 100, 107, 110.)
- OWC** *Optical Wireless Communications* (Comunicaciones inalámbricas ópticas) (Citado en la pág. 1, 2, 4, 34.)

- PAM** *Pulse Amplitude Modulation* (Modulación por amplitud de pulso) (Citado en la pág. 62.)
- PSF** *Point Spread Function* (Función de dispersión de punto) (Citado en la pág. 19.)
- PWM** *Pulse Width Modulation* (Modulación por ancho de pulsos) (Citado en la pág. 99, 100, 102.)
- RF** *Radiofrequency* (Radiofrecuencia) (Citado en la pág. 1, 3, 16, 17, 20, 33.)
- ROI** *Region of Interest* (Región de interés) (Citado en la pág. , 25, 26, 31, 41, 42, 68, 92, 111, 112.)
- RS** *Rolling Shutter* (Citado en la pág. 21, 22, 37–39, 51.)
- SFD** *Start Frame Delimiter* (Delimitador de inicio de trama) (Citado en la pág. 75, 84.)
- SNR** *Signal-to-Noise Ratio* (Relación señal-ruido) (Citado en la pág. 8, 9, 18–20, 23, 25, 62, 87, 90–93, 98–102, 104, 110.)
- STX** *Start of Text* (Inicio de texto) (Citado en la pág. 46.)
- TSDB** *Time Series Database* (Base de datos de series temporales) (Citado en la pág. 78.)
- VLC** *Visible Light Communication* (Comunicación por luz visible) (Citado en la pág. , 2, 4, 7, 12–15, 34, 40, 47–49, 58–60, 66, 67, 77, 82, 85.)

Glosario de términos

Aliasing Efecto que distorsiona una señal analógica al ser reconstruida a partir de muestras digitales, causado por una frecuencia de muestreo inferior al doble de la componente de frecuencia más alta de la señal (criterio de Nyquist). En sistemas OCC basados en cámaras de baja tasa de refresco, se manifiesta como una superposición de frecuencias que dificulta la correcta demodulación de los datos (Citado en la pág. 6.)

Blooming Efecto electrónico que ocurre en los sensores de imagen (como los detectores CMOS) cuando la luz captada supera la capacidad máxima de almacenamiento de carga de un píxel (full-well capacity), provocando que el exceso se desborde a los píxeles adyacentes. En OCC, se manifiesta como un ensanchamiento visual y borroso del emisor LED. (Citado en la pág. 20, 72.)

Eavesdropping Interceptación o escucha no autorizada de una comunicación privada. En el contexto de este trabajo se refiere a la captura pasiva de datos por parte de un tercero. Mientras que en RF es una vulnerabilidad crítica, en OCC se mitiga gracias al confinamiento espacial de la señal óptica (Citado en la pág. 3.)

Flicker Parpadeo rápido y repetitivo en la intensidad de una fuente de luz. En sistemas de comunicación óptica por luz visible (VLC), las frecuencias de conmutación del emisor deben ser suficientemente elevadas para que el ojo humano las perciba como una iluminación constante y evitar molestias

visuales, mientras que la cámara sí es capaz de detectar la modulación.
(Citado en la pág. 20, 32, 39, 45.)

