Sistema de comunicación por luz visible basado en FPGA para la transmisión de imágenes RGB-D

FPGA-Based Visible Light Communication System for RGB-D Image Transmission

Jose Luis Contreras-Hernández[1], Maria de la Luz Tetuán-Lara, Nazario de Jesús Mares-Narvaez, Dora Luz Almanza-Ojeda[1], Mario Alberto Ibarra-Manzano[1].

[1] Departamento de Ingeniería Electrónica, DICIS Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, 36885, Mexico.
jose.contreras @ugto.mx

Abstract

Hoy en día, la tecnología LED ofrece nuevas estrategias para comunicarse de manera fiable, económica y rápida. En este trabajo, utilizamos la comunicación por luz visible para transmitir imágenes de color y profundidad desde un emisor hasta un receptor en un entorno de interiores. Tanto el dispositivo emisor, como el receptor, fueron diseñados e implementados para enviar y recibir bits de datos a una distancia mínima de 15 centímetros. Cada bit de datos se codifica utilizando el algoritmo de Hamming como mecanismo de detección de errores y la técnica Manchester, para cumplir con los criterios de la comunicación por luz visible. En el receptor, se realiza una verificación de errores para validar los bits de datos mediante el corrector de Hamming. Ambas técnicas se diseñan e implementan en un dispositivo FPGA y elementos de bajo costo. Los datos de imagen constan de cuatro capas, tres de color y una de profundidad, lo que suma un total de 400 Kb. Se analizan diferentes orientaciones de las lámparas LED para determinar la configuración óptima de potencia de emisión. Los resultados numéricos muestran el rendimiento del sistema de comunicación propuesto basado en comunicación por luz visible, incluyendo un análisis de errores para los bits de datos con hasta el 100% de efectividad con alturas de 2m.

Palabras clave: Manchester code; image data; FPGA modules; visual light communication; VLC.

Introducción

La Comunicación por Luz Visible (VLC, Visible Light Communication) pretende llegar a ser una opción inalámbrica de bajo costo, con ahorro de recursos y energía, motivo por el cual, en los últimos años, ha incrementado el interés en el desarrollo de estos sistemas dedicados a la transferencia de información (Yu *et al.*, 2021). Las expectativas del uso de la VLC para el envío y recepción de información abarcan diversos escenarios, particularmente como complemento de las comunicaciones basadas en radiofrecuencia en ambientes donde estas presentan limitaciones (Loureiro *et al.,* 2023), así como aplicaciones relacionadas con el Internet de las cosas (IoT, *Internet of Things*) (Oyewobi *et al.,* 2022), la comunicación entre vehículos (Avătămăniței *et al.,* 2021), la seguridad de la información (Shen y Ng, 2022) y la recolección de energía (Chen *et al.,* 2021).

En la literatura se han desarrollado diversos sistemas basados en VLC orientados a la transmisión y recepción de diferentes tipos de información, entre los que se encuentran datos y audio. Un ejemplo es el trabajo presentado por (Hassan *et al.,* 2020), donde desarrollaron un sistema VLC basado en Li-Fi para la transmisión de datos. Por otro lado, (Eltokhy *et al.* 2023) presentaron un sistema de transmisión de audio mediante VLC utilizando arreglos de LED y modulación OOK (*On-Off Keying*), demostrando la viabilidad del uso de la luz visible como medio para la transmisión.

Se han desarrollado trabajos en los que utilizan cámaras ópticas como receptores (OCC, *Optical Camera Communication*), un ejemplo es el presentado por (Nguyen *et al.* 2024), donde desarrollaron un sistema híbrido para aplicaciones interiores que emplea dos formas de onda transmitidas mediante un único LED y utiliza cámaras con obturador rodante como receptores. Así mismo, (Dinc y Erol, 2024) analizaron experimentalmente un sistema OCC basado en una cámara de teléfono móvil como receptor. Estos trabajos muestran la evolución de los sistemas VLC/OCC hacia soluciones basadas en dispositivos comerciales y esquemas de modulación eficientes.

Entre los diferentes tipos de información que pueden transmitirse mediante VLC, la transmisión de imágenes representa un área de interés debido al volumen de información involucrado y a los requerimientos de velocidad, calidad y confiabilidad. (González *et al.* 2024) presentan la transmisión de imágenes utilizando las técnicas de modulación OOK, ASK y OFDM, considerando parámetros como la tasa de error de bit, la velocidad de transmisión y la latencia. Por otro lado, (Chen *et al.* 2024) propusieron un sistema VLC basado en comunicación semántica para la transmisión de imágenes mediante una red convolucional generativa antagónica profunda (DCGAN). Recientemente, (Jin *et al.* 2026) desarrollaron un sistema para la transmisión robusta y eficiente de imágenes en sistemas VLC submarinos con restricciones de potencia, utilizando búsqueda de arquitectura neuronal para mejorar la reconstrucción de las imágenes recibidas.

Debido a los requerimientos de velocidad de procesamiento asociados con la transmisión de grandes volúmenes de información, las plataformas FPGA (*Field Programmable Gate Array*) continúan siendo una alternativa para la implementación de sistemas VLC en tiempo real. (Ricci *et al.* 2023) desarrollaron un instrumento VLC basado en FPGA para aplicaciones de muy baja latencia. Por otro lado, (El Jbari *et al.* 2025) implementaron en FPGA un sistema de transmisión de datos en tiempo real basado en una técnica de modulación PAWM (*Pulse Amplitude Width Modulation*) y multiplexación NOMA.

El sistema propuesto integra la transmisión y recepción de imágenes RGB-D mediante VLC en un entorno de iluminación interior. Para ello, emplea una lámpara LED tipo *downlight* como transmisor y establece una distancia de comunicación de 2 metros, utilizando dispositivos económicos y recursos sencillos de procesamiento de señales. La incorporación de información de profundidad, además de los componentes de color RGB, permite transmitir información espacial que no está disponible en sistemas convencionales de transmisión de imágenes monocromáticas o RGB. Asimismo, el empleo de modulación OOK a una frecuencia de operación adecuada permite realizar la transmisión sin generar fluctuaciones perceptibles en la iluminación, manteniendo simultáneamente la función de iluminación del dispositivo. Para incrementar la confiabilidad de la comunicación, se emplean codificación Manchester y codificación Hamming, esta última con capacidad para corregir un bit erróneo por cada byte transmitido. Finalmente, las etapas de procesamiento y comunicación son implementadas en un FPGA, proporcionando una arquitectura reconfigurable y con capacidad de procesamiento paralelo.

Este sistema de comunicación incrementa la cantidad de datos enviados por VLC (imagen RGB y de profundidad) mediante un sistema de módulos económico. En la sección II se presenta el sistema de comunicación en general. En la sección III se describe la estructura del procesamiento en FPGA del sistema. En la sección IV se presentan los resultados al probar el sistema y finalmente, en la sección V las conclusiones.

Diagrama General del Sistema

El sistema de comunicación propuesto en este trabajo consiste en un transmisor y un receptor, que utilizan una lámpara LED como canal de comunicación como se observa en la Figura 1. Las etapas de codificación y potencia conforman el Transmisor VLC. El funcionamiento de este bloque consiste en procesar las tramas de datos para que sean conmutadas a altas frecuencias en la lámpara.

El Receptor VLC consta de tres etapas: 1) un fototransistor, encargado de recibir la información en pulsos de luz de la lámpara LED; 2) una etapa de acondicionamiento de la señal recibida por el sensor para acoplar la señal que será posteriormente codificada; 3) la decodificación y corrección de algún posible error.

Metodología Propuesta

El sistema se implementa en una tarjeta FPGA Altera DE2-115 Development and Education Board, mediante la descripción a bloques. La flexibilidad y rapidez que proporciona el FPGA es de gran relevancia al elegir la forma de procesamiento. Enseguida se presentan las secciones de los bloques desarrollados.

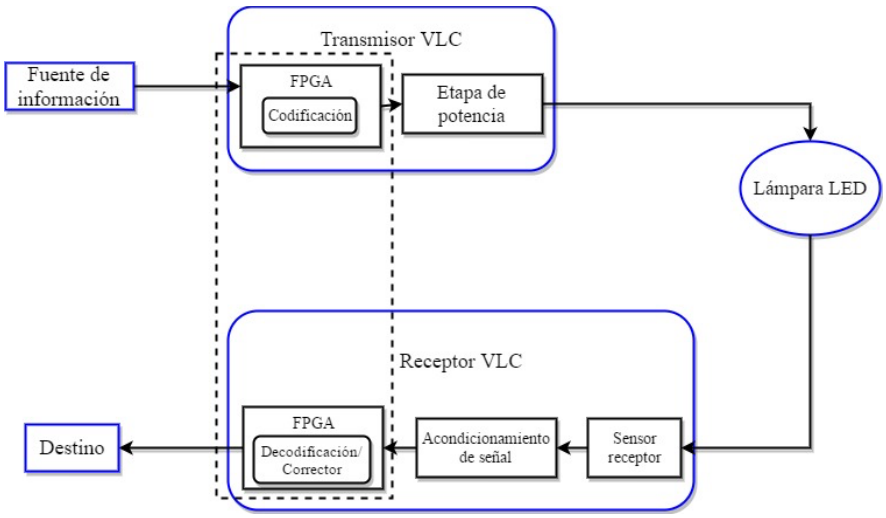


Figura 1. Diagrama general del sistema VLC.
Fuente: Autoría propia

Sistema General en FPGA

El diagrama general del sistema de comunicación propuesto se muestra en la Figura 2. El sistema consta de cuatro bloques importantes: bloque RS232, bloque Protocolo Tx, bloque Protocolo Rx y bloque FSM.

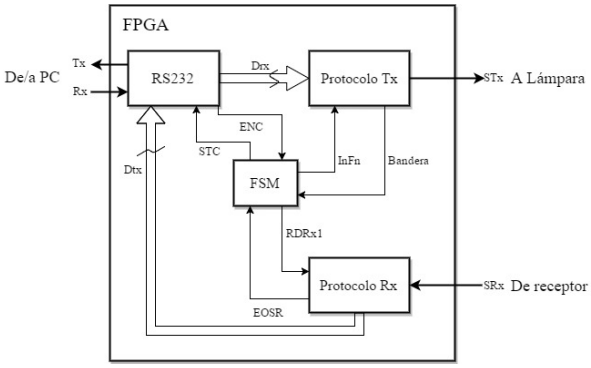


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema de comunicación desarrollado en el FPGA.
Fuente: Autoría propia.

El RS232 es un bloque que desarrolla el protocolo serial para enviar y recibir información de la imagen con la PC. El bloque Protocolo Tx es el encargado de la codificación del byte proveniente de la PC para ser enviado a la lámpara. El bloque Protocolo Rx es el encargado de detectar el inicio de la trama recibida mediante un receptor y la cual es utilizada para realizar su decodificación y corrección de error en caso de que se presente. Estos protocolos serán presentados posteriormente.

Después de obtener el byte que compone la imagen mediante el receptor, éste es enviado por el bloque RS232 hacia la PC para su reconstrucción y comparación de resultados. El bloque de Máquina de Estrado Finito (FSM, Finite State Machine) es el encargado de sincronizar el resto de los bloques para una correcta comunicación.

Protocolo de Comunicación RS232 en FPGA

El bloque RS232 entra en operación cada vez que los datos deben ser obtenidos de la fuente de información (Rx) para enviarlos al bloque Protocolo Tx. El diagrama en la Figura 3 muestra las conexiones de los módulos

que componen el bloque RS232. En este bloque, la máquina de estados FSM_com es la encargada de realizar la sincronía entre los módulos, mediante las señales de bandera STT, EOT, EOR, RDD y ACTR.

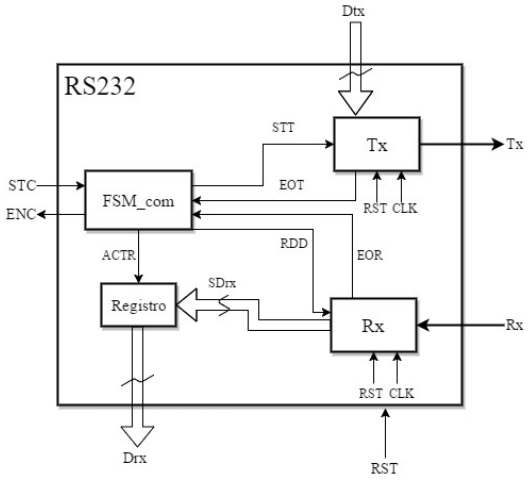


Figura 3. Diagrama de bloques del protocolo RS232
Fuente: Autoría propia.

El módulo Tx se encarga de conformar el protocolo RS-232 del valor a transmitir Dtx en la señal Tx. De forma similar, el módulo Rx conforma el protocolo de la señal Rx en la señal SDrx. Finalmente, el módulo Registro es el encargado de guardar el byte recibido (SDrx) desde el bloque Rx para lograr la sincronización con bloques externos (Romero Troncoso, 2016). La velocidad utilizada en el protocolo es de 9600 bauds.

Proceso de codificación

El sistema de comunicación presentado en la Figura 2 utiliza la codificación Manchester en el módulo Protocolo Tx, y el código Hamming en el Protocolo Rx para realizar el cifrado del byte al enviar o recibir. La codificación Manchester es una técnica utilizada para cifrar los pulsos de reloj y los datos de un flujo de bits síncrono (Forouzan, 2007). Esta codificación utiliza valores de 1 y 0 como la transición de bajo a alto en mitad del intervalo y transición de alto a bajo en mitad del intervalo, respectivamente. Debido a las propiedades que presenta, esta codificación es utilizada en el sistema tanto para la sincronía de datos, como para evitar que el parpadeo de la lámpara LED sea percibido por los usuarios.

Por otra parte, el código Hamming se estructura agregando bits al mensaje antes de transmitirlo, la cantidad de bits añadidos depende del tamaño del dato a enviar. La cantidad de bits de paridad que se deben agregar se calcula con la expresión (1),

$$2^n \geq m + n + 1 \quad (1)$$

donde n es la cantidad de bits Hamming y m es la cantidad de bits de datos. La Tabla I muestra el cálculo de los bits de paridad que se introducen en una trama de datos de acuerdo con el código de Hamming, en donde, d_n indica los bits de datos y p_n los bits de paridad. Además, estos bits de paridad se colocan en las posiciones 2^n y los bits de datos son colocados en las posiciones libres de la trama, en forma ascendente. La primera fila en la Tabla 1 muestra el orden de los bits de paridad (4 bits) y de datos (7 bits) dando una trama total de 11 bits. La paridad se calcula mediante la XOR de los datos seleccionados para cada paridad, un dato es seleccionado para el cálculo de la paridad si la AND entre el bit de posición de la paridad y el bit de la posición del dato es un 1 lógico.

***Tabla 1**. Cálculo de Bits de Paridad con Hamming.*

	p1	p2	d1	p3	d2	d3	d4	P4	d5	d6	d7

D(s/p)				0		1	1	0		1	0	1
p_1	1			0		1		0		1		1
p_2		0		0			1	0			0	1
p_3					0	1	1	0				
p_4									0	1	0	1
D(c/p)	1	0	0	0	1	1		0	1	0	1	

Los bits generados en la codificación son conmutados y posteriormente enviados a la lámpara LED. El diagrama de los módulos que componen el bloque Protocolo Tx es mostrado en la Figura 4. Se encuentra compuesto por un multiplexor, el módulo Divisor Tx, el módulo para el cálculo de bits de paridad y el módulo FSM Tx.

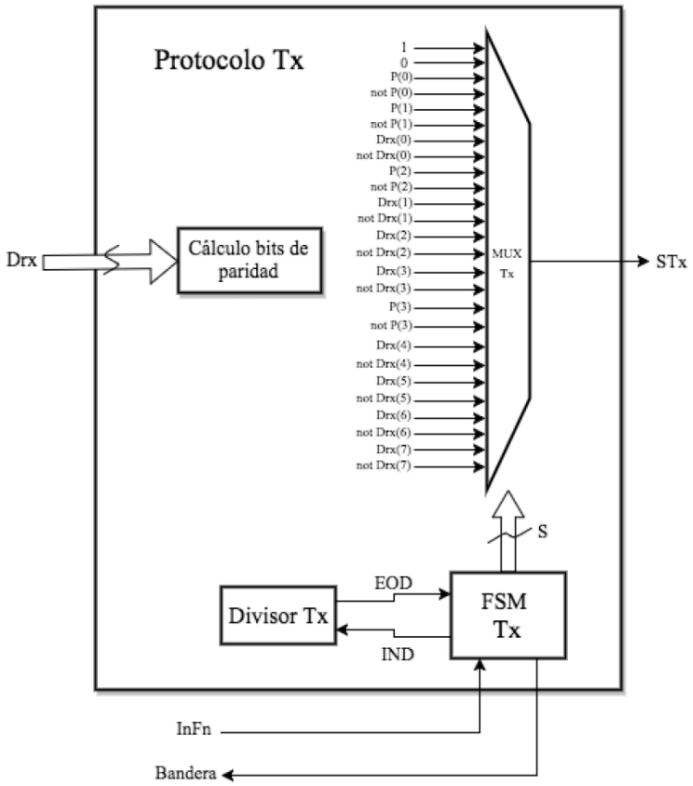


Figura 4. Diagrama de bloques de la codificación.
Fuente: Autoría propia.

El funcionamiento, a grandes rasgos, se basa en insertar los bits de paridad necesarios para el cálculo del error, al byte que se desea transmitir (Drx). Además del complemento de cada uno de los bits, tanto de datos, como de paridad, con el fin de evitar que existan envíos en los que quede completamente apagada la lámpara. Finalmente, cada bit forma parte de la entrada a un multiplexor que se encarga de transmitir bit a bit la trama codificada (STx). Los módulos Divisor Tx y FSM Tx sincronizan la codificación realizada en este bloque, mediante las señales EOD, IND y s. Las señales InFn, Bandera sincronizan este bloque con bloques externos del sistema.

Etapa de Potencia del Sistema

La conmutación de los datos codificados se encuentra a cargo de la etapa de potencia, como se observa en la Figura 5. La lámpara LED utilizada en este trabajo se alimenta a 24 V, para lo cual, es utilizado un MOSFET de potencia de canal N, con el fin de controlar el encendido/apagado de la lámpara durante la transmisión de datos. Las características y respuesta a altas frecuencias del MOSFET, lo hacen ideal para la transmisión de la información

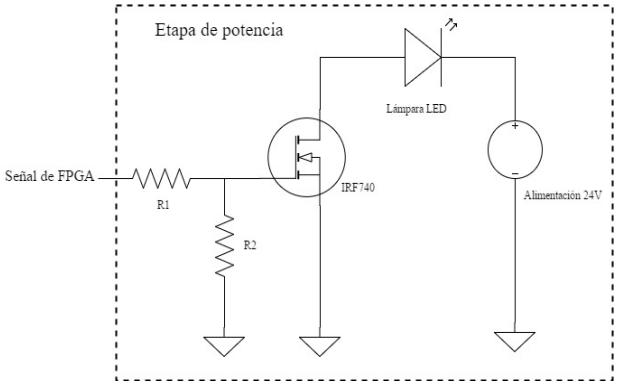


Figura 5. Etapa de potencia.
Fuente: Autoría propia.

La lámpara es de tipo downlight siendo esto un factor importante en el sistema de comunicación, debido a la distancia que se pretende manejar para la transferencia. Este tipo de lámparas son usadas para la iluminación desde el techo, con distribución que asemeja la luz natural y potencia máxima de 10 W. Así mismo, la cantidad de ciclos en encendido continuo o apagado no perjudica su vida útil y no causa interferencia electromagnética con otros dispositivos. Dichas características influyeron en la elección de la lámpara LED, proporcionando seguridad y un costo bajo, lo que permiten pensar en este tipo de sistemas de comunicación.

Receptor del Sistema

El receptor VLC de la Figura 6 se compone de dos etapas: 1) recepción y 2) acondicionamiento de señal. La etapa de recepción, como su nombre lo indica, se encarga de recibir la información proveniente de la lámpara LED (SRx). El fototransistor, como sensor receptor, tiene una gran sensibilidad sobre otros fotorreceptores por el efecto de ganancia del propio transistor. Debido a la distancia que se maneja entre el canal de comunicación y el receptor, es necesario hacer un acondicionamiento de la señal recibida. De igual manera, se aprecia una etapa de filtrado de la señal, dicha etapa es de gran importancia para la supresión de ruido en caso de que éste perturbe la señal en algún punto de la comunicación. Posteriormente, se amplifica la señal recibida por el fototransistor (en el orden de los 300 mV), para finalmente digitalizar la señal mediante un comparador.

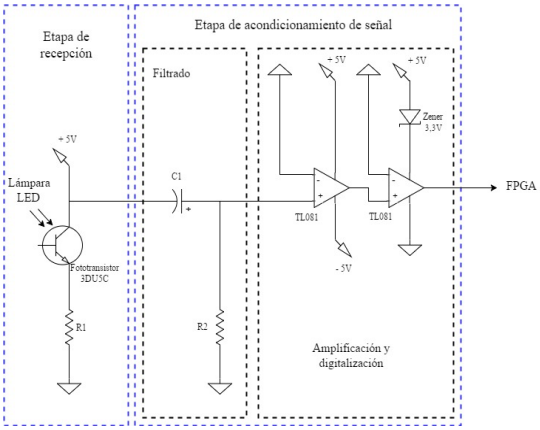


Figura 6. Circuito de Recepción.

Fuente: Autoría propia.

Decodificación en FPGA

La señal acondicionada SRx ingresa al FPGA para realizar la debida decodificación en la señal Dtx. En la Figura 7 se presenta el diagrama del bloque Protocolo Rx. Su objetivo primordial es que la cadena de datos SRx sea interpretada de forma que no existan perdidas o modificación de datos en el receptor. El funcionamiento básico de este bloque es recibir uno a uno los bits de información, descartando los complementos añadidos que no son de interés para la decodificación, mediante el módulo Registro desplazamiento. Una vez recibida la trama, Dsrx se guarda en el módulo Registro como Dtx1 y en caso de ser necesario se corrige un bit por cada trama que es recibida, obteniendo la trama Dtx. Los módulos Divisor Rx y FSM Rx son utilizados como elementos de control en el bloque. Las señales RH, HD EODiv son señales internas de sincronía. Las señales RDRx1 y EOSR son señales para sincronización con bloques externos del sistema.

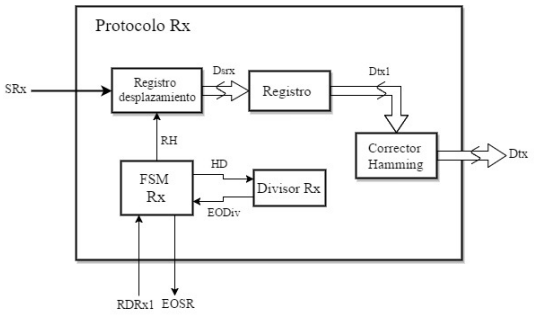


Figura 7. Diagrama de bloques de la decodificación.
Fuente: Autoría propia.

El código Hamming es utilizado en el bloque Protocolo Rx como un código detector y corrector de errores. Este algoritmo llega a corregir hasta un error de un bit en una cadena de datos. Con el fin de comprobar si existe un error, se analiza el byte recibido. La verificación de la trama lleva a cabo la operación XOR entre los bits de datos que se utilizaron para calcular cada una de las paridades, si el resultado de la operación es un 0 lógico, significa que dicha trama llegó sin error. La Tabla 2 muestra este proceso de verificación.

***Tabla 2**. Cálculo de Bits de Paridad con Hamming.*

	p1	p2	d1	p3	d2	d3	d4	p4	d5	d6	d7	Paridad	
												Prueba	Bit
Rec	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	**1**	
p_1	1		0		1		0		1		1	Ok	0
p_2		0	0			1	0			0	1	Ok	0
p_3				0	1	1	0					Ok	0
p_4								0	1	0	1	Ok	0

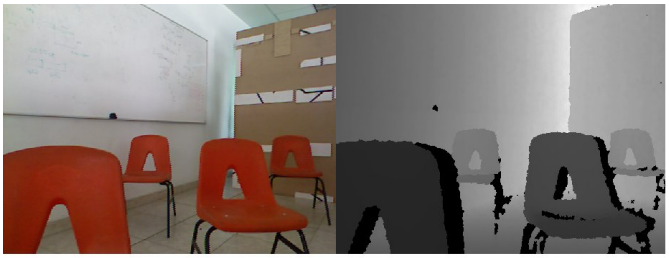
Pruebas y Resultados

Una imagen digital está compuesta de un número finito de elementos llamados píxeles (Elsonbaty, et. al., 2023), cada uno de los cuales tiene una posición y un valor de intensidad. Esta intensidad puede tener uno o más canales, según el modelo de color usado. En general, si tiene un solo canal, éste representa la intensidad

de un valor de gris, en el caso de tener más canales, representan colores, transparencia, saturación, etc. El modelo de color RGB es uno de los más utilizados y posee tres canales, uno para el color rojo, uno para el verde y otro para el azul.

Una imagen RGB-D es la combinación de dos imágenes 2D, una en espacio de color (RGB) y otra en profundidad con una sola capa en escala de gris (Fu *et al.,* 2023). Esta combinación de imágenes representa el conjunto tri-dimensional, en el que el ojo humano percibe las cosas y al mismo tiempo ofrece una mayor cantidad de información que las imágenes por separado.

El sistema propuesto fue probado bajo ciertas características ambientales con diferentes imágenes, en particular, se transmiten imágenes RGB-D, aunque también se utilizaron imágenes solo en color (RGB) o en escala de grises. Se realizó una comparativa de las variaciones con las cuales se probó el sistema, entre ellas sin el corrector de errores. Una de las imágenes RGB-D utilizadas en las pruebas del sistema se muestran en la Figura 8. Las dimensiones de la imagen son 240×320 pixels para las 4 capas, tres de color y una de profundidad, lo que suma un total de 400 kB en formato .mat.



a) b)

Figura 8. Imagen utilizada para las pruebas. a) Imagen RGB, b) Imagen de Profundidad. Fuente: Autoría propia.

Resultados Experimentales

Las pruebas de envío y recepción de imágenes para comprobar el funcionamiento del sistema se realizaron en dos tipos de ambiente. Uno de los escenarios de prueba fue un ambiente de interior totalmente iluminado de manera natural, es decir, por la luz del sol. El otro escenario fue un ambiente de interior en ausencia de luz natural, este tipo de pruebas se realizaron al final del atardecer e inicio de la noche.

Además de variar la iluminación de los ambientes, el sistema fue probado sin el bloque de corrección de error para visualizar la dependencia del sistema. Para todas las variantes fue usada la misma imagen RGB-D, con el fin de encontrar el porcentaje de error con el cual se recibe la imagen de prueba bajo los criterios mencionados. Finalmente, se obtuvo la diferencia entre las imágenes transmitidas y recibidas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, a medida que la distancia a la que se transmite la información aumenta, la luz es dispersada de una manera no uniforme. En la Figura 9, cada uno de los puntos con mayor intensidad de iluminación generó un mejor resultado.

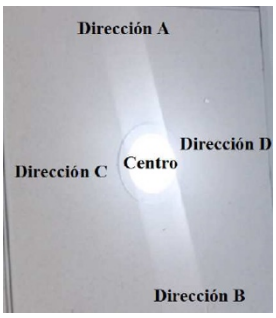


Figura 9. Región de iluminación de la lámpara LED. Fuente: Autoría propia.

Cabe mencionar que los porcentajes de error obtenidos en las pruebas representan el número de tramas que se registraron con error con respecto al total de tramas enviadas. Estos porcentajes son mostrados en la Tabla 3. Un detalle importante que se puede visualizar es, la comparativa de porcentajes de error entre las pruebas con corrector de errores Hamming y sin corrector. El uso del corrector de errores presenta una mejora en los porcentajes de error de las imágenes, para todas las direcciones de prueba. Analizando los bajos porcentajes de error obtenidos (menor al 1% de error) se infiere que existe una buena recepción en los datos a las distancias establecidas.

Entre las pruebas realizadas, es preciso destacar algunas de las imágenes donde se muestra un porcentaje de error y la mejora que existe utilizando el corrector de error. La Figura 10 muestra dos pruebas realizadas, con corrector de error (Figura 10a) y sin corrector de error (Figura 10b). Note que, aún en el peor caso, sin corrector de error, esta imagen puede ser utilizada en procesamiento de imágenes. Cabe señalar que, aunque su calidad se ve afectada en la imagen de color como en la imagen de profundidad, el contenido de la imagen aún es visible, lo que la imagen puede ser manipulada en el sistema receptor.

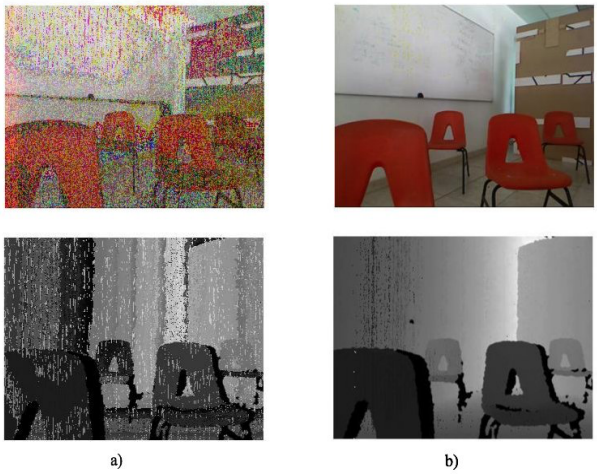


Figura 10. Prueba obtenida a una distancia de 30 cm en dirección B de la región de iluminación con opacidad. a) Columna izquierda: imágenes color-profundidad con 0.632% de error sin usar corrector. b) Columna derecha: imágenes color-profundidad con 0.087% de error usando corrector de error.
Fuente: Autoría propia.

Tabla 3. Resultados de porcentaje de error, con y sin Hamming.

Distancia	Ambiente	% error sin Hammning	% error con Hamming
Centro	Total iluminación	0.00000%	0.00000%
A 7.5 cm radiales del centro	Total iluminación	0.00000%	0.00000%
A 15 cm radiales del centro	Total iluminación	0.00000%	0.00000%
30 cm dirección B	Total iluminación	0.00570%	0.00005%
23 cm dirección A	Total iluminación	0.77940%	0.63200%
Centro	Opacidad	0.00325%	0.00130%
A 7.5 cm radiales del centro	Opacidad	0.00651%	0.00206%

A 15 cm radiales del centro	Opacidad	0.08700%	0.00810%
30 cm dirección B	Opacidad	0.85100%	0.10500%
23 cm dirección A	Opacidad	1.00000%	0.81590%

Tiempos de Procesamiento

El sistema de comunicación por luz visible para transferencia de imágenes en RGB-D se desarrolló con la finalidad de transmitir información utilizando infraestructura ya existente. A diferencia de algunas de las tecnologías actuales, el sistema presentado es una mezcla entre la sencillez de la programación y el bajo costo de los elementos utilizados. La Tabla 4 muestra los tiempos de cálculo y procesamiento que se requieren para el envío/recepción de información del sistema de comunicación.

Tabla 4. Tiempos de cálculo y procesamiento.

	Sin corrector Hamming	**Con corrector Hamming**
FPGA: procesamiento por trama	3.98 μs	4.3000 μs
Transmisor/Receptor: (envío/recepción por trama)	894.00 μs	1.2620 ms
Comunicación total por trama	931.98 μs	1.3043 ms
Transmisión de una imagen completa	286.30 s	400.6800 s

Implementación del Sistema

El sistema propuesto fue implementado en circuito impreso con el fin de probar la metodología propuesta como un prototipo final. La Figura 11 muestra los circuitos impresos del transmisor y del receptor que se mostraron en la Figura 5 y la Figura 6.

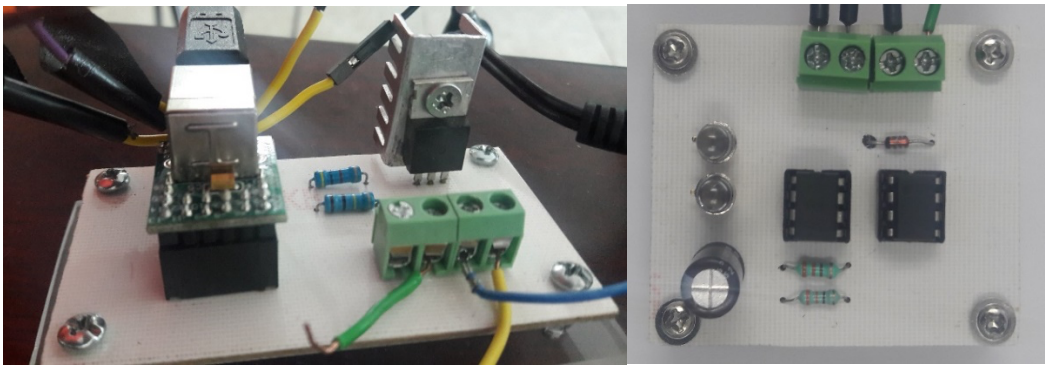


Figura 11. a) Vista del transmisor. b) Vista del receptor
Fuente: Autoría propia.

Estos módulos son conectados a la tarjeta FPGA para integrar el sistema propuesto como se ve en la Figura 12. Note que, la altura alcanzada para la comunicación VLC es de 2 m, sin embargo, llega a extenderse hasta 4 m, gracias a la potencia configurada para este sistema.



Figura 13. Sistema de comunicación completo.
Fuente: Autoría propia.

Comparación

El sistema propuesto es comparado con otros trabajos en la Tabla 5, en la cual se observa que nuestro trabajo tiene un rango de distancia mayor, ya que puede detectar desde los 15 cm hasta los 4 metros con imágenes en RGB-D,

La Tabla 5 muestra que, aunque los otros trabajos presentan velocidades de transmisión altas, el sistema propuesto tiene ventaja en cuanto al tipo de información que transmite, utilizando imágenes RGB-D, así como en su rango de comunicación de 15 cm a 4 m. Por otro lado, la implementación en FPGA, la codificación Manchester y la corrección de errores Hamming permite el desarrollo de una arquitectura sencilla, reconfigurable y de bajo costo, presentando porcentajes de error inferiores al 1 %. La velocidad de transmisión es un área de oportunidad para trabajos futuros.

Tabla 5. Comparación de trabajos.

Trabajo	Imagen	Transferencia	Distancia	Procesamiento
Chen et al. (2024)	Digital estándar	2.5 Mbps – 10 Mbps	1.5 – 3 m	Comunicación semántica, Redes Generativas Antagónicas Profundas (DCGAN)
González et al. (2024)	Digitales estándar y escala de grises	100 kbps – 5Mbps	1 – 2 m	Modulación (OOK, ASK, OFDM)

Jin et al. (2026)	Digitales estándar	500 kbps – 2Mbps	1 – 3 m	Arquitectura Neuronal, Aprendizaje profundo
Fu et al. (2020)	RGB-D		0.5 – 3m	Visión por computadora
Nuestro	RGB-D	8.91 – 6.32 kbps	15 cm – 4 m	FPGA, codificación Manchester, Corrección Hamming

Conclusiones y Trabajo Futuro

El sistema de comunicación de imágenes utilizando el protocolo VLC propuesto, realiza la transferencia de datos con porcentajes muy bajos de error en la recepción en ambientes interiores con variaciones en la intensidad de luz en el entorno. La técnica de corrección de errores permite disminuir aún más este porcentaje de error por lo que se demuestra la funcionalidad y confiabilidad en el sistema. Al implementarse en FPGA, permite una arquitectura sencilla, reconfigurable y de bajo costo. Además, la implementación en circuito impreso de este módulo de comunicación por luz visible se convierte en una opción portátil y factible de utilizar para aplicaciones de interior en oficinas o laboratorios con un costo bajo en los componentes con rangos de comunicación que van de los 15cm a los 4m. La velocidad de transferencia de este sistema es un área de oportunidad, por lo que, como trabajo futuro, se plantea incrementar la velocidad de transmisión mediante una interfaz de mayor velocidad, así como optimizar las etapas de transmisión y recepción.

Referencias

Avătămăniței, S. A., Gâlgău, R. C., y Gălucă, R. (2021). Visible light communication in intelligent transportation systems: A review. *IEEE Access,* 9, 12345–12360.

Chen, H., Zhang, L., y Wu, K. (2021). Energy harvesting in visible light communication systems: State-of-the-art and challenges. *IEEE Communications Surveys y Tutorials,* 23(3), 1540–1565.

Chen, X., Wang, Y., Zhang, Z., y Li, J. (2024). Semantic communication-based visible light communication system for image transmission using deep generative adversarial networks. *IEEE Transactions on Communications,* 72(4), 2145–2158.

Dinc, E., y Erol, B. (2024). Experimental analysis of optical camera communication systems using off-the-shelf mobile phone cameras. *Optical Engineering,* 63(2), Artículo 026105.

El Jbari, M., Amrani, M., y El Moussaoui, A. (2025). Real-time FPGA implementation of a visible light communication system using PAWM modulation and NOMA multiplexing. *AEU - International Journal of Electronics and Communications,* 185, 155410.

Elsonbaty, A., Elsadany, A. A., y Adel, W. (2023). On reservoir computing approach for digital image encryption and forecasting of hyperchaotic finance model. *Fractal and Fractional,* 7(4), Article 282. https://doi.org/10.3390/fractalfract7040282

Eltokhy, A., Al-Kinani, A., y Khalighi, M. A. (2023). Audio transmission over visible light communication using LED arrays and OOK modulation. *Journal of Lightwave Technology,* 41(10), 3020–3029.

Forouzan, B. A. (2007). Transmisión de datos y redes de comunicaciones (4.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.

Fu, L., Gao, F., Wu, J., Li, R., Karkee, M., y Zhang, Q. (2020). Application of consumer RGB-D cameras for fruit detection and localization in field: A critical review. *Computers and Electronics in Agriculture,* 177, Article 105687. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105687

González, R., Morales, F., y Pérez, S. (2024). Experimental evaluation of indoor visible light communication systems for image transmission using OOK, ASK, and OFDM techniques. *Optik,* 298, 171542.

Hassan, M., Rahman, S., y Hossain, E. (2020). Li-Fi based visible light communication systems for high-speed data transmission: Design and implementation. *IEEE Access,* 8, 145230–145242.

Jin, H., Liu, Z., y Wang, K. (2026). Neural architecture search-based robust image transmission for power-constrained underwater visible light communication systems. *IEEE Photonics Journal,* 18(1), 7901210.

Loureiro, A., Vieira, M., y Sousa, P. (2023). Hybrid radio frequency and visible light communication systems for indoor environments: A comprehensive survey. *Computer Networks,* 220, 109450.

Nguyen, T. H., Pham, N. T., y Yoo, M. (2024). A hybrid indoor optical camera communication system using a single LED and rolling shutter cameras. *IEEE Transactions on Consumer Electronics,* 70(2), 3420–3429.

Oyewobi, S. S., Djouani, K. P., y Hamam, Y. (2022). Visible light communication for Internet of Things (IoT): Applications, challenges, and future perspectives. *Sensors,* 22(12), Article 4500.

Ricci, A., Paoloni, C., y Di Zenobio, M. (2023). FPGA-based visible light communication instrument for ultra-low latency applications. *Journal of Optical Communications and Networking,* 15(8), 512–521.

Romero Troncoso, R. d. J. (2016). Electrónica digital y lógica programable (2.ª ed.). Universidad de Guanajuato.

Shen, M., y Ng, D. W. K. (2022). Physical layer security in visible light communication systems: Opportunities and challenges. *IEEE Wireless Communications,* 29(2), 88–95.

Yu, X., Zhang, H., y Leung, V. C. M. (2021). Visible light communication: From fundamentals to recent developments. *IEEE Internet of Things Journal,* 8(15), 12000–12020.