

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño e implementación de un transmisor OCC independiente de la distancia y libre de fluctuaciones lumínicas.

ING-2498

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telecomunicaciones

Presentado por:

José Andrés Castillo Martínez

Genesis Janeth Alvarado Tagle

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico esta tesis a quienes han sido mi faro en los momentos de oscuridad y mi fuerza en los días de flaqueza.

Primero Dios, que me dio la fuerza para seguir adelante, no perecer durante todo el proceso y que, en cada oración y acción, te brindé las riendas de mi vida para que la guíes a tu voluntad y ritmo.

A mi madre, por su amor incondicional y comprensión inigualable, por creer en mí cuando yo no podía hacerlo, por ser mi pilar principal y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mi novia, cuyo apoyo han sido mi refugio durante mi vida universitaria. Gracias por estar a mi lado en cada paso, por creer en mí incluso en los momentos en que dudaba de mí mismo.

Y a mí mismo, por no rendirme, por enfrentar mis miedos, salir de mi zona de confort y por seguir adelante a pesar de las dificultades.

José Andrés Castillo Martínez

El presente proyecto lo dedico a Dios por darme fortaleza y esperanza cada día. También a mi familia, quienes, con su amor incondicional, me han acompañado a lo largo de este camino.

A mis padres, Fausto y Esmeralda, que siempre creyeron en mí y me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi hermana Lady, por siempre ayudarme cuando la necesitaba.

Finalmente, quiero dedicar esta tesis a mi novio Eddo, a quien conocí durante mi trayectoria académica, por su comprensión, ánimo y compañía en los momentos de incertidumbre.

Genesis Janeth Alvarado Tagle

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a cada una de las personas que confiaron en mí y me brindaron enseñanzas durante esta etapa y mi vida en general.

Agradezco a mi compañera por su comprensión y aporte a este proyecto integrador con su ingenio y perseverancia dentro del mismo y ser ese soporte durante mi vida universitaria.

Agradezco de antemano a la tutora del proyecto por brindarnos la comprensión y confianza en realizar este proyecto integrador, con su guía y paciencia nos ayudó a convertir las ideas en este trabajo, su dedicación y sabiduría ha sido clave para este paso importante.

Agradezco a mi familia y amigos que han dado un grano de arena dentro de todo el proceso con el fin de que cada obstáculo presentado, no decaiga y siga adelante.

José Andrés Castillo Martínez

Mi más sincero agradecimiento a José, mi gran amigo a lo largo de la carrera, quien con su valiosa orientación, paciencia y dedicación ha sido fundamental en la realización de este trabajo.

Agradezco de manera especial a la Ing. Patricia por compartir su conocimiento y experiencias durante el desarrollo de este proyecto.

También deseo agradecer a mis amigos y compañeros de estudio, Javiera, Daniel y María quienes me brindaron su aliento y compañía en los momentos más difíciles. Por supuesto, a mi amiga desde el colegio, Romery, con quien espero seguir apoyándonos mutuamente a lo largo de los años.

Genesis Janeth Alvarado Tagle

Declaración Expresa

Nosotros José Andrés Castillo Martínez y Genesis Janeth Alvarado Tagle acordamos y reconocemos que:

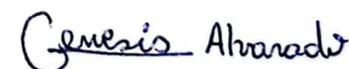
La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 22 de Mayo del 2024.


José Andrés Castillo Martínez


Genesis Janeth Alvarado Tagle


22 Mayo/24

Evaluadores



Firmado electrónicamente por:
**PATRICIA XIMENA
CHAVEZ BURBANO**

MSc. Verónica Alexandra Soto Vera

Profesor de Materia

**Ph.D. Patricia Ximena Chávez
Burbano**

Tutor de proyecto

Resumen

Este proyecto se enfoca en el diseño e implementación de un transmisor óptico para la comunicación óptica por cámara (OCC), con el objetivo de mejorar la fiabilidad en la transmisión de datos en sistemas IoT en futuras ciudades inteligentes.

Se implementó un transmisor basado en la modulación de intensidad, donde diferentes símbolos binarios son representados por cambios en la frecuencia de parpadeo. El receptor, basado en técnicas de procesamiento de video, cálculos estadísticos entre fotogramas consecutivos para identificar los símbolos transmitidos.

El sistema fue evaluado en diferentes condiciones, variando la distancia entre el transmisor y el receptor. Los resultados mostraron que la correlación de Pearson es efectiva para la validación de la transmisión, con una baja tasa de error por símbolo (SER) en distancias cortas y medias debido a factores físicos de los componentes y calibración de estos. A mayores distancias, el SER incrementa, indicando la necesidad de ajustes en la potencia de la señal o mejoras en el algoritmo de procesamiento., siendo los símbolos "00" y "11" los más susceptibles a errores.

Este trabajo contribuye al campo de las comunicaciones ópticas, ofreciendo un enfoque que combina simplicidad en el hardware con sofisticación en el procesamiento de señales, permitiendo una transmisión eficiente y fiable de datos en esquemas OCC.

Palabras clave: óptica, comunicación, símbolos, fiabilidad.

Abstract

This project focuses on the design and implementation of an optical transmitter for Optical Camera Communication (OCC), aiming to improve data transmission reliability in IoT systems for future smart cities. An intensity modulation-based transmitter was implemented, where different binary symbols are represented by changes in flicker frequency. The receiver, using video processing techniques, calculates statistical correlations between consecutive fotogramas to identify the transmitted symbols.

The system was evaluated under various conditions, with the distance between the transmitter and receiver being varied. Results showed that Pearson correlation is effective for transmission validation, with a low Symbol Error Rate (SER) at short and medium distances. However, at longer distances, the SER increases, indicating the need for signal power adjustments or improvements in the processing algorithm, with the "00" and "11" symbols being the most susceptible to errors. This work contributes to the field of optical communications by offering an approach that combines hardware simplicity with sophisticated signal processing, enabling efficient and reliable data transmission in OCC systems.

Keywords: optical, communication, symbols, reliability.

Tabla de contenido

Resumen	I
Abstract	II
Abreviaturas	V
Simbología	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VII
Índice de Anexos de figuras	VIII
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	2
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Justificación del problema	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	6
1.4 Marco teórico.....	6
1.4.1 <i>Definición y principios básicos de OCC</i>	6
1.4.2 <i>Ventajas y desventajas de los sistemas OCC</i>	7
1.4.3 <i>Retos en el diseño de transmisores OCC independientes de la distancia y libres de interferencia lumínicas</i>	8
1.4.4 <i>Estrategias de mitigación de los efectos de la interferencia en los sistemas OCC</i>	10
1.4.5 <i>Técnicas de modulación para transmisores OCC</i>	11
Capítulo 2	13
2. Metodología.....	14
2.1 Diseño del sistema de comunicación óptica.....	14

2.2	Descripción del sistema.....	14
2.2.1	<i>Análisis de sistemas de codificación y parámetros emitidos por el usuario.....</i>	15
2.2.2	<i>Comparaciones de esquemas de modulación adaptadas a sistemas OCC.....</i>	16
2.2.3	<i>Implementación de los elementos del transmisor OCC en relación con los requerimientos.....</i>	18
2.2.4	<i>Validación de pruebas y verificación del transmisor OCC.....</i>	19
Capítulo 3		21
3. Resultados y análisis		21
3.1 Estructura del sistema OCC		22
3.1.1 Selección de componentes electrónicos y herramientas		22
3.1.2 Análisis de costo del proyecto.....		24
3.2 Esquemático del transmisor OCC		26
3.3 Funcionamiento del transmisor OCC		29
3.3.1 Entrada de datos.....		30
3.3.2 Procesamiento de datos ingresados		31
3.3.3 Proceso de modulación aplicando persiana enrollable.....		31
3.4 Proceso de recepción con RPI cámara		35
3.5 Proceso de receptor para validaciones.		37
3.6 Diseño de interfaz para visualización de datos		41
3.6.1 Parte lógica: Backend		41
3.6.2 Interfaz de usuario		43
3.7 Pruebas de distancia y estabilidad de la señal.....		44
Capítulo 4		49
4. Conclusiones y recomendaciones		50
4.1 Conclusiones.....		50
4.2 Recomendaciones		51
Referencias.....		53

Anexos A: figuras	54
Anexos B: CÓDIGOS	58

Abreviaturas

4-PAM	Modulación de 2 bits en un solo símbolo.
AC/DC	Corriente alterna/corriente directa
ALFA	Coefficiente multiplicador de la frecuencia de conmutación con respecto a la frecuencia de la cámara.
APD	Fotodiodos de avalancha
API	Interfaz de programación de aplicaciones
ASCII	Código estándar para el intercambio de información.
CMOS	Semiconductor complementario de óxido metálico
ECC	Código de corrección de errores.
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIEC	Facultad de ingeniería en electricidad y computación
FPS	Fotogramas por segundos
FSK	Modulación por desplazamiento de frecuencia
IoT	Internet de las cosas
ISO	Sensibilidad de luz de la cámara.
LED	Diodos emisores de luz
MP	Megapíxeles
MPAM	Codificación multinivel
OCC	Comunicación óptica por cámara
OOK	Manipulación Encendido-Apagado
OWC	Comunicaciones ópticas inalámbricas
PSK	Modulación por desplazamiento de fase
PWM	Modulación por ancho de pulso
QoE	Calidad de experiencia del usuario
RF	Radio frecuencia
ROI	Región de interés de la imagen.
GPIOP	Pin general de entrada y salida para programar en tiempo de ejecución.

RPI4	Raspberry Pi 4
SER	Tasa de error de símbolo
V2I	Comunicación de vehículos a infraestructura
VLC	Comunicación por luz visible

Simbología

A	Amperios
cm	Centímetro
Hz	Hercios
m	Metro
mV	Milivoltios
Ω	Ohmios
V	Voltios
μ F	Microfaradios

Índice de figuras

Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología de implementación del sistema OCC	14
Figura 3.1 Diagrama esquemático del sistema OCC.....	22
Figura 3.2 Esquemático del transmisor OCC.....	26
Figura 3.3 Funcionamiento del proceso de transmisión de símbolos	29
Figura 3.4 Diagrama de bloque del sistema de recepción y validación del transmisor OCC	37
Figura 3.5 Selección del ROI respecto al transmisor OCC.....	38
Figura 3.6 Demostración de fotogramas seleccionados en la transmisión y su distribución por fotogramas.....	40
Figura 3.7 Gráfica lineal SER vs distancia con $\alpha=5$	45
Figura 3.8 Gráfica lineal SER vs distancia con $\alpha=20$	46
Figura 3.9 Gráfica lineal SER vs distancia con $\alpha=50$	47

Índice de tablas

Tabla 2.1 Tabla comparativa de modulaciones	17
Tabla 3.1 Características de la Raspberry pi 4 modelo B	23
Tabla 3.2 Análisis de costo del proyecto.....	25

Índice de Anexos de figuras

Figura 1. Interfaz de codificación remota hacia la RPI4 por medio de MOBAXTERM.....	54
Figura 2. Interfaz de iniciación remota del servidor del interfaz de usuario hacia la RPI4 por medio de MOBAXTERM.	54
Figura 3. Interfaz de usuario	55
Figura 4. Toma de muestras del trasmisor OCC a 30cm.	55
Figura 5. Toma de muestras del trasmisor OCC a 1 metro.	56
Figura 6. Trasmisión de símbolos transmitidos a 30 alfa a una distancia de 30 cm.	56
Figura 7. Medición de pruebas con el prototipo final.	57
Figura 8. Trasmisión de símbolos con el prototipo final.....	57

Capítulo 1

1. Introducción

La idea de las ciudades inteligentes está estrechamente vinculada con la tecnología y el concepto de sostenibilidad urbana, especialmente en los países en vías de desarrollo, donde las limitaciones económicas y tecnológicas son más evidentes. Una ciudad inteligente es una zona urbana que emplea dispositivos avanzados como sensores para recopilar datos y utilizar herramientas analíticas potentes para gestionar activos, recursos y servicios de manera eficiente, reduciendo costos y disminuyendo el impacto ambiental. Este enfoque no solo optimiza el funcionamiento de la ciudad, sino que también hace que la información relevante sea accesible al público, mejorando así la calidad de los servicios gubernamentales y el bienestar de los ciudadanos.

En este contexto, las herramientas innovadoras como la comunicación óptica por cámara (OCC) están cobrando importancia. Esta comunicación emplea cámaras de óxido metálico complementario (CMOS) para detectar señales en sistemas VLC, destacándose por su mayor flexibilidad y menor costo. Estas cámaras, con su modo de obturador enrollable, exponen línea por línea en cada cuadro de imagen, en lugar de capturar todos los valores de píxeles simultáneamente como en el modo de obturador global, según Shi, He, Zhongwei y Chang (2020). Integrar este tipo de tecnologías en las ciudades inteligentes puede potenciar la recolección y análisis de datos, mejorando la conectividad y eficiencia de los servicios urbanos, y así avanzando en los objetivos de sostenibilidad y bienestar ciudadano.

El desarrollo de ciudades inteligentes se incrementa con respecto a la necesidad de implementación de soluciones tecnológicas, donde permitan una gestión efectiva y sostenible en recursos urbanos. Considerando este contexto, el uso de dispositivos avanzados permite la recopilación de datos en tiempo real, lo que facilita la optimización de diversos aspectos de la vida

urbana, como el tráfico vehicular, el consumo energético y la gestión de residuos. Al promover la transparencia y la participación ciudadana, se pone a disposición la información recolectada para su análisis y uso en beneficio de la sociedad.

Las ciudades inteligentes representan una convergencia de avances tecnológicos y sostenibilidad para la sociedad, permitiendo la integración de dispositivos como sensores y comunicaciones innovadores como el VLC y OCC, con el fin de satisfacer necesidades y superar limitaciones económicas y tecnológicas, repercutiendo en la vida cotidiana de los ciudadanos.

1.1 Descripción del problema

El surgimiento y la expansión del Internet de las Cosas (IoT), junto con la evolución de las ciudades inteligentes, han impulsado la búsqueda de innovaciones inalámbricas alternativas que ofrezcan una conectividad eficiente y robusta. La tecnología OCC emerge como una alternativa prometedora. Sin embargo, los métodos de modulación convencionales generan fluctuaciones lumínicas que afectan negativamente la calidad de experiencia del usuario (QoE) y limitan su viabilidad en diferentes entornos.

Para abordar este problema, se propone un nuevo método de modulación que garantiza una transmisión estable e ininterrumpida, independientemente de la distancia, y que mitiga la interferencia de la iluminación externa. La validación de este método requiere un emisor viable que pueda ser probado en diversos escenarios. Este emisor es considerado una herramienta fundamental para la investigación y el desarrollo de OCC, así como para impulsar y contribuir al avance de las comunicaciones ópticas inalámbricas en futuras generaciones.

Además, se desarrollará una interfaz de usuario intuitiva que permita la definición y configuración automática de las frecuencias de conmutación, permitiendo a los usuarios ajustar tanto la frecuencia de captura de la cámara como la frecuencia base del sistema; también, se

diseñará una interfaz gráfica que presentará los datos de forma clara y comprensible, utilizando gráficos, tablas o indicadores visuales. Para validar la eficacia del sistema, se establecerán escenarios controlados de prueba que reflejen las condiciones de uso previstas, abarcando variables como distintas distancias y niveles de iluminación ambiental. Existen algunas restricciones inherentes al diseño del receptor OCC. Entre ellas, se destaca la posible incompatibilidad con diversos dispositivos móviles o con modulaciones actuales. Aunque la modulación busca minimizar las fluctuaciones lumínicas, particularmente bajo condiciones de iluminación ambiental reducida.

La propuesta de modulación está diseñada para superar los desafíos asociados con una transmisión de datos seguros. En el contexto de las ciudades inteligentes, es primordial contar con comunicaciones e infraestructuras urbanas fuertes. Por lo tanto, el desarrollo de un método de modulación para las técnicas OCC es un componente crítico para el avance de los dispositivos OCC. Este método no solo aborda las limitaciones actuales, sino que también promueve una mayor eficiencia y estabilidad en la transmisión de datos, contribuyendo al desarrollo de ciudades más inteligentes en la era del IoT.

1.2 Justificación del problema

Los transmisores OCC emergen como una innovación con potencial comercial significativo en diversas áreas, especialmente en el contexto del IoT y las ciudades inteligentes, debido a que ofrece un ancho de banda exponencialmente amplio sin precedentes, hasta mil veces superior al estándar WiFi 802.11ac, lo que posibilita la transmisión de volúmenes masivos de datos y ejecución de aplicaciones de alta velocidad, por lo que desbloquea un vasto de oportunidades para la industria del entretenimiento, la educación, la atención médica y otras áreas que demandan grandes cantidades de información.

Uno de los principales desafíos de los transmisores OCC es mitigar la interferencia de la iluminación de fuentes externas. Incrementar la fiabilidad y versatilidad del sistema permite su implementación en muchas aplicaciones, desde iluminación inteligente hasta comunicaciones en interiores y exteriores. Por otro lado, los sistemas OCC proporcionan una comunicación más segura que las tecnologías basadas en radiofrecuencia, ya que la luz no atraviesa paredes ni puede interferir con las señales electromagnéticas. Esto la convierte en una opción ideal para aplicaciones críticas donde la latencia baja y la veracidad son necesarias, como la atención médica, la manufactura y el transporte.

La implementación de métodos OCC en entornos urbanos también puede transformar la manera en que se integran servicios adicionales. Por ejemplo, la transmisión de datos a dispositivos móviles y la optimización del tráfico se benefician del análisis en tiempo real de la información recopilada por los receptores OCC. Esta herramienta ofrece ventajas significativas en seguridad, ya que garantiza la integridad de la información transmitida al facilitar la creación de ciudades inteligentes.

1.3 Objetivos

Este proyecto tiene como finalidad el desarrollo de un emisor óptico innovador con respecto a las estructuras OCC, que utilice un método de modulación avanzado para evitar fluctuaciones lumínicas perceptibles y asegurar una transmisión de datos a diferentes distancias.

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar un emisor que emplee un método de modulación que no genere fluctuaciones lumínicas perceptibles por el ojo humano y que pueda transmitir datos confiablemente a diferentes distancias.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Implementar un sistema de control de conmutación adaptable que ajuste la intensidad de la luz emitida por los LEDs siendo independiente a la distancia del receptor (dispositivo móvil). Esto asegura que la señal se mantenga suficientemente fuerte para ser detectada a distancias mayores.
- Desarrollar una interfaz de usuario que permita la definición y configuración de las frecuencias de conmutación. Las frecuencias de conmutación deben ser calculadas automáticamente por el sistema. Los usuarios podrán seleccionar y ajustar tanto la frecuencia de captura de la cámara como la frecuencia base del sistema.
- Validar el emisor OCC en varios escenarios y parámetros, asegurando el envío de datos programados (símbolos) y su recepción mediante la cámara de un dispositivo móvil de manera asíncrona, para verificar la correcta transmisión y recepción de los datos esperados.

1.4 Marco teórico

Los sistemas OCC son una innovación emergente dentro del campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC). Esta tecnología aprovecha los componentes ópticos, como LEDs (diodos emisores de luz) y cámaras, para la transmisión y recepción de datos.

1.4.1 *Definición y principios básicos de OCC*

OCC se definen como un sistema de comunicación en el que una fuente de luz emite datos que son capturados por una cámara. Este método innovador se distingue de otras debido al uso de cámaras como dispositivos receptores. De esta manera, permiten la transmisión de datos a través de modulaciones de luz, las cuales son decodificadas mediante procesamiento de señales. (Guan & Wang, 2021)

Los sistemas OCC, según (Wu, Liu, & Jiang, 2022) emplean técnicas de modulación de luz para transmitir datos. Se manipulan fuentes de luz basados en LEDs para modular la señal lumínica a altas velocidades. Esto permite que la conmutación sea imperceptible para el ojo humano pero las cámaras pueden captar fácilmente la variabilidad de la luz, permitiendo la coexistencia de mecanismos OCC con la iluminación normal. Por otro lado, se tiene como principio la captura y decodificación explicado por (Pathak, Feng, Hu, & Mohapatra, 2019) acerca de la alta resolución y capacidad de procesamiento de imágenes de las cámaras modernas, la cual permite la decodificación eficiente de los datos, incluyendo la detección de las variaciones de luz y conversión de estas señales en información digital.

El procesamiento de señales sobre la tecnología OCC, (Fan, Zhang, & Huang, 2020) postula que es un componente importante en los sistemas OCC, incluyendo eliminación de ruido, corrección de errores y la mejora de la calidad de la señal, empleando mejorar la precisión y eficiencia de la decodificación de datos, representando una prometedora tecnología en el ámbito de las comunicaciones ópticas.

1.4.2 Ventajas y desventajas de los sistemas OCC

Una de las principales ventajas de los modelos OCC es su capacidad para proporcionar altas tasas de datos. Según lo explica (Wu, Liu, & Jiang, 2022), al utilizar LEDs de alta frecuencia junto con cámaras de alta resolución, es posible alcanzar tasas de transmisión de datos significativamente superiores en comparación con otros métodos. Además, estos sistemas se integran fácilmente con la infraestructura de iluminación existente, lo que permite que las luces también funcionen como transmisores de datos, tal como lo indican (Guan & Wang, 2021), mientras que (Zhuang, 2021) evidencia que la capacidad de las cámaras de teléfonos móviles para captar luz modulada permiten que se use en aplicaciones móviles facilitando los entornos

inteligente y también proponiendo un bajo consumo de energía, lo cual lo hace una opción de comunicación inalámbrica sostenible.

Así como existen ventajas innovadoras, también tiene desventajas a considerar en su funcionamiento, (Yang, Fan, & Wang, 2020) indica que existen limitantes de distancia y ángulos, debido a que la transmisión de datos disminuye considerablemente a medida que estas variables aumentan, por otro lado (Luo, Huang, & Yang, 2019) se establece que las condiciones de luz ambiental pueden afectar el desempeño de las configuraciones OCC, reduciendo la fiabilidad de la comunicación. No obstante, aunque esta tecnología posee un gran potencial, la falta de estándares universales y la compatibilidad entre diferentes modelos y dispositivos representan desafíos significativos para la implementación de dichos sistemas. (Guan & Wang, 2021)

1.4.3 Retos en el diseño de transmisores OCC independientes de la distancia y libres de interferencia lumínicas

El diseño de transmisores OCC enfrenta varios desafíos técnicos, incluyendo la necesidad de modulación de alta frecuencia para evitar fluctuaciones perceptibles, ajuste automático de potencia para mantener la calidad de la señal a diferentes distancias, y técnicas de filtrado robustas para minimizar las interferencias lumínicas. Además, se debe seleccionar LEDs y cámaras adecuados, optimizar la distribución de la luz, desarrollar algoritmos de decodificación eficientes y realizar pruebas exhaustivas en diversos escenarios. La integración de estos elementos garantizará transmisores OCC robustos para diversas aplicaciones.

1.4.3.1 Limitaciones de distancia en los sistemas OCC tradicionales. Según (Wu, Liu, & Jiang, 2022) la intensidad de la señal de luz en los mecanismos OCC disminuye con la distancia debido a la dispersión y absorción de la luz en el medio, un fenómeno conocido como atenuación que representa una limitación en estas configuraciones. A medida que se incrementa la distancia entre el transmisor y el receptor, la cámara receptora enfrenta mayores dificultades para captar y decodificar las variaciones de luz. Además, la interferencia de la luz ambiental puede afectar negativamente la distancia de transmisión, complicando la decodificación precisa de los datos transmitidos, especialmente en entornos con iluminación intensa o variable. Las limitaciones de distancia en las estructuras de OCC tradicionales tienen varias implicaciones prácticas. En aplicaciones donde la distancia de transmisión es crítica, como en la comunicación de vehículos a infraestructura (V2I) o en grandes espacios públicos, estas limitaciones pueden restringir la efectividad y la adopción de los sistemas complejos. Además, la necesidad de mantener condiciones de iluminación controladas y minimizar la interferencia ambiental puede limitar el uso de OCC en entornos dinámicos y no controlados. (Guan & Wang, 2021)

1.4.3.2 Efectos de la interferencia lumínica en las OCC. Entre los efectos de interferencia lumínica están la luz ambiental, natural y artificial, y superficies brillantes y destellos de otras fuentes de luz. Estos factores pueden interferir con la señal de luz modulada utilizada por el transmisor de las tecnologías OCC, lo que dificulta que la cámara receptora distinga entre la señal modulada y el ruido generado por la interferencia, como explican (Wu, Liu, & Jiang, 2022). Esta interferencia afecta la calidad de las configuraciones OCC al provocar una reducción en la tasa de datos, un aumento en la tasa de errores y limitaciones en el alcance de la transmisión, donde se presentan efectos en la calidad de las implementaciones OCC como:

- Reducción de la tasa de datos

La interferencia lumínica puede reducir la tasa de datos efectiva en los métodos OCC, el filtrado e interferencias puede requerir algoritmos más complejos y lo que puede disminuir la velocidad de transmisión según (Fan, Zhang, & Huang, 2020)

- Aumento de tasa de error

La presencia de interferencia lumínica puede también aumentar la tasa de error en la transmisión de datos, la señal en cuestión puede perderse o distorsionarse, resultando en errores en la decodificación de información, siendo esta la consecuencia principal en la disminución de precisión y finalidad de OCC. (Pathak, Feng, Hu, & Mohapatra, 2019)

- Limitaciones del alcance

Según (Luo, Huang, & Yang, 2019), la interferencia lumínica puede limitar el alcance efectivo de la comunicación, siendo esta la variable que reduzca la distancia dentro de la captación señales de luz modulada, donde se restringe la distancia máxima.

1.4.4 Estrategias de mitigación de los efectos de la interferencia en los sistemas OCC

Las OCC enfrentan diversos desafíos relacionados con las interferencias lumínicas, que pueden degradar la calidad de la señal y afectar la fiabilidad de la transmisión de datos. A continuación, se presentan varias estrategias para mitigar estos efectos y mejorar el rendimiento de los sistemas OCC; tales como el uso de filtros ópticos en las cámaras receptoras pueden ayudar a reducir la interferencia lumínica, estos filtros pueden bloquear ciertas longitudes de onda de luz no deseada producida por las anteriores limitantes según la experimentación realizada por (Yang, Fan, & Wang, 2020) y la implementación de una iluminación óptima, donde se minimicen los reflejos y la superposición de señales puede ayudar a reducir la interferencia, el uso de materiales no reflectantes y contribuyen a una comunicación más clara.

1.4.5 Técnicas de modulación para transmisores OCC

Estas técnicas se centran en la manipulación de la luz emitida por LEDs para transmitir información y se describen a continuación.

1.4.5.1 Modulación de intensidad óptica (OIM). OIM es una técnica importante en los transmisores OCC, permitiendo la transmisión de datos mediante la variación de la intensidad de la luz emitida. Este método es valorado por su simplicidad y eficiencia en el uso de la energía, ya que los transmisores basados en LED pueden modularse fácilmente para representar diferentes niveles de intensidad correspondientes a los datos digitales. La OIM es particularmente eficaz para configuraciones OCC debido a su capacidad para proporcionar altas tasas de datos y mantener la integridad de la señal en presencia de interferencias lumínicas, mejorando de este modo la veracidad y la cobertura de la comunicación (Yang, Fan, & Wang, 2020); además, esta técnica facilita la implementación en diversas aplicaciones, desde comunicación vehicular hasta iluminación inteligente, debido a su compatibilidad con la infraestructura de iluminación existente y su capacidad para operar en entornos dinámicos. (Wu, Liu, & Jiang, 2022)

1.4.5.2 Modulación por ancho de pulso (PWM). PWM es una técnica muy utilizada en los transmisores de OCC, donde la duración de los pulsos de luz varía para representar diferentes niveles de datos digitales. Este método es apreciado por su alta eficiencia energética y su capacidad para reducir la interferencia y el ruido, lo que mejora significativamente la calidad de la señal transmitida. (Chen, Liu, & Wang, 2020). Permite una alta tasa de datos y una transmisión confiable en diversas condiciones ambientales, siendo especialmente útil en aplicaciones donde la estabilidad y la precisión de la señal son críticas, como en sistemas de comunicación vehicular y de iluminación inteligente (Yang, Fan, & Wang, 2020). Además, la implementación de PWM en transmisores LED es relativamente sencilla y rentable, lo que facilita su integración en la infraestructura existente y su adaptabilidad a diferentes escenarios de uso. (Zhuang, 2021)

Capítulo 2

2. Metodología

El diseño de un sistema OCC, presenta desafíos únicos que requieren una metodología rigurosa y detallada. En este contexto, el enfoque experimental se rige como la estrategia más adecuada para explorar y optimizar las características del transmisor.

2.1 Diseño del sistema de comunicación óptica

Para abordar el diseño de un transmisor OCC independiente de la distancia y libre de fluctuaciones lumínicas, se ha adoptado un enfoque experimental. Este enfoque es adecuado para evaluar la efectividad del diseño del transmisor bajo diversas condiciones ya que permite la realización de pruebas controladas y sistemáticas en un entorno de laboratorio, donde se pueden manipular variables claves como la distancia entre el transmisor y el receptor, así como las condiciones de iluminación.

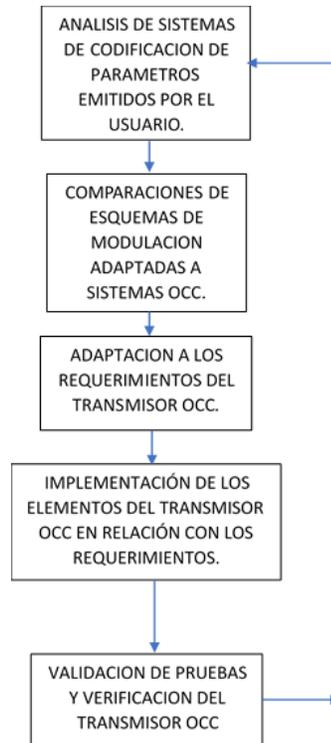
A través de estas pruebas, se puede observar el comportamiento del conjunto y realizar ajustes en el diseño para optimizar su rendimiento. Además, los datos obtenidos de los experimentos proporcionan una base sólida para el análisis cuantitativo, permitiendo una evaluación objetiva de la robustez y eficiencia del transmisor en escenarios prácticos.

2.2 Descripción del sistema

En la Figura 2.1 se presenta el proceso de construcción del sistema OCC, con un enfoque en la parte del transmisor. Además, incluye un análisis de los modelos de codificación aplicados a los datos emitidos por el usuario, hasta llegar a la validación de la transmisión.

Figura 2.1

Diagrama de flujo de la metodología de implementación del sistema OCC



Nota. La figura nos muestra los pasos del proceso de la experimentación del sistema OCC.

2.2.1 Análisis de sistemas de codificación y parámetros emitidos por el usuario

En los entornos OCC, la codificación eficiente de parámetros emitidos por el usuario implica transformar secuencias binarias en símbolos ópticos que puedan ser transmitidos y recibidos de manera efectiva. Este proceso ayuda a optimizar la velocidad de transmisión y la robustez frente a errores. La elección del método de codificación determina cómo se asignan los bits a símbolos ópticos, influenciando directamente en la eficiencia espectral y la capacidad de adaptación a diferentes condiciones de transmisión.

Un enfoque común es la codificación multinivel (M-PAM), donde múltiples niveles de amplitud o fase se utilizan para representar diferentes combinaciones de bits. Por ejemplo, en un sistema de codificación 4-PAM, cada símbolo puede representar hasta 2 bits (00, 01, 10, 11), optimizando el uso del espectro electromagnético disponible y aumentando la velocidad de transmisión sin requerir un ancho de banda considerablemente mayor. Esta técnica no solo mejora la eficiencia espectral, sino que también facilita la detección y corrección de errores mediante la comparación de los símbolos recibidos con los símbolos esperados.

La implementación práctica de la codificación por transformación de bits a símbolos en OCC implica considerar la complejidad del hardware y software requerido, así como la capacidad de adaptación a variaciones en la tasa de cuadros (FPS) y otras condiciones del canal, siendo la intensidad de la luz una influencia en el alcance y la fiabilidad de la transmisión, mientras que el rango de distancias asegura que el sistema sea funcional tanto en entornos cercanos como lejanos. Evaluar estos parámetros permite optimizar el rendimiento, garantizando una comunicación estable, independientemente de las condiciones ambientales y de distancia entre el transmisor y el receptor.

2.2.2 Comparaciones de esquemas de modulación adaptadas a sistemas OCC

La elección de un esquema de modulación apropiado es fundamental para garantizar una transmisión de datos resistentes, especialmente en métodos de comunicación que emplean luz visible (VLC). Los diversos métodos de modulación, como OOK (Manipulación Encendido-Apagado), FSK (Modulación por desplazamiento de frecuencia) y PSK (Modulación por desplazamiento de fase), presentan distintas ventajas y desventajas, las cuales se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1*Tabla comparativa de modulaciones*

Modulaciones	Características	Ventajas	Desventajas
OOK (Manipulación Encendido- Apagado)	Modulación de amplitud simple que enciende y apaga la luz para representar bits binarios (1 y 0).	Fácil de implementar y entender.	Susceptible a interferencias y ruido; requiere control preciso de la luz para evitar errores en la transmisión, especialmente a altas tasas de cuadros (FPS).
FSK (Modulación por desplazamiento de frecuencia)	Modula la frecuencia de la señal de luz para representar diferentes bits.	Robustez frente al ruido, simplicidad.	Requiere mayor ancho de banda y algoritmos de sincronización complejos.
PSK (Modulación por desplazamiento de fase)	Modifica la fase de la señal de luz para aumentar la cantidad de datos transmitidos dentro del mismo ancho de banda.	Mayor eficiencia espectral.	Requiere una implementación más compleja debido a la necesidad de una sincronización de fase precisa.
PWM (Modulación por ancho de pulso)	Controla la intensidad luminosa y minimiza el parpadeo.	Mantiene una calidad de señal constante independientemente de la distancia entre el transmisor y el receptor.	Mayor complejidad de implementación.
Persiana enrollable	Utiliza las propiedades de los sensores CMOS	Transmisión constante y libre de	Requiere una sincronización exacta y

de persiana enrollable para la captura de imágenes	parpadeo, adecuada para aplicaciones de iluminación y publicidad	un procesamiento avanzado, lo que incrementa la complejidad del sistema.
--	--	--

Nota. Datos tomados de la fuente Visible Light Communication: Theory and Applications por S. Rajagopal, R. D. Roberts y S.-K. Lim (2021).

2.2.3 Implementación de los elementos del transmisor OCC en relación con los requerimientos

La implementación de los elementos del transmisor OCC en relación con los requerimientos del esquema de modulación abarcan varios componentes claves y consideraciones técnicas. En primer lugar, la selección de la fuente de luz LEDs de alta calidad es vital, ya que deben ofrecer una emisión de luz estable y consistente para evitar variaciones que puedan causar parpadeo. Estos LEDs deben ser controlables en términos de intensidad y frecuencia para adaptarse a las necesidades de modulación. En cuanto a la modulación, se selecciona la modulación basada en el efecto de persiana enrollable (rolling shutter) debido a sus numerosas ventajas. Esta técnica elimina el parpadeo perceptible al usar frecuencias de conmutación específicas, lo que permite una transmisión de datos constante y estable sin molestar a las personas (Chavez, Rabadan, Guerra, & Perez, 2021). Además, es adaptable a diferentes rangos de distancia, cortos a largos, lo que hace que el sistema sea versátil en cuanto a alcance de operación.

Por otra parte, debe contar con una alimentación eficiente. Para lograrlo, se debe usar fuentes de alimentación reguladas que mantengan una corriente constante, evitando así fluctuaciones en la emisión de luz. También es importante implementar disipadores de calor para prevenir el

sobrecalentamiento de los LEDs y otros componentes electrónicos, lo cual podría afectar el rendimiento del transmisor.

La conmutación desempeña un papel fundamental en la implementación del transmisor OCC, ya que el sistema debe ser lo suficientemente rápido para alternar entre los estados de encendido y apagado del LED sin introducir retrasos significativos ni generar ruido eléctrico. Para cumplir con esta función, se utilizan transistores MOSFET debido a su alta velocidad de conmutación y eficiencia.

Adicionalmente, la programación de algoritmos de control que ajusten automáticamente los parámetros de transmisión, como la intensidad de la luz y la frecuencia de modulación, en respuesta a las condiciones ambientales y los requerimientos del usuario son cruciales. Estos algoritmos pueden optimizar el rendimiento en tiempo real, asegurando una comunicación estable.

2.2.4 Validación de pruebas y verificación del transmisor OCC

Para la implementación práctica, se propone la inclusión de diferentes frecuencias de conmutación en el emisor OCC para estudiar el comportamiento de los LEDs y asegurar que las fluctuaciones lumínicas no sean perceptibles por el ojo humano. Además, se realizarán pruebas en varios escenarios, considerando distintas distancias, condiciones de iluminación y configuraciones de frecuencias con respecto FPS en la cámara del dispositivo móvil.

Estas pruebas de laboratorio controladas servirán para evaluar la estabilidad y consistencia de la emisión de luz de los LEDs, donde se deben incluir la medición de la intensidad de la luz y la verificación de la ausencia de fluctuaciones lumínica perceptible a diferentes frecuencias de modulación. La utilización de fotómetros y cámaras de alta velocidad puede detectar cualquier

fluctuación en la emisión de luz, permitiendo validar la transmisión y recepción correcta de los datos programados, lo que asegura que el sistema OCC sea veraz en diversas circunstancias.

Además, es primordial realizar pruebas de campo para evaluar el rendimiento del transmisor OCC en condiciones reales. Estas pruebas deben incluir la transmisión de datos a diferentes distancias y en diversos entornos ambientales, como interiores y exteriores, para verificar la integridad del sistema. La calidad de la señal recibida debe ser analizada para identificar posibles errores de transmisión y verificar la eficacia del esquema de modulación en condiciones variables.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

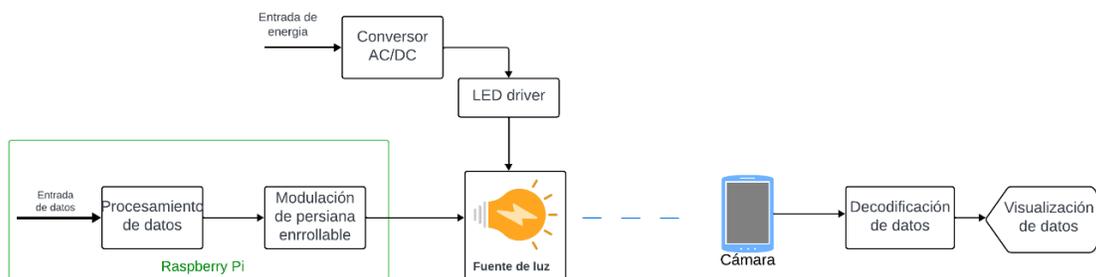
En este capítulo se presenta una evaluación exhaustiva del desempeño y la efectividad del transmisor OCC desarrollado. Con un enfoque experimental, se han hecho diversas pruebas para validar y alcanzar los objetivos establecidos.

3.1 Estructura del sistema OCC

En la figura 3.1, se presenta como el flujo de datos del sistema, que comienza con la entrada de datos en la Raspberry Pi 4, donde son procesados y modulados. Estos datos modulados controlan la fuente de luz, captada por una cámara. El video capturado es decodificado y los datos resultantes se visualizan en un dispositivo de salida. el conversor AC/DC y el LED controlador aseguran que la fuente de luz funcione correctamente, proporcionando la energía y el control necesarios para la modulación y emisión de la luz.

Figura 3.1

Diagrama esquemático del sistema OCC



Nota. En la figura describe el funcionamiento de todo el sistema OCC, con la interacción de los diferentes bloques.

3.1.1 Selección de componentes electrónicos y herramientas

La elección adecuada de componentes electrónicos y herramientas de desarrollo es importante para diseñar un sistema que no solo sea funcional, sino también eficiente.

3.1.1.1 Raspberry Pi 4 Model B. En el sistema OCC, la Raspberry Pi 4, como se indica en la tabla 3.1, actúa como el núcleo del emisor. Esta elección se debe a su versatilidad y a su capacidad de procesamiento, que la hacen particularmente adecuada para esta aplicación.

Tabla 3.1

Características de la Raspberry Pi 4 modelo B

CARACTERÍSTICAS	DEFINICIÓN
Procesador	Procesador ARM Cortex que proporciona suficiente potencia para realizar tareas de procesamiento de datos y control de hardware en tiempo real.
GPIO	Los pines GPIO permiten la interacción directa con otros componentes electrónicos, como LEDs y sensores, facilitando la modulación y el control de la fuente de luz.
Almacenamiento	Utiliza tarjetas microSD para almacenamiento, permitiendo una fácil actualización y ampliación del sistema.
Compatibilidad con Software	Compatible con una amplia variedad de lenguajes de programación, lo que facilita el desarrollo de software personalizado para OCC.

3.1.1.2 Tira LED SMD 5050 12 V blanco frío. La tira LED SMD 5050 12 V blanco frío, con su alta eficiencia luminosa y flexibilidad, es ideal para dispositivos OCC. Su luz blanca fría proporciona alto contraste, facilitando la detección y decodificación de señales luminosas por la cámara receptora. Además, su capacidad de modulación mediante PWM permite transmitir datos codificados eficientemente. La flexibilidad de las tiras LED permite una fácil integración en diversas configuraciones y entornos, mientras que su bajo consumo energético asegura un funcionamiento prolongado. Estas características la convierten en una opción excelente tanto para pruebas y prototipos como para aplicaciones finales en sistemas OCC.

3.1.1.3 Raspberry Pi cámara 5MP. La cámara de Raspberry Pi de 5MP es importante en OCC por su alta resolución y capacidad de capturar imágenes a alta velocidad. Estas características permiten una detección y decodificación precisa de las señales luminosas emitidas por LEDs. Su compatibilidad con la Raspberry Pi facilita la integración con otros componentes y el desarrollo de software personalizado para procesamiento de imágenes y análisis de datos. La cámara de 5MP ofrece una solución compacta para aplicaciones de OCC, asegurando un rendimiento confiable en diversas condiciones operativas.

3.1.2 Análisis de costo del proyecto

Los materiales principales, se muestran en la tabla 3.2, incluyen una Raspberry Pi 4 Model B y una cámara Raspberry Pi de 5MP, cuya inversión inicial representa una parte significativa del presupuesto. Las resistencias de 220 ohms y 10 k ohms, junto con el transistor Mosfet IRFZ44N, son componentes elementales, pero de bajo costo. El capacitor de 2.2uF 75V y el diodo 1N4148,

aunque son componentes especializados, también se adquieren a precios accesibles. El panel difusor y la tira LED SMD 5050 de 12 V en blanco frío, de 5 metros de longitud, imprescindibles para la emisión óptica, representan otro gasto significativo, especialmente debido a la calidad y extensión de la tira LED.

En conjunto, estos materiales permiten construir un transmisor robusto a un costo total de \$244.65, sin incurrir en gastos excesivos.

Tabla 3.2

Análisis de costo del proyecto

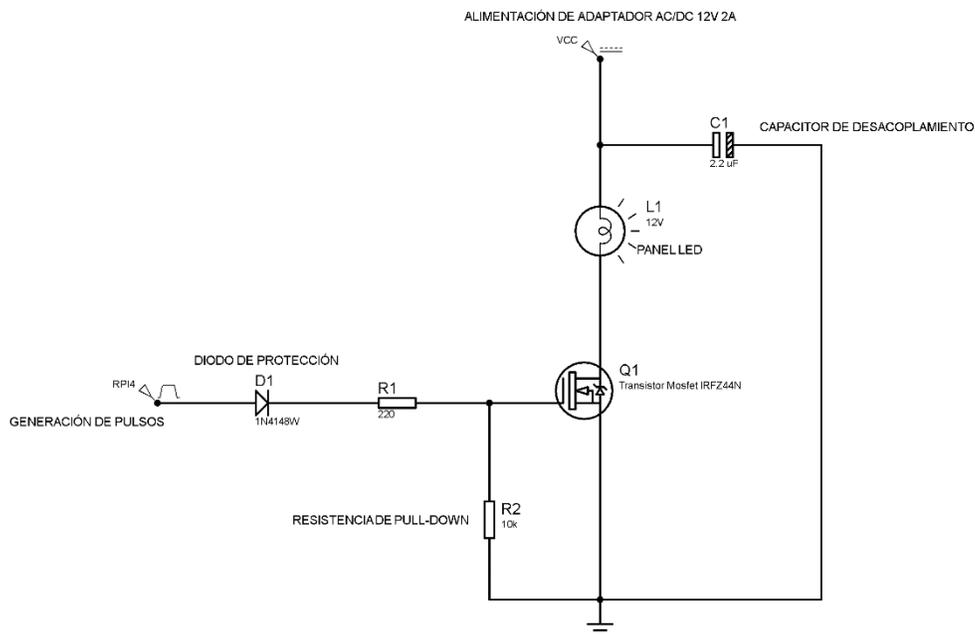
Componente electrónico/Material	Marca	Proveedor	Precio Unitario
Raspberry Pi 4 Model B		Mercado libre	\$205.80
Raspberry Pi cámara 5MP		VILCONSA	\$14.50
Resistencia de 220 ohms		VILCONSA	\$0.10
Resistencia de 10 k ohms		VILCONSA	\$0.10
Transistor Mosfet IRFZ44N		VILCONSA	\$1.80
Capacitor 2.2uF 75V		VILCONSA	\$0.75
Diodo 1N4148		VILCONSA	\$0.50
Panel difusor	SYLVANIA	PROMART	\$4.80
Tira LED SMD 5050 12 V blanco frio 5m	-	VILCONSA	\$9.80
Convertidor AC/DC 12 V 2ª		Mercado libre	\$6.50
TOTAL			\$244.65

3.2 Esquemático del transmisor OCC

El análisis del circuito de un transmisor OCC es fundamental para garantizar un diseño funcional. Este circuito incluye varios componentes clave: resistencias para el control de la corriente, diodos que protegen los componentes sensibles al evitar el retorno de la corriente, y un transistor que actúa como interruptor de la señal. También cuenta con un panel LED como medio principal de emisión de la señal óptica. Además, un convertidor de voltaje ajusta los niveles necesarios para diferentes partes del circuito, asegurando un funcionamiento estable del transmisor, como se muestra en la figura 3.2.

Figura 3.2

Esquemático del transmisor OCC



Nota. La figura nos muestra el esquemático que representa las conexiones dentro del controlador LED.

3.2.1 Raspberry Pi 4 (generación de pulsos)

Se emplea como controlador principal para generar una señal de pulsos, esencial para la modulación del LED en el transmisor OCC. La RPi4 puede generar señales con distintas frecuencias y formas de onda, aunque se usa una señal cuadrada alternada entre niveles altos y bajos. La variación en estos pulsos es lo que permite la modulación de la luz del LED, facilitando así la transmisión de datos. Esta señal de pulsos se emite desde uno de los pines GPIO (GPIO17) de la RPi4.

3.2.2 Diodo de Protección (D2 - 1N4148)

El diodo de protección 1N4148W se coloca en serie con la señal de pulsos que proviene de la RPi4 antes de llegar al MOSFET. Este componente pretende proteger el MOSFET y el circuito contra posibles picos de voltaje inverso. En ausencia de este diodo, cualquier voltaje negativo podría dañar el MOSFET y potencialmente la RPi4. El 1N4148 es un diodo de alta velocidad que responde rápidamente a estos cambios, asegurando la protección sin introducir retardos significativos en la señal.

3.2.3 Resistencia (R1 - 220 Ω)

La resistencia de 220 ohmios se coloca en serie con la señal de pulsos que va al gate del MOSFET. Su principal función es limitar la corriente que fluye hacia el gate del MOSFET. Esto ayuda a evitar que una corriente excesiva dañe el MOSFET o la salida del GPIO de la RPi4. La resistencia asegura que solo una corriente llegue al gate, permitiendo un control fiable del MOSFET sin riesgo de sobrecarga.

3.2.4 Transistor MOSFET (Q1 - IRFZ44N)

El transistor MOSFET IRFZ44N es vital en el circuito del controlador del panel LED, ya que actúa como un interruptor electrónico. Su gate es controlado por la señal de pulsos de la RPi4. Cuando la señal es alta (en estado "ENCENDIDO"), el MOSFET se activa y permite el flujo de corriente desde la fuente (drain) hasta el drenaje (source), encendiendo así el panel LED. Cuando la señal es baja (en estado "off"), el MOSFET se apaga, interrumpiendo el flujo de corriente y apagando el LED. Este control permite que el LED parpadee de acuerdo con la señal de pulsos, modulando la luz para transmitir datos.

3.2.5 Resistencia Pull-Down (R2 - 10k Ω)

La resistencia de 10k ohmios se conecta entre el gate del MOSFET y tierra. Esta resistencia asegura que el gate del MOSFET esté en un estado bajo cuando no hay una señal de control presente. Sin esta resistencia, el gate podría quedar en un estado flotante, lo que podría hacer que el MOSFET se active inadvertidamente debido a ruido o interferencias. Al asegurar un estado bajo, R2 mantiene el MOSFET apagado y el LED apagado cuando no se está enviando una señal de pulsos.

3.2.6 Panel LED (SMD 5050 12V)

El panel LED L1 es el componente encargado de emitir luz y posibilitar la transmisión de datos mediante la modulación óptica. Está diseñado para operar a 12V y se enciende y apaga en respuesta a la señal modulada controlada por el MOSFET. La rápida conmutación del LED

siguiendo la señal de pulsos permite la transmisión de datos en forma de luz, que puede ser captada por un receptor óptico, como una cámara.

3.2.7 Capacitor de desacoplamiento (2.2 μF)

El capacitor se coloca entre la alimentación y tierra. Su función principal es filtrar ruidos y estabilizar la alimentación del circuito. Los capacitores de desacoplamiento mantienen un voltaje constante, eliminando las fluctuaciones que podrían afectar el funcionamiento de los componentes sensibles, como el MOSFET y el panel LED.

3.2.8 Alimentación de adaptador AC/DC (12V, 2A)

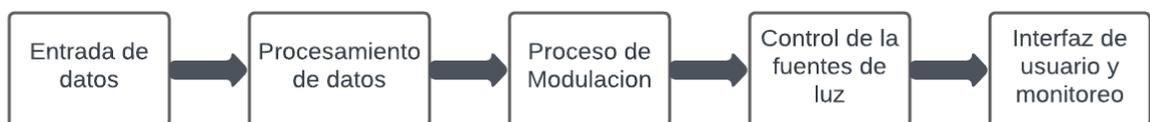
La fuente de alimentación destinada es un adaptador AC/DC que proporciona 12V y 2A. Esta fuente proporciona energía necesaria para operar el panel LED y el circuito. La elección de una fuente de 12V asegura que el panel LED opere en su voltaje nominal, mientras que la capacidad de 2A proporciona suficiente corriente para el LED y cualquier otro componente del circuito.

3.3 Funcionamiento del transmisor OCC

Uno de los componentes más importantes del transmisor es la Rpi4, con ella se realizan las principales actividades del transmisor, las cuales se pueden observar en la figura 3.3.

Figura 3.3

Funcionamiento del proceso de transmisión de símbolos



Nota. Muestra en la figura los diferentes pasos para la manipulación de elementos y funcionamiento del transmisor OCC.

3.3.1 Entrada de datos

En la interfaz de usuario se ingresan los datos de texto, valor de α y nombre el cual se identificará el video de transmisión, la entrada de datos es un aspecto elemental que se maneja de manera interactiva a través de la consola. El proceso comienza solicitando al usuario que ingrese el nombre del archivo de video y el valor del parámetro “*alpha*”. Esta interacción inicial se realiza usando las funciones “*input()*” y permite al usuario especificar tanto el nombre del archivo de video resultante como el valor de α , que se utiliza para ajustar las frecuencias de modulación durante la transmisión de los símbolos binarios.

Posteriormente, en un bucle continuo, el programa solicita al usuario que ingrese los datos que desea convertir en símbolos binarios para la transmisión. Esta entrada de datos se toma también mediante la función “*input()*”, lo que permite al usuario ingresar una cadena de texto. Este texto se convierte posteriormente en una secuencia de símbolos binarios mediante la función “*generar_simbolos_binarios*”, que transforma cada carácter de la cadena en su representación binaria correspondiente.

El programa permite que el usuario ingrese múltiples cadenas de texto en sucesión, transmitiendo cada una hasta que el usuario ingresa la palabra clave “*fin*”, que se usa como señal para terminar la entrada de datos y detener la transmisión. Esta metodología de entrada de datos asegura flexibilidad y control por parte del usuario, permitiendo un ajuste dinámico y preciso del contenido a transmitir y del comportamiento del sistema.

3.3.2 Procesamiento de datos ingresados

El procesamiento de datos ingresados en el código proporcionado transforma la información textual proporcionada por el usuario en una secuencia de símbolos binarios aptos para la transmisión mediante modulación de luz visible. Una vez que el usuario ha ingresado la cadena de texto deseada, esta se procesa a través de la función “*generar_simbolos_binarios*”. Esta función descompone cada carácter de la cadena en su correspondiente código ASCII y luego lo convierte en una cadena binaria de 8 bits, asegurando que cada carácter se represente de manera uniforme mediante el relleno de ceros a la izquierda cuando sea necesario. La cadena binaria se segmenta en símbolos binarios de longitud específica, determinada por el parámetro “*num_bits_por_simbolo*”, dividiendo la cadena en partes más manejables para la modulación. Estos símbolos binarios se almacenan en una lista para su posterior procesamiento.

Posteriormente, cada símbolo binario se asocia con una frecuencia de modulación específica mediante la función “*asignar_frecuencia*”. Esta función evalúa el valor del símbolo binario y asigna una frecuencia de transmisión basada en la velocidad de fotogramas (fps) y el parámetro α , garantizando que cada combinación de bits ('11', '10', '01', '00') se traduzca en una frecuencia de modulación distinta.

3.3.3 Proceso de modulación aplicando persiana enrollable

Rpi4 modula los datos procesados en una señal que puede usarse para controlar la fuente de luz. Esto implica generar una señal de control que variará la intensidad luminosa del LED de acuerdo con los datos a transmitir.

La señal modulada se envía con los pines GPIO hacia el LED controlador, que controla la fuente de luz. Rpi4 ajusta la frecuencia y la intensidad de la luz emitida para transmitir los datos de manera eficiente. También proporcionar una interfaz de usuario para monitorear el estado del sistema, ajustar parámetros de transmisión, y visualizar información en tiempo real sobre la comunicación.

El proceso de modulación aplicado sigue un esquema de modulación libre de fluctuaciones y distancia es independiente, específicamente diseñado para OCC estipulado por (Chavez, Rabadan, Guerra, & Perez, 2021). Una vez que los datos ingresados se han transformado en símbolos binarios, cada símbolo se modula en una frecuencia específica utilizando un esquema que minimiza las fluctuaciones perceptibles en la intensidad luminosa, asegurando que la modulación sea imperceptible al ojo humano. La función “*asignar_frecuencia*” asigna frecuencias distintas a cada símbolo binario basándose en una combinación de la velocidad de fotogramas de la cámara (fps) y un factor de ajuste α . Este esquema garantiza que las frecuencias de modulación se mantengan dentro de un rango que evita el parpadeo visible, primordial para aplicaciones de OCC donde la calidad de la experiencia visual no debe verse comprometida.

La modulación se realiza mediante la función “*transmitir_simbolos*”, la cual controla la señal PWM del LED. El panel LED se enciende y apaga a intervalos precisos de acorde a la frecuencia en cuestión, determinados por la frecuencia asignada a cada símbolo binario. Para cada símbolo, la frecuencia de modulación se convierte en un período específico (inverso de la frecuencia), durante el cual el panel alterna entre encendido y apagado. Este proceso se realiza con un ciclo de trabajo meticulosamente controlado para asegurar que la intensidad luminosa promedio

se mantenga constante. Este control preciso del ciclo de trabajo y de los periodos de encendido y apagado asegura que la modulación sea libre de parpadeo.

Además, el sistema genera tres fotogramas por símbolo, cubriendo diferentes escenarios de iluminación y asegurando una robusta transmisión de datos sin importar las variaciones en la distancia entre el transmisor y el receptor. Este enfoque garantiza que la información se transmita de manera fiable y consistente, incluso si hay cambios en la distancia, manteniendo la calidad de la señal recibida por la cámara. Este proceso de modulación avanzada y su implementación precisa refleja un diseño cuidadoso destinado a optimizar la eficiencia y la eficacia de las comunicaciones ópticas, garantizando una transmisión de datos sin interferencias perceptibles.

3.3.3.1 Ecuaciones de la modulación. Las frecuencias de modulación se derivan de la velocidad de fotogramas de la cámara (fps) y un parámetro α para asegurar que los pulsos de luz sean imperceptibles al ojo humano y consistentes en diversas distancias, las ecuaciones para las frecuencias de los símbolos binarios se pueden derivar considerando la necesidad de tener frecuencias suficientemente altas y adecuadamente espaciadas:

- Para el símbolo 11:

$$f_{11} = \alpha \cdot f_{CAM}$$

Donde α es el parámetro ajustable y f_{CAM} es la velocidad de fotogramas de la cámara. Esto asegura que la frecuencia base está alineada con la velocidad de fotogramas, evitando interferencias.

- Para el símbolo 10:

$$f_{10} = \left(\alpha + \frac{1}{6} \right) \cdot f_{CAM}$$

Se añade un sexto de la velocidad de fotogramas para obtener una frecuencia ligeramente mayor, manteniendo la diferencia suficiente para una modulación clara.

- Para el símbolo 01:

$$f_{01} = \left(\alpha + \frac{1}{3} \right) \cdot f_{CAM}$$

Se añade un tercio de la velocidad de fotogramas para espaciar aún más la frecuencia, asegurando distinciones claras entre las diferentes modulaciones.

- Para el símbolo 00:

$$f_{00} = \left(\alpha + \frac{1}{2} \right) \cdot f_{CAM}$$

Se añade la mitad de la velocidad de fotogramas, con la frecuencia más alta entre las cuatro, adecuado para la última combinación de bits.

Las fracciones añadidas a α ($1/6$, $1/3$, $1/2$) se seleccionan para proporcionar un espaciamiento uniforme y suficiente entre las frecuencias. Esto asegura que cada símbolo binario tenga una frecuencia distintiva, lo cual es trascendental para la decodificación correcta en el receptor.

3.4 Proceso de recepción con RPI cámara

El proceso de recepción con la cámara Raspberry Pi en OCC comprende una serie de etapas meticulosamente diseñadas para asegurar la correcta transmisión y recepción de datos utilizando modulación de amplitud de pulso (PWM). Inicialmente, se configura el hardware: los pines GPIO de la Raspberry Pi se emplea para controlar un LED mediante PWM a una frecuencia de 25 kHz, garantizando un ciclo de trabajo del 100% para asegurar que el LED esté completamente encendido.

Paralelamente, se configura la cámara Raspberry Pi con una resolución de 1920x1080 píxeles y una tasa de 20 cuadros por segundo (FPS), estableciendo un valor constante para la ganancia analógica (ISO) para mantener una exposición uniforme durante la transmisión. Durante la operación, la cámara está constantemente grabando el entorno y capturando los fotogramas que contienen las señales moduladas; el servidor Flask se implementa para gestionar las solicitudes HTTP, permitiendo el control remoto del sistema. A través de rutas definidas, el servidor facilita funciones como el control del LED, la visualización de símbolos binarios, el inicio y la detención de la grabación de video, y la transmisión de datos.

El control del LED se maneja mediante solicitudes POST a la ruta *"/control_led"*, ajustando el ciclo de trabajo del PWM para encender o apagar el LED, esencial para la modulación de la luz que representa los datos transmitidos.

Antes de la transmisión, la ruta *"/show_symbols"* permite obtener y visualizar los símbolos binarios generados a partir de los datos de entrada, proporcionando una verificación visual de los datos. Al comenzar la transmisión a través de la ruta *"/transmit"*, los datos de entrada se

transforman en símbolos binarios, los cuales se imprimen en la consola para su verificación. Se inicia un proceso ffmpeg para grabar el video con rotación de 90 grados y conversión a escala de grises, mejorando la visibilidad de los símbolos. Durante la transmisión, los fotogramas de video capturados por la cámara se escriben en el proceso ffmpeg, garantizando que toda la transmisión se grabe para análisis posterior.

La grabación se puede detener a través de la ruta *"/stop_recording"*, cerrando el proceso ffmpeg, y el sistema se puede reiniciar mediante la ruta *"/reset"*, deteniendo cualquier transmisión o grabación en curso y manteniendo el LED encendido al 100%. La función *"transmit_symbols"* maneja la transmisión de los símbolos binarios generados, asignando una frecuencia específica a cada símbolo basada en el esquema Flickering-Free Distance-Independent estipulado por (Chavez, Rabadan, Guerra, & Perez, 2021), que depende del valor de *"Alpha"* y la tasa de cuadros de la cámara.

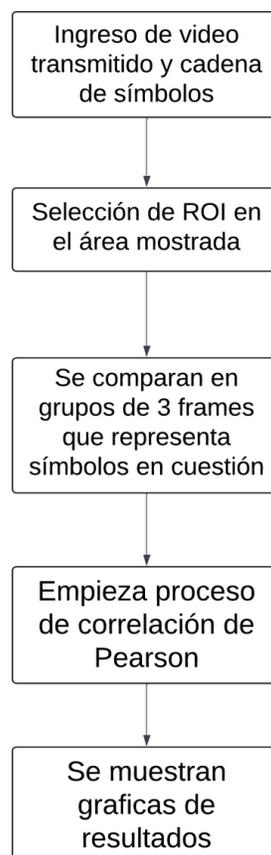
Los símbolos se transmiten ajustando el ciclo de trabajo del PWM para encender y apagar el LED a la frecuencia calculada, donde dicho proceso de recepción comienza cuando se inicia la grabación de video, lo que permite capturar la luz emitida por el LED que está modulando los símbolos binarios, a medida que se transmiten los símbolos, la cámara captura cada cambio en la intensidad de la luz, registrando los fotogramas que corresponden a los diferentes estados del LED (encendido y apagado).

3.5 Proceso de receptor para validaciones.

El código de recepción para validaciones, cuyo proceso se ilustra en la figura 3.4, está diseñado de manera independiente para procesar y validar los videos emitidos por un transmisor OCC. Este código emplea la correlación de Pearson para analizar la relación entre fotogramas consecutivos dentro de una región de interés (ROI) seleccionada por el usuario, permitiendo así identificar los símbolos transmitidos.

Figura 3.4

Diagrama de bloque del sistema de recepción y validación del trasmisor OCC

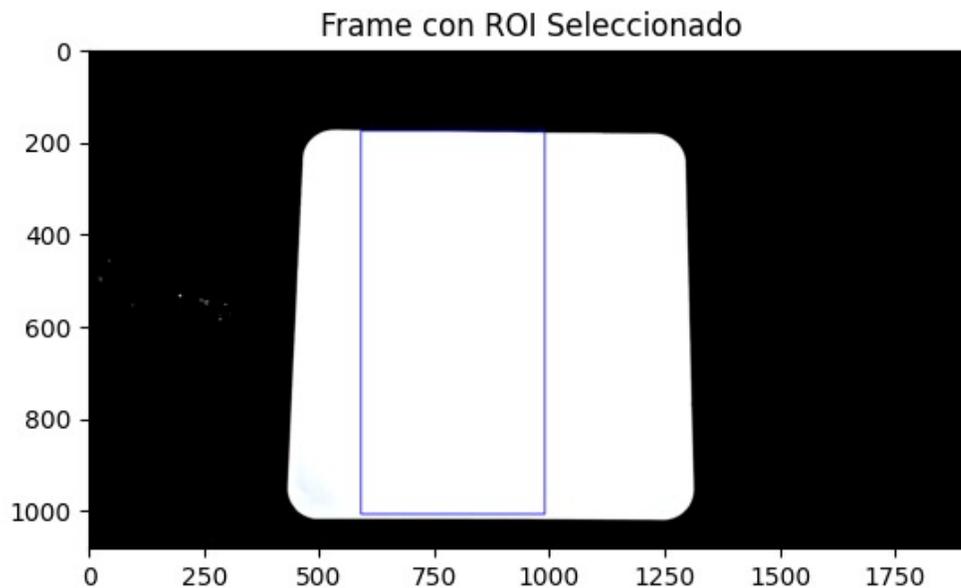


Nota. En la figura nos muestra los diferentes pasos para la ejecución de validación del sistema OCC.

El código inicia solicitando al usuario que seleccione un archivo de video a través de una interfaz gráfica proporcionada por Tkinter, una vez que el video es cargado, el primer fotograma es mostrado al usuario para que este seleccione interactivamente una región de interés (ROI). Esta región será la que el sistema analizará en todos los fotogramas subsecuentes para determinar la similitud entre 3 fotogramas consecutivos como se muestra en la figura 3.6.

Figura 3.5

Selección del ROI respecto al trasmisor OCC.



Nota. En la figura nos muestra la extracción de la región de interés para aplicar los modelos estadísticos y verificar los símbolos transmitidos.

En la figura 3.5 el usuario define el ROI seleccionando dos puntos en la imagen: la esquina superior izquierda y la esquina inferior derecha del rectángulo que delimitará el área de interés. Esta región es importante, ya que todas las operaciones subsecuentes se realizarán dentro de este

rectángulo, permitiendo un análisis más preciso y localizado; porque, si se define el fotograma capturado, los modelos estadísticos toman en cuenta el área alrededor del sistema OCC.

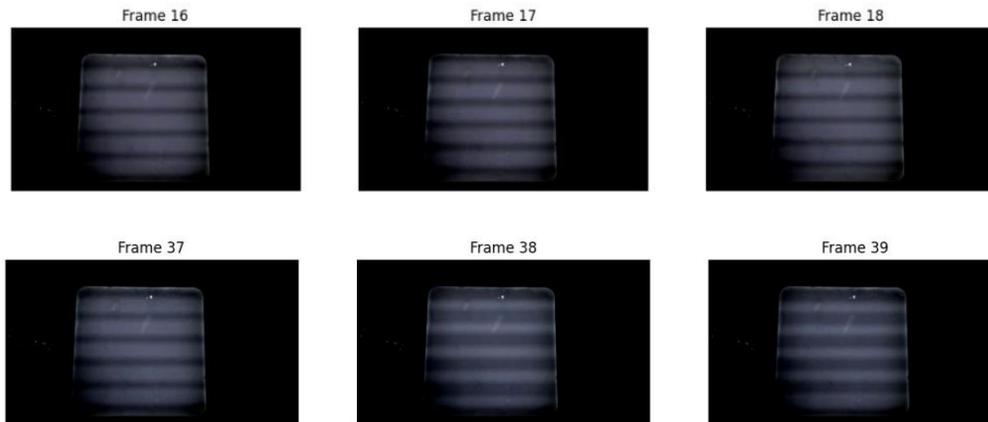
Antes de realizar cualquier comparación, cada fotograma se suaviza usando un filtro Gaussiano para reducir el ruido y mejorar la precisión del análisis. Luego, la correlación de Pearson se calcula entre los valores de los píxeles en la ROI de los fotogramas actuales y los siguientes, considerando cada canal de color (rojo, verde y azul) por separado. Este análisis de correlación ayuda a determinar la similitud o variación entre los fotogramas dentro de la ROI seleccionada.

El resultado de estas correlaciones se promedia y se interpreta en un sistema binario, donde diferentes rangos de valores de correlación se asocian a distintos símbolos binarios. Estos símbolos representan los datos que se están transmitiendo a través de los cambios en la imagen. La salida de este análisis incluye tanto la correlación numérica como el símbolo binario interpretado, que se imprime en la consola para cada par de fotogramas analizados. La correlación de Pearson mide la relación lineal entre dos conjuntos de datos, y su valor oscila entre -1 y 1, identificando el símbolo transmitido basado en el valor de correlación PCC, utilizando los siguientes umbrales:

- 11 si $PCC > 0.7$
- 10 si $0 < PCC \leq 0.65$
- 01 si $-0.65 \leq PCC \leq 0$
- 00 si $PCC < -0.7$

Figura 3.6

Demostración de fotogramas seleccionados en la transmisión y su distribución por fotogramas.



Nota. Se muestra en la figura, la comparación de cada uno de los fotogramas debido a la aplicación del modelo estadístico para hallar la correlación de Pearson para su validación.

El programa finaliza mostrando la cantidad total de fotogramas procesados y las correlaciones calculadas, así como los símbolos interpretados para cada bloque de fotogramas. Esta implementación es útil en entornos donde se necesita analizar la consistencia o variabilidad de información codificada en un video, como en comunicaciones ópticas o análisis de secuencias de video. La visualización de las correlaciones también facilita la comprensión de cómo cambia la información a medida que se avanza en el video, permitiendo una evaluación detallada del rendimiento del sistema.

3.6 Diseño de interfaz para visualización de datos

Se presenta un interfaz de usuario el cual permite interactuar de manera intuitiva con un sistema de transmisión de datos visuales, proporcionando una interfaz clara y funcional tanto para controlar el panel LED como para manejar la grabación y el almacenamiento del video resultante. La estructura del conjunto, combinando Flask y una interfaz web moderna, asegura una experiencia de usuario fluida.

3.6.1 Parte lógica: Backend

El Backend de la aplicación para la transmisión de símbolos mediante un panel LED controlado por una Raspberry Pi se implementa utilizando el framework Flask y se centra en varias funciones críticas. La función *“transmit_symbols”* realiza la conversión de los datos de entrada en símbolos binarios y su transmisión a través del panel LED. Esta función emplea una técnica de asignación de frecuencias específica basada en la correlación de Pearson para garantizar una modulación libre de parpadeo. La correlación de Pearson evalúa la relación entre los fotogramas consecutivos capturados por la cámara de la Raspberry Pi, asegurando que los símbolos sean transmitidos de manera clara y sin interferencias.

Durante la transmisión, se inicia un proceso ffmpeg que graba el video con rotación de 90 grados y conversión a escala de grises, lo que mejora la visualización de los símbolos. Este proceso se configura mediante la función *“subprocess.Popen”*, que ejecuta ffmpeg con parámetros específicos para manejar el formato de video, la resolución y las transformaciones de imagen necesarias. El video resultante puede guardarse localmente en la Raspberry Pi o descargarse a

través del navegador web, según la elección del usuario, lo cual se determina mediante la opción “*save_option*” en la función “*transmit*”.

La función “*control_led*” permite encender y apagar el panel LED, mientras que “*show_symbols*” convierte los datos de entrada en símbolos binarios utilizando la función “*generar_simbolos_binarios*”. Esta última función convierte cada carácter de los datos en su representación binaria y agrupa los bits en símbolos de longitud definida.

La ruta “*/transmit*” en Flask maneja la solicitud de inicio de transmisión, donde se reciben los datos de entrada, el valor de alfa el nombre del video y la opción de guardado. Después de validar estos datos, la función inicia el proceso de transmisión y grabación del video. La función “*stop_recording*” detiene la grabación cerrando el proceso ffmpeg y liberando los recursos asociados. Finalmente, la función “*download_video*” permite a los usuarios descargar el video grabado desde la ubicación especificada en el servidor.

En conjunto, estas funciones integran de manera funcional el hardware y el software, proporcionando una plataforma robusta para la transmisión y validación de datos a través de un sistema de comunicación óptica visible. Este enfoque combina la manipulación precisa del hardware GPIO de la Raspberry Pi con técnicas avanzadas de procesamiento de video y control de flujo de datos, asegurando que los símbolos transmitidos sean claros y fácilmente reconocibles en el video grabado. Esta arquitectura es esencial para el funcionamiento adecuado del sistema OCC, asegurando la integridad y precisión en la transmisión de datos.

3.6.2 Interfaz de usuario

La interfaz de la aplicación para la transmisión de símbolos mediante un panel LED controlado por una Raspberry Pi está diseñado con tecnologías web como HTML, CSS y JavaScript, proporcionando una interfaz de usuario intuitiva y funcional. Esta interfaz permite a los usuarios controlar la transmisión de datos y la grabación de videos de manera sencilla y eficiente. En la parte superior, el contenedor principal estructura todos los elementos de la interfaz, asegurando una alineación adecuada y accesibilidad.

El campo para "Datos para transmitir" permite ingresar la cadena de datos que se convertirá en símbolos binarios para la transmisión, el campo "Alpha" ajusta el valor de este parámetro, influenciando la frecuencia de transmisión, y el campo "Nombre del Video" permite especificar el nombre del archivo de video, facilitando su identificación. Los botones de control están diseñados para gestionar diversas operaciones: "Iniciar Transmisión" envía una solicitud al backend para comenzar la transmisión y grabación del video; "Detener Transmisión" detiene la grabación y oculta el indicador de grabación; "Mostrar Símbolos" genera y muestra los símbolos binarios correspondientes a los datos ingresados; y los botones "Encender LED" y "Apagar LED" controlan el estado del panel LED.

El indicador de grabación es una característica visual que informa al usuario cuando la grabación está en progreso, proporcionando retroalimentación instantánea. La sección de símbolos, que muestra una lista interactiva de los símbolos binarios generados, permite al usuario ver claramente qué símbolos se transmitirán. La funcionalidad del JavaScript es integral para gestionar las interacciones del usuario con la interfaz. Las funciones asociadas a los eventos de los

botones envían solicitudes AJAX al backend utilizando la API Fetch. Estas solicitudes manejan operaciones cruciales como inicio y detención de la transmisión, generación de símbolos y control del LED. Por ejemplo, la función de "Iniciar Transmisión" recopila los datos de los campos de entrada y envía una solicitud POST al backend para comenzar la transmisión, mostrando el indicador de grabación al recibir una respuesta exitosa. De manera análoga, la función "Detener Transmisión" envía una solicitud POST para finalizar la grabación y oculta el indicador una vez que se ha confirmado la detención.

La interfaz proporciona una experiencia de usuario cohesiva, facilitando la gestión de la transmisión OCC. La interfaz está diseñada para ser intuitiva, permitiendo a los usuarios manejar todas las operaciones necesarias de manera clara y directa. Los indicadores de estado y la visualización interactiva de los símbolos mejoran la usabilidad, asegurando que los usuarios puedan interactuar con el sistema sin complicaciones, proporcionando las herramientas necesarias para controlar y monitorear la transmisión y grabación de datos de manera efectiva.

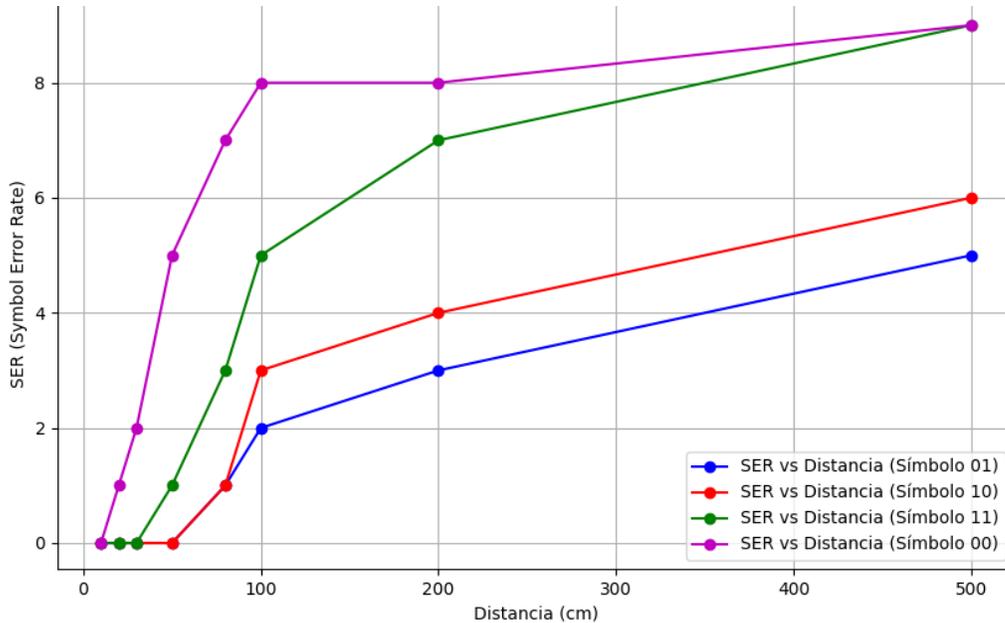
3.7 Pruebas de distancia y estabilidad de la señal

Para evaluar la eficacia del transmisor OCC y la precisión en la recepción de símbolos, se llevaron a cabo pruebas en condiciones de luminosidad tenue y en un dormitorio con luz artificial, a diferentes distancias: 10 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm, 80 cm, 100 cm, 200 cm y 500 cm. Las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 muestran los resultados de estas pruebas a las distintas distancias. Durante el experimento, se emitieron los símbolos correspondientes a las letras 'U' (símbolo "01"), 'O' (símbolo "00"), 'y' (símbolo "11") y 'a' (símbolo "10"). Cada símbolo fue transmitido 100 veces en cada una de las distancias especificadas. Para la validación de los símbolos emitidos, se emplea el

método de correlación de Pearson entre los fotogramas consecutivos de los videos grabados. El proceso de validación se lleva a cabo de la siguiente manera, donde se calcula los fotogramas consecutivos dentro de cada grupo de tres fotogramas lo cual equivaldría a 1200 frases por transmisión, correspondientes a cada símbolo emitido; se analizaron los valores de correlación obtenidos para determinar la estabilidad de la señal emitida y la precisión en la recepción de los símbolos, este procedimiento se realizó usando valores y graficas del rango de error por símbolo (SER), donde este muestra cuantos errores dentro de la trasmisión de símbolos con respecto a las distancias tomada dentro de la experimentación, por lo cual nos muestra los resultados en las figuras.

Figura 3.7

Gráfica lineal SER vs distancia con alfa=5

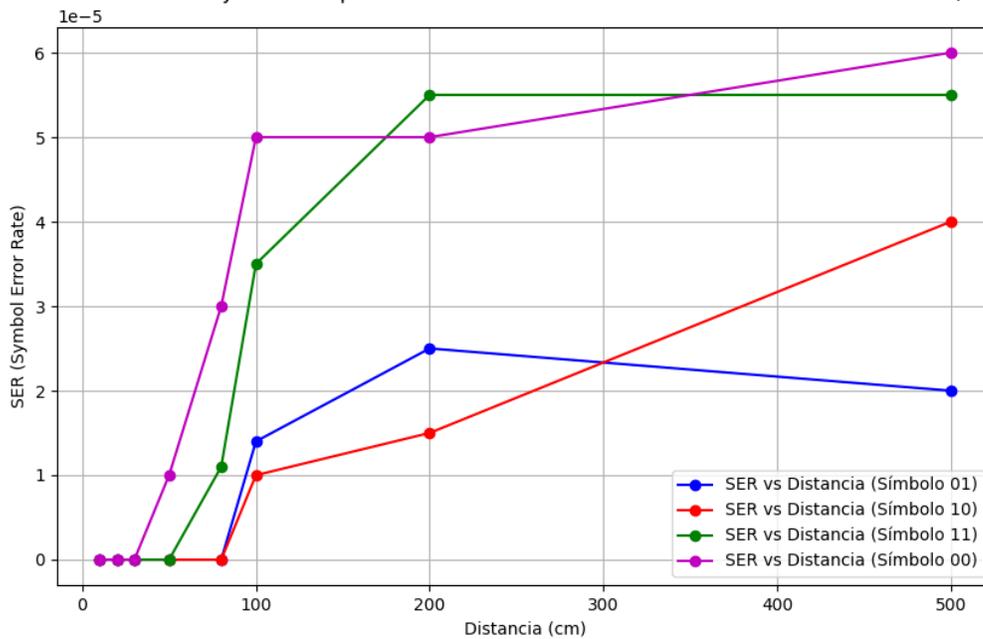


Nota. Se muestra la relación entre SER vs distancia para diferentes símbolos en el sistema de comunicación OCC con alfa igual a 5.

La figura 3.7 muestra una gráfica de SER vs distancia con un $\alpha=5$, a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta, se observa un incremento en el SER para todos los símbolos, siendo el símbolo "00" el más afectado con la tasa de error más alta desde distancias cortas, seguido por el símbolo "11". En contraste, los símbolos "01" y "10" muestran un menor incremento en el SER, con "01" siendo el más robusto frente a los errores. Esto sugiere que la elección de símbolos y la distancia son factores críticos en la eficiencia y fiabilidad de la comunicación OCC.

Figura 3.8

Gráfica lineal SER vs distancia con $\alpha=20$

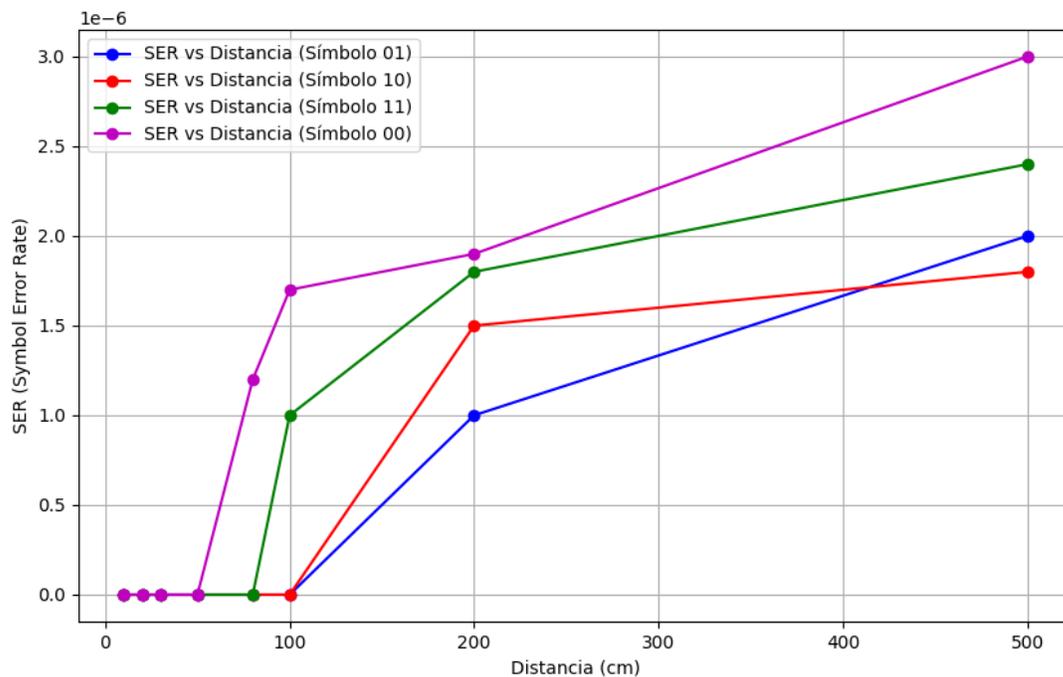


Nota. Se muestra la relación entre SER vs distancia para diferentes símbolos en el sistema de comunicación OCC con α igual a 20.

En la figura 3.8 se muestra la relación entre la Tasa de Error de Símbolo (SER) y la distancia en un sistema OCC para diferentes símbolos (01, 10, 11, 00), $\alpha=20$. Se observa que, al aumentar la distancia, el SER incrementa para todos los símbolos, siendo "00" y "11" los más afectados, con tasas de error significativamente mayores a partir de los 100 cm. El símbolo "01" presenta la menor tasa de error, mostrando robustez frente a la distancia, mientras que el símbolo "10" sigue un comportamiento intermedio. Esto sugiere que el sistema es más propenso a errores en la transmisión de ciertos símbolos cuando la distancia y alfa son elevados, lo que podría influir en la elección de estrategias para mejorar la veracidad de la comunicación a mayores distancias.

Figura 3.9

Gráfica lineal SER vs distancia con alfa=50



Nota. Se muestra la relación entre SER vs distancia para diferentes símbolos en el sistema de comunicación OCC con alfa igual a 50.

La figura 3.9 muestra la relación entre la Tasa de Error de Símbolo (SER) y la distancia en un sistema OCC para diferentes símbolos (01, 10, 11, 00), con $\alpha=50$. En esta configuración, se observa que el SER se incrementa con la distancia para todos los símbolos, siendo el símbolo "00" el que presenta la mayor tasa de error, seguido por el símbolo "11". A medida que la distancia aumenta, el SER para "00" crece de manera significativa, alcanzando el valor más alto en 500 cm.

El símbolo "01" mantiene la tasa de error más baja a lo largo de todas las distancias, lo que sugiere su mayor robustez en la transmisión. El símbolo "10" presenta un comportamiento intermedio. Este análisis indica que la tecnología OCC es sensible a la distancia y al parámetro alfa, y que ciertos símbolos, especialmente "00", son más propensos a errores en estas condiciones, lo que debe considerarse en el diseño para mejorar su autenticidad.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

El trabajo desarrollado es importante para el avance en la tecnología OCC, abordando de manera efectiva la problemática. Mediante la implementación de un transmisor LED controlado por PWM y un receptor basado en cámara, se logró mejorar la fiabilidad y precisión de la transmisión de datos, superando las limitaciones de sistemas OCC previos. La optimización de la modulación y validación de símbolos binarios demostró ser fundamental para la utilidad de esta herramienta innovadora.

4.1 Conclusiones

- Se abordaron desafíos técnicos clave, como la correcta modulación y demodulación de símbolos binarios ('11', '10', '01', '00') mediante configuraciones específicas de ciclo de trabajo y frecuencia, asegurando un contraste perceptual claro para su correcta identificación. Se implementaron ajustes precisos en la configuración del ciclo de trabajo para maximizar una mejor recepción, especialmente en la validación de los símbolos '11' y '00'.
- Se optimizó la duración de la transmisión de cada símbolo para garantizar que la variación de la intensidad luminosa fuera capturada eficazmente por la cámara receptora. Se exploraron múltiples configuraciones para asegurar que todos los fotogramas fueran procesados correctamente, utilizando técnicas estadísticas como la correlación de Pearson para la identificación de los símbolos transmitidos. Este desarrollo incluyó un análisis detallado del impacto de la modulación en la tasa de transmisión y la integridad del sistema, abordando además cómo las condiciones ambientales y las configuraciones de

hardware afectan la precisión en la transmisión de datos, dicho sistema fue probado y ajustado iterativamente, asegurando que tanto el transmisor como el receptor operaran en armonía para una transmisión de datos robusta y precisa, estableciendo una base sólida para la investigación futura en OCC.

- Las tres gráficas analizadas revelan que en un sistema de comunicación OCC, SER aumenta consistentemente con la distancia, y esta tendencia se intensifica al incrementar el parámetro de modulación α . Específicamente, los símbolos "00" y "11" son los más susceptibles a errores, mostrando mayores tasas de error a distancias crecientes y con valores más altos de α , lo que subraya su vulnerabilidad en la transmisión. Por otro lado, el símbolo "01" demuestra una mayor robustez, manteniendo la menor tasa de error en todos los escenarios evaluados. Estos resultados sugieren que, para mejorar la fiabilidad, es determinante para optimizar la selección de símbolos y ajustar cuidadosamente el parámetro α en función de la distancia, priorizando aquellos símbolos menos propensos a errores para aplicaciones que requieran alta precisión en la transmisión de datos.

4.2 Recomendaciones

- Invertir en tira LEDs de alta calidad, difusores y cámaras con mejores capacidades de captura de luz y sensibilidad de estas, con el fin que puedan mejorar la precisión del sistema. Además, se sugiere experimentar con diferentes tipos de difusores y lentes para optimizar la transmisión y recepción de la señal óptica.
- Desarrollar un sistema de calibración automática para ajustar dinámicamente el ROI y los parámetros de captura según las condiciones de luz ambiental, esto puede mejorar la

robustez en entornos variables, asegurando que la calidad de la señal se mantenga constante.

- Realizar pruebas en diferentes entornos reales y bajo condiciones variables, como exteriores con luz natural o interiores con iluminación artificial variada e intensa, para evaluar el rendimiento del sistema OCC en condiciones diversas.
- Integrar un sistema de corrección de errores (ECC) en el protocolo de transmisión OCC, esto puede ser especialmente útil para mejorar la veracidad de la transmisión en condiciones de ruido o cuando la distancia es un factor crítico, reduciendo así el impacto de posibles errores de transmisión.

Referencias

- Chavez, P., Rabadan, J., Guerra, V., & Perez, R. (2021). Flickering-Free Distance-Independent Modulation Scheme for OCC. *Electronics* .
- Chen, L., Liu, Y., & Wang, J. (2020). PWM-based optical camera communication: Principles and applications. *IEEE Communications Magazine*, 56-61.
- Fan, R., Zhang, Y., & Huang, H. (2020). Advanced signal processing for optical camera communication: Techniques and challenges. *IEEE Transactions on Communications*, 3006-3019.
- Guan, C., & Wang, L. (2021). Optical camera communication: Principles and applications. *Optics Express*, 4567-4580.
- Luo, J., Huang, Z., & Yang, Y. (2019). Optical camera communications: Opportunities and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 66-71.
- Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P., & Mohapatra, P. (2019). Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2047-2077.
- Wu, X., Liu, Y., & Jiang, Z. (2022). LED-based optical camera communication: A review of basic concepts, recent advances, and future directions. *IEEE Access*, 59807-59819.
- Yang, Z., Fan, W., & Wang, S. (2020). Optical camera communication: State-of-the-art and future directions. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021-2038.
- Zhuang, Y. Y. (2021). Applications of optical camera communication in intelligent transportation systems. *Sensors*, 487.

ANEXOS A: FIGURAS

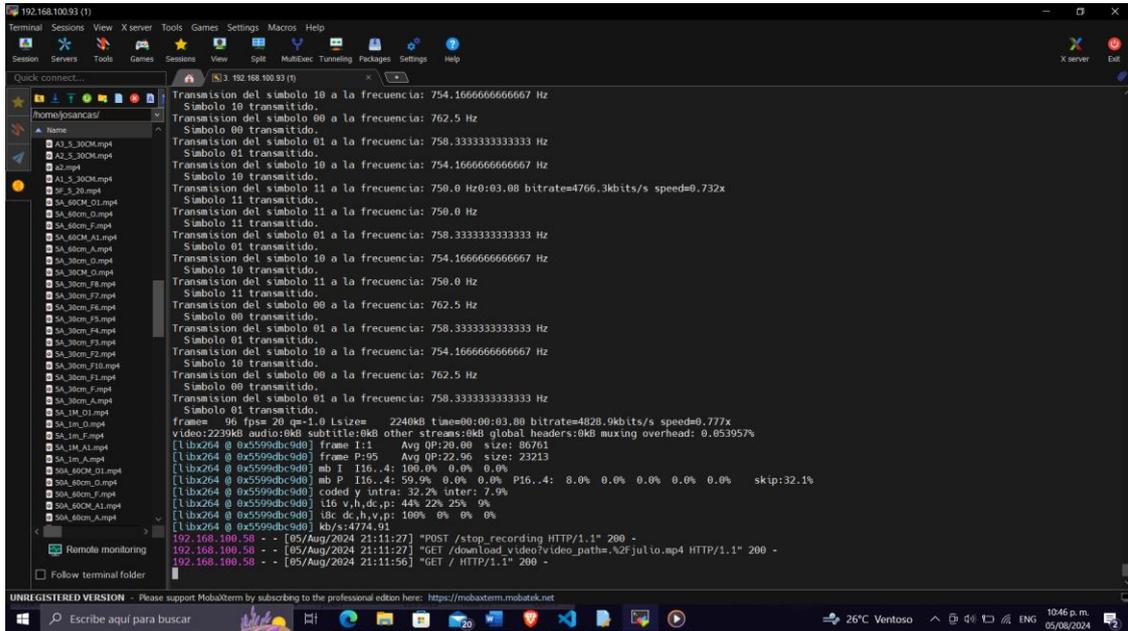


Figura 1. Interfaz de codificación remota hacia la RPI4 por medio de MOBAXTERM

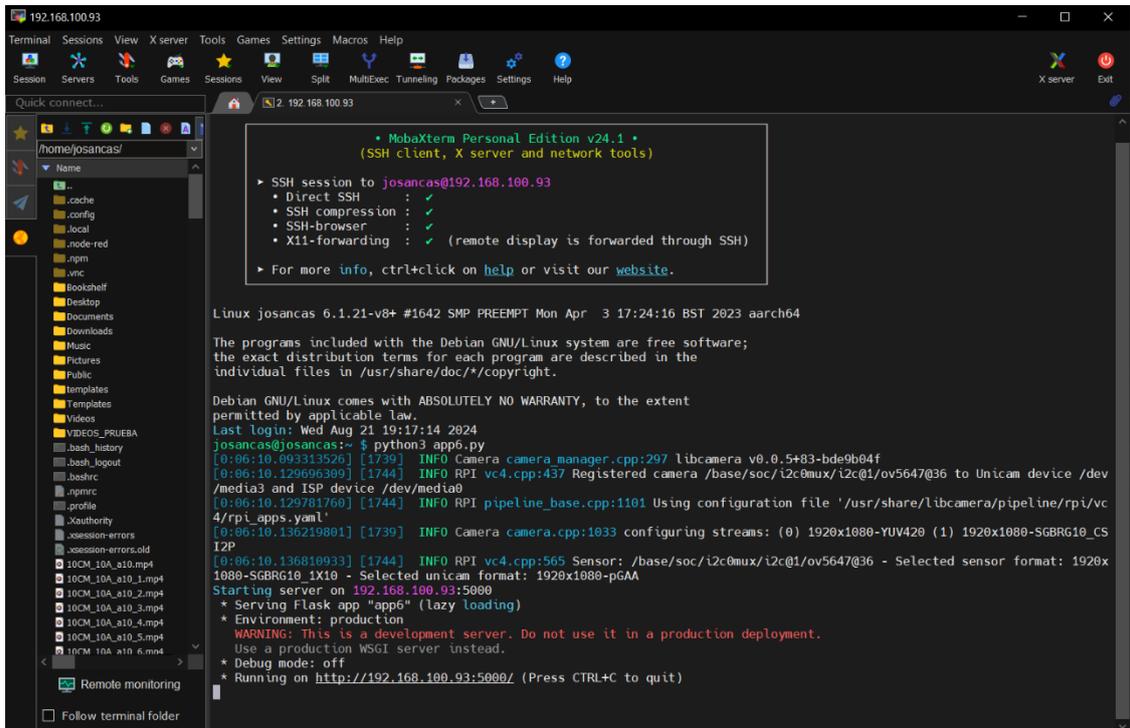


Figura 2. Interfaz de iniciación remota del servidor del interfaz de usuario hacia la RPI4 por medio de MOBAXTERM.

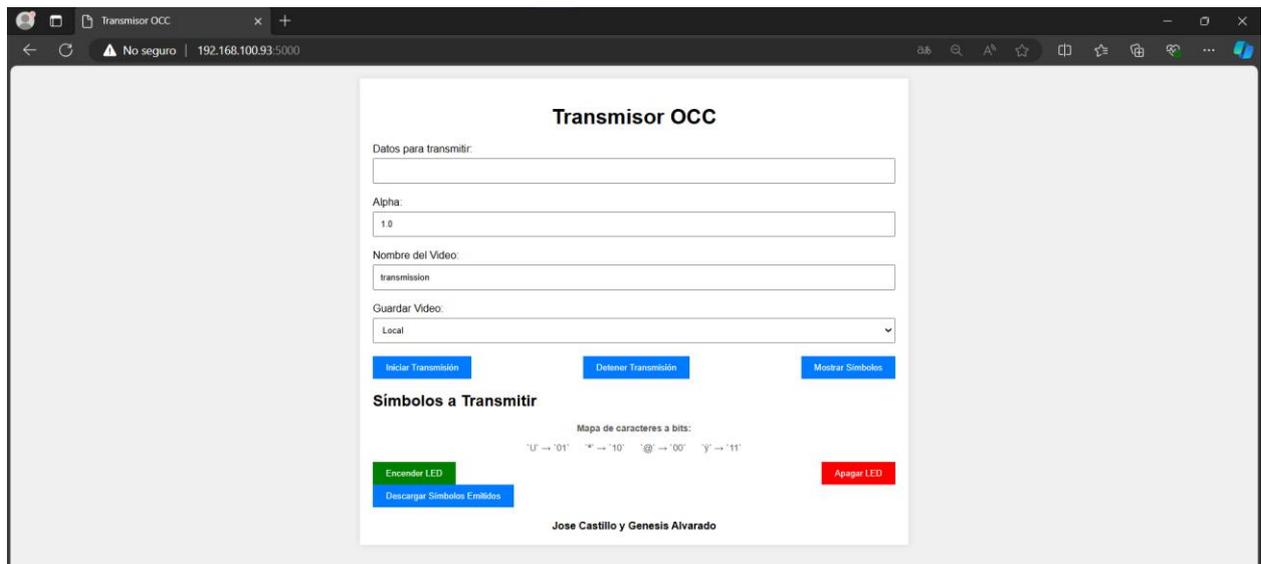


Figura 3. Interfaz de usuario



Figura 4. Toma de muestras del trasmisor OCC a 30cm.



Figura 5. Toma de muestras del trasmisor OCC a 1 metro.

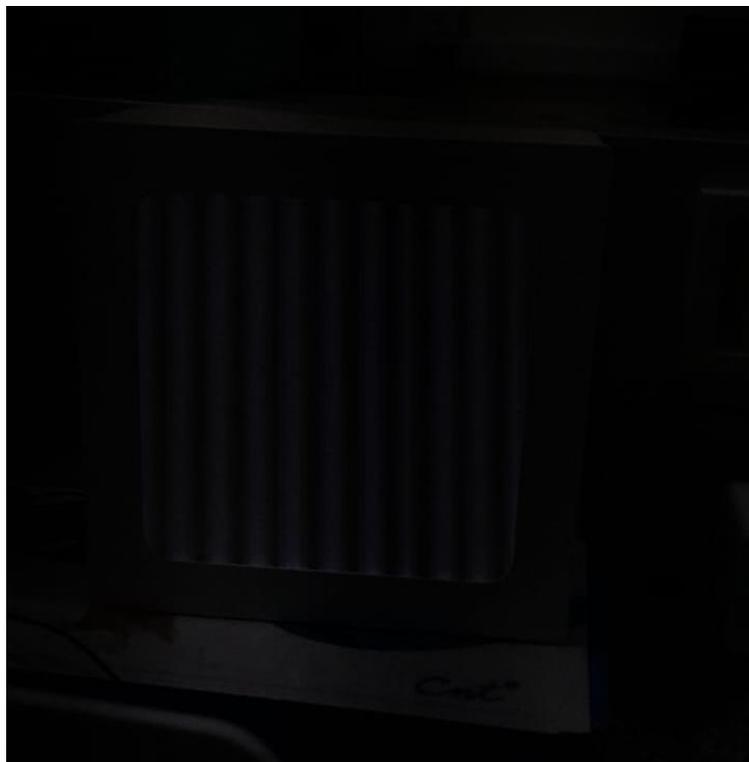


Figura 6. Trasmisión de símbolos transmitidos a 30 alfa a una distancia de 30 cm.



Figura 7. Medición de pruebas con el prototipo final.



Figura 8. Trasmisión de símbolos con el prototipo final.

ANEXOS B: CÓDIGOS

Códigos del Proyecto en github:

<https://github.com/JANETHTAGLE/TRANSMISOR-PARA-SISTEMA-OCC.git>