



**Institución Universitaria**

**Sistema de Comunicación por Luz Visible para el Posicionamiento en Interiores Basado en Esquemas de Modulación o Multiplexación**

**Roger Alexander Martínez Ciro**

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ingenierías  
Medellín, Colombia  
2023



# Sistema de Comunicación por Luz Visible para el Posicionamiento en Interiores Basado en Esquemas de Modulación o Multiplexación

**Roger Alexander Martínez Ciro**

Magister en Automatización y Control Industrial

Ingeniero en Telecomunicaciones

Tesis doctoral presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Doctor en Ingeniería**

Directores:

Ph.D., Francisco Eugenio López Giraldo

Ph.D., José Martín Luna Rivera

Línea de Investigación:

Visión Artificial y Fotónica

Grupo de Investigación:

Automática Electrónica y Ciencias Computacionales

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2023



## Dedicatoria

**A mis padres Marta Ciro Sanchez y Ramiro Martínez Ciro,**

por que siempre han estado ahí para amarme y apoyarme incondicionalmente. Gracias de corazón MAMÁ Y PAPÁ.

**A mi amada esposa Diana Morales e Hija Salomé,**

por su amor y comprensión, por apoyarme en los momentos más difíciles, por equilibrar mi vida. Gracias amores de mi vida.

**A mi tía Margarita Martínez Ciro y profesora Nubia Amparo Giraldo García,**

por ser las personas que marcaron mi vida con su amor y carisma, por ser parte de mi crecimiento personal y profesional, porque siempre creyeron en mí, por estar siempre dispuestas a brindar lo mejor de su corazón al servicio de las personas que están dispuestas a seguir luchando por sus sueños. Estaré eternamente agradecido.

El hombre encuentra a Dios detrás de cada puerta que la ciencia logra abrir.

(Albert Einstein)

# Agradecimientos

Este logro lo dedico primero a Dios, porque estoy convencido que es el actor más importante antes, ahora y después de mis días en este plano terrenal.

Profundamente agradecido con mis directores de tesis, el Ph.D., Francisco Eugenio López Giraldo y el Ph.D., José Martín Luna Rivera, por su tiempo y dedicación en mi formación como investigador. Eternamente agradecido por brindarme las herramientas necesarias para culminar con éxito este nuevo peldaño en mi formación profesional.

Gracias a la Ph.Dra., Atzyri Magaly Ramírez Aguilera por su colaboración y contribución en el análisis del sistema VLP. Gracias por la gestión y acompañamiento durante la pasantía de investigación realizada en la Universidad Autónoma de Zacatecas - México.

Al profesor Andrés Felipe Betancur por sus consejos y reflexiones en aspectos de investigación y el diario vivir.

Al jurado evaluador, gracias por el tiempo dedicado en la revisión del documento y las sugerencias en pro de construir un mejor trabajo escrito.

A la MSc., Danny Urrego Cárdenas, coordinadora del área de curaduría del Museo de Ciencias Naturales de La Salle del ITM, por facilitar la caracterización del Museo.

A todos mis compañeros y amigos del ITM y del departamento de Electrónica y Telecomunicaciones por su constante aliento y apoyo en mi viaje por este mar de conocimiento. Y como no, a todos mis profesores de los cursos de doctorado, a los que aprecio y admiro.

Por último y no siendo menos importante, GRACIAS a mi familia por el apoyo incondicional en mi formación profesional y personal.

# Resumen

En los últimos años, los sistemas de posicionamiento a nivel de interiores basados en la tecnología de comunicación por luz visible usando diodos emisores de luz (LED - light emitting diodes) blanca (W - white) están siendo ampliamente estudiados en la literatura. Esta tecnología se llama posicionamiento por luz visible (VLP - visible light positioning) y se presenta como una alternativa para los sistemas de navegación en tiempo real a la vez que presta el servicio de iluminación y comunicación. El propósito de VLP es añadir a los LEDs blancos (WLEDs) la capacidad de transmitir señales útiles para el sistema de localización, con el fin de proporcionar servicios basados en la ubicación sin que la lámpara pierda su función principal de iluminación. Uno de los principales retos de la tecnología VLP se relaciona con la adaptación efectiva de esquemas de modulación o multiplexación en función de las características del canal óptico y el escenario de aplicación. Adicionalmente, se evidencia la necesidad de proponer una arquitectura multi-celda que contribuya al equilibrio entre los indicadores de desempeño y la confiabilidad en la transmisión de los datos a través del medio compartido. Por tanto, en esta tesis se desarrolla una arquitectura VLP multi-celda mediante la adaptación de un esquema de multiplexación al modelo del canal VLC, considerando las características de un escenario real. Con este fin, se consideró un modelo de canal VLC que incluye componentes de línea de vista y sin línea de vista. Adicionalmente, se realizó un estudio sobre los grados de libertad y los efectos sobre los indicadores de desempeño del sistema VLP, tales como precisión, interferencia, complejidad, robustez, escalabilidad, energía, latencia y costo. Se sugiere un análisis matemático para el modelo de canal VLP empleando diferentes longitudes de onda y se adoptan las técnicas de transmisión de identificadores con señales portadoras mono tono y el algoritmo de trilateración para el problema de localización en una red VLP con múltiples celdas. Este sistema combina las funciones de un esquema de multiplexación por división de frecuencia para los transmisores ópticos y la técnica de intensidad de la señal recibida para estimar las distancias entre el transmisor y el receptor de luz visible.

Se realizaron diferentes simulaciones Monte Carlo de la arquitectura VLP propuesta donde se evaluaron sus grados de libertad y el impacto sobre los indicadores de desempeño. Se validó el sistema VLP multi-celda con un experimento en un entorno de laboratorio con características particulares del museo del Instituto Tecnológico Metropolitano. Se propone un análisis de los indicadores de desempeño del sistema VLP y la confiabilidad en la transmisión de los datos del sistema VLC a través del medio compartido. En síntesis, el sistema VLP multi-celda presenta un impacto positivo y equilibrado en la mayoría de los indicadores de desempeño y muestra flexibilidad para ser desplegado en diferentes escenarios prácticos.

**Palabras clave:** Comunicación por luz visible, Posicionamiento por luz visible, Diodo emisor de luz, Comunicación óptica inalámbrica, Localización en interiores.

# Abstract

In recent years, indoor positioning technology based on visible light communication (VLC) system using white light emitting diodes (WLEDs) have been widely studied in the literature. This technology is called visible light communication (VLP) and is presented as an alternative to real-time navigation systems while providing lighting and communication services. The main objective of visible light positioning (VLP) is computation of location coordinates of an optical receiver with the purpose of providing location based services when the illumination standard is still met. The effective use of modulation or multiplexing schemes considering the characteristics of the optical channel and the application scenario, are a challenge in VLP. Additionally, the need to propose a multi-cell architecture is evident, where the balance between the performance indicators and the reliability in data transmission of the VLC system through the shared medium is also considered. In this PhD thesis a multi-cell VLP architecture is developed where a multiplexing scheme adapted to the VLC channel and the characteristics of a real scenario is considered. To this end, a VLC channel model including line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) components was considered. In addition, a study on the degrees of freedom of the VLP system and the effects on performance indicators such as accuracy, interference, complexity, robustness, scalability, energy, latency and cost, is suggested. A mathematical analysis is proposed for the VLP channel model using different wavelengths and the radio frequency carrier allocation technique is adopted with the trilateration algorithm. This system combines the functions of a frequency division multiplexing (FDM) scheme at the optical transmitters and a received signal strength (RSS) technique to estimate the Euclidean distances between transmitter and visible light sensor.

Monte Carlo simulations are performed to evaluate the error performance of the proposed VLP system in a multi-cell scenario. Subsequently, the VLP system was validated by an experimental design where the characteristics of a real scenario were considered. Then, the analysis of the performance indicators of the VLP system and the reliability of the VLC system is proposed. In conclusion, the multi-cell VLP system presents a positive and balanced impact on most performance indicators and shows flexibility to be deployed in different practical scenarios.

**Keywords:** Visible light communication, Visible light positioning, Light emitting diode, Light positioning, Optical wireless communication, Indoor localization.

# Contenido

<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Sistema de Posicionamiento a Nivel de Interiores (IPS)	2
1.1.1 Posicionamiento en Interiores basado en Radiofrecuencia y Comunicación Óptica	3
1.1.2 Escenarios de Aplicación	4
1.1.3 Posicionamiento en Interiores Basado en Comunicación por Luz Visible	5
1.1.4 Desafíos del Posicionamiento por Luz Visible	6
1.2 Motivación	8
1.3 Hipótesis	9
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo General	9
1.4.2 Objetivos Específicos	9
1.5 Contribuciones	9
1.6 Contenido de la Tesis	13
<b>2 Estado del Arte del Posicionamiento en Interiores Basado en Luz Visible (VLP)</b>	<b>14</b>
2.1 Estándar para el VLP	15
2.2 Arquitectura	15
2.2.1 Multiplexación por División de Tiempo	17
2.2.2 Multiplexación por División de Frecuencia	17
2.2.3 Multiplexación por División de Longitud de Onda	18
2.2.4 Modelo de Canal para VLP	18
2.2.5 Análisis Comparativo del Estado del Arte	18
<b>3 Marco Teórico</b>	<b>20</b>
3.1 Sistema de Comunicación por Luz Visible	20
3.2 Modelo del Sistema VLP Basado en Trilateración	23
<b>4 Sistema VLP Multi-Celda Basado en Diodos Emisores de Luz Multicolor y Multiplexación por División de Frecuencia</b>	<b>26</b>
4.1 Caracterización del Museo de Ciencias Naturales de La Salle	26

4.2	Modelo del Sistema VLP . . . . .	29
4.2.1	Protocolo de Transmisión . . . . .	31
4.2.2	Receptor Óptico . . . . .	33
4.2.3	Proceso de Localización . . . . .	34
4.3	Resultados y Discusión . . . . .	36
4.3.1	Análisis de la Precisión . . . . .	39
4.4	Conclusiones . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Demostración Experimental del Sistema VLP Basado en LEDs Multicolor</b>	<b>42</b>
5.1	Diseño Experimental . . . . .	42
5.1.1	Diseño y Caracterización del Transmisor VLP . . . . .	43
5.1.2	Linealizar la Respuesta Electro-óptica del LED Multicolor . . . . .	45
5.1.3	Estimar la Longitud de Onda Pico del LED Multicolor . . . . .	46
5.1.4	Estimación y Ajuste del Punto Cromático Generado por el Transmisor VLP . . . . .	46
5.1.5	Calibración del Sensor RGB . . . . .	47
5.2	Diseño del Receptor VLP . . . . .	48
5.3	Resultados Experimentales . . . . .	48
5.3.1	Validación del Sistema VLP . . . . .	56
5.4	Conclusiones . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Desempeño del sistema VLP</b>	<b>62</b>
6.1	Indicadores de Desempeño . . . . .	62
6.1.1	Precisión . . . . .	63
6.1.2	Interferencia Entre Celdas . . . . .	63
6.1.3	Complejidad . . . . .	64
6.1.4	Robustez . . . . .	64
6.1.5	Escalabilidad . . . . .	65
6.1.6	Energía . . . . .	65
6.1.7	Tiempo de Latencia . . . . .	66
6.1.8	Costo . . . . .	67
6.2	Confiabilidad del Sistema VLC . . . . .	67
6.2.1	Velocidad de bits o símbolos: . . . . .	67
6.2.2	Probabilidad de Error: . . . . .	68
6.2.3	Análisis de la Confiabilidad del Sistema VLC . . . . .	68
6.3	Grados de Libertad del Sistema VLP Basado en LEDs Multicolor . . . . .	68
6.3.1	Cromaticidad . . . . .	68
6.3.2	Temperatura del Color . . . . .	69
6.3.3	Transmisión de Señales Portadoras por Canales Independientes R, G o B . . . . .	69

6.4 Conclusiones . . . . .	69
<b>7 Conclusiones y Líneas Futuras</b>	<b>71</b>
7.1 Conclusiones . . . . .	71
7.2 Líneas Futuras . . . . .	72
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>

# Lista de Figuras

2-1	Evolución del número de artículos por año según análisis realizado en la plataforma Scopus. Ecuación de búsqueda “light and indoor and positioning” . . .	14
3-1	Geometría del modelo de propagación del canal VLC. . . . .	21
3-2	Arquitectura y modelo geométrico de un sistema VLP basado en tres LEDs de luz blanca. . . . .	23
4-1	Espacios del museo del ITM. . . . .	27
4-2	Arquitectura multi-celda del sistema VLP basado en LEDs. . . . .	29
4-3	Método propuesto para el sistema VLP basado en LEDs RGB. . . . .	30
4-4	Espacio cromático de un LED RGB según el CIE 1931. . . . .	31
4-5	PSD del vector de potencia óptica recibido por el sensor de luz para el sistema VLP basado en LEDs RGB. . . . .	35
4-6	Puntos cromáticos en el espacio CIE 1931 para explorar en el sistema VLP basado en LEDs RGB. . . . .	36
4-7	Error de posición para los puntos cromáticos $p_1$ a $p_4$ . . . . .	38
4-8	Error de posición para los puntos cromáticos $p_5$ a $p_7$ . . . . .	39
5-1	Esquema general del sistema experimental. . . . .	42
5-2	Diagrama de bloques del transmisor VLP. . . . .	44
5-3	Procedimiento para estimar el ancho de banda del transmisor VLP. . . . .	45
5-4	Estimación del espectro óptico generado por el LED RGB. . . . .	46
5-5	Estimación y ajuste del punto cromático generado por el LED RGB. . . . .	47
5-6	Método para calibrar el sensor e identificar la matriz de ganancia óptica para las señales generadas por los canales RGB. . . . .	47
5-7	Despliegue de hardware del sistema VLP en el laboratorio del ITM. . . . .	49
5-8	Circuito electrónico para el transmisor VLP y modelo en 3D de la placa electrónica. . . . .	52
5-9	Transmisor VLP. a) Tarjeta del transmisor VLP fabricada. b) LED RGB con disipador de calor en luminaria LED genérica. . . . .	52
5-10	Respuesta en frecuencia del transmisor VLP. . . . .	53
5-11	Respuesta electro-óptica del LED RGB. . . . .	53
5-12	Montaje experimental para medir y ajustar la cromaticidad del transmisor VLP. . . . .	54
5-13	Puntos cromáticos en el espacio CIE 1931 emitidos por el LED RGB. . . . .	55

---

<b>5-14</b>	Flujograma del algoritmo VLP implementado en Matlab. . . . .	57
<b>5-15</b>	Error de localización del sistema VLC. a) simulación del punto cromático P7 y b) demostración experimental. . . . .	58
<b>5-16</b>	Transformada de Fourier y espectrograma de la señal eléctrica generada por el sensor de luz Thorlabs considerando fuentes de luz externas al transmisor VLC. . . . .	59
<b>5-17</b>	Error de localización del sistema VLP simulado y experimental con y sin fuentes de luz externa. . . . .	60
<b>6-1</b>	Corriente de polarización demandada por cada canal del LED RGB según el punto cromático. . . . .	66

# Lista de Tablas

<b>2-1</b>	Comparación entre algunos sistemas VLP propuestos en la literatura. . . . .	19
<b>4-1</b>	Coordenadas cromáticas y vector de potencia óptica normalizada. . . . .	37
<b>4-2</b>	Parámetros de simulación. . . . .	37
<b>5-1</b>	Coordenadas para cada LED RGB y frecuencia de la portadora. . . . .	43
<b>5-2</b>	Análisis de artículos VLP como apoyo al diseño del driver del LED RGB. . .	50
<b>5-3</b>	Corriente de polarización del LED RGB y puntos cromáticos en el espacio CIE 1931. . . . .	56
<b>5-4</b>	Coordenadas del receptor VLP para cada punto de prueba. . . . .	57
<b>6-1</b>	Identificación de indicadores de desempeño para el sistema VLP. . . . .	62

# Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>AOA</i>	Angle of arrival
<i>AWGN</i>	Additive white Gaussian noise
<i>BW</i>	Bandwidth
<i>CSK</i>	Color shift keying
<i>FFT</i>	Fast Fourier transform
<i>FDM</i>	Frequency division multiplexing
<i>GPS</i>	Global positioning system
<i>IM – DD</i>	Intensity modulation and direct detection
<i>IPS</i>	Indoor positioning system
<i>LOS</i>	Line-of-sight
<i>NLOS</i>	Non line-of-sight
<i>OOK</i>	On off keying
<i>OWC</i>	Optical wireless communication
<i>PD</i>	Photodiode
<i>PSD</i>	Power spectrum density
<i>QPSK</i>	Quadrature phase shift keying
<i>RSS</i>	Received signal strength
<i>RSSI</i>	Received signal strength indication
<i>RSSR</i>	Received signal strength ratio
<i>RF</i>	Radio frequency
<i>RFID</i>	Radio frequency identification
<i>RGBLED</i>	Red, green, blue LED
<i>TDM</i>	Time division multiplexing
<i>TOA</i>	Time of arrival
<i>TDOA</i>	Time difference of arrival
<i>UWB</i>	Ultra wideband
<i>VLC</i>	Visible light communication
<i>VLP</i>	Visible light positioning
<i>WLED</i>	White light emitting diode
<i>WDM</i>	Wavelength division multiplexing
<i>WLAN</i>	Wireless local area network
<i>WiFi</i>	Wireless fidelity

# 1 Introducción

El continuo crecimiento de aplicaciones basadas en servicios de posicionamiento a nivel de interiores (IPS - indoor positioning system), está siendo revolucionado por las tecnologías de comunicaciones inalámbricas. Actualmente existen múltiples tecnologías como infrarrojo, radiofrecuencia y luz visible, que han sido exploradas en el diseño de sistemas IPS y que han proporcionado nuevas líneas de trabajo a nivel de investigación [1, 2]. Entre ellas, la tecnología de comunicación por luz visible (VLC - visible light communication) es una de las más prometedoras en el diseño de sistemas IPS debido principalmente al alto desempeño que ofrece en la precisión de localización y la posibilidad de reutilizar la infraestructura de luminarias existentes en el espacio de trabajo. Dicha línea de investigación recibe el nombre de posicionamiento por luz visible (VLP - visible light positioning). La mayoría de luminarias están conformadas por diodos emisores de luz (LED - light emitting diode) blanca (W - white) que se están convirtiendo en la iluminación del futuro. Esta ofrece alta eficiencia energética, bajo costo y ancho de banda suficiente para aplicaciones de comunicación, que convierten al WLED en un candidato potencial para ser explorado en aplicaciones VLC [3]. En consecuencia, el propósito de VLP es añadir a los WLED la capacidad de transmitir información útil para el problema de posicionamiento, sin perder su funcionalidad básica como sistema de iluminación.

Algunos inconvenientes de la tecnología VLP basada en WLEDs se relacionan con el diseño de arquitecturas multi-celda, exploración cromática, grados de libertad, indicadores de desempeño y confiabilidad en la transmisión de datos. En la literatura se evidencia sistemas VLP con limitación en la exploración del espacio cromático y la manipulación de la temperatura del color generado por las luminarias WLEDs que podría ser de utilidad en escenarios de aplicación como los museos [4]. Adicionalmente, falta un mayor análisis en la caracterización del canal óptico en función de los grados de libertad disponibles del sistema de posicionamiento que posibiliten explorar esquemas de modulación o multiplexación de manera efectiva para el problema de posicionamiento en escenarios que exijan múltiples celdas [5, 6]. En consecuencia, plantear dicho estudio también impactaría el diseño de arquitecturas VLP con múltiples luminarias en escenarios que exijan grandes áreas de cobertura [7].

En este trabajo de tesis se propone una metodología que permite explorar arquitecturas VLP multi-celda basada en LEDs rojo, verde y azul (RGB - Red, Green, Blue) definido como VLP-McRGB. Esta arquitectura utiliza la técnica de multiplexación por división de

frecuencia y la densidad espectral de potencia que combinado con la técnica de detección de la intensidad de la señal recibida (RSS - received signal strength) y el algoritmo de trilateración permite la estimación de la posición del receptor óptico. Esto facilita la exploración del espacio cromático definido por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE - Commission internationale de l'Eclairage) CIE-1931 para la configuración del transmisor óptico de manera análoga al diseño de constelaciones de la modulación por color (CSK - color shift keying). Adicionalmente, la arquitectura VLP-McRGB es flexible y proporciona múltiples canales ópticos para la transmisión de las señales portadoras sin que se afecte el rendimiento del posicionamiento. Se propone un método para analizar el sistema propuesto el cual es evaluado por simulación Monte Carlo y validado mediante un diseño experimental. Los resultados del rendimiento del error de localización son analizados en función del grado de libertad de la cromaticidad y se proporciona un análisis sobre el impacto en los indicadores de desempeño y la confiabilidad en la transmisión de datos.

En este Capítulo se muestra una breve reseña al trabajo realizado en esta tesis. En la primera parte se introduce el concepto del sistema IPS basado en diferentes tecnologías inalámbricas de telecomunicaciones, haciendo énfasis en la tecnología VLP y su arquitectura, al igual que los escenarios de aplicación. Seguidamente se describen los desafíos de VLP y con ello la motivación para el desarrollo de este trabajo de investigación. Por último, se define la hipótesis, los objetivos, la contribución y el contenido de este documento.

## **1.1. Sistema de Posicionamiento a Nivel de Interiores (IPS)**

El IPS ha ganado gran popularidad en el campo de la investigación científica debido a su amplio campo de acción, lo cual generó un crecimiento exponencial de aplicaciones en servicios basados en localización [8,9]. El objetivo de IPS es estimar la posición espacial de un usuario mediante el uso de diferentes tecnologías de telecomunicaciones, permitiendo el surgimiento de sistemas de navegación en tiempo real y el monitoreo inteligente de personas o cosas en espacios de interiores. Para la estimación de parámetros útiles en el proceso de localización, la tecnología IPS utiliza algunas propiedades de los sistemas de comunicaciones inalámbricas, ya sea por radiofrecuencia (RF - radio frequency) o en el campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC - optical wireless communication). Dependiendo del sistema de comunicación empleado, el desempeño del IPS puede tener variaciones considerables. Es por ello que la literatura disponible para cada subsistema es amplia, por lo que en adelante se ofrece una introducción general a cada una de ellas.

### 1.1.1. Posicionamiento en Interiores basado en Radiofrecuencia y Comunicación Óptica

En esta Sección se mostrará de manera general el sistema IPS basado en la tecnología RF y OWC. En el posicionamiento basado en RF se ha explorado el canal de comunicación empleando tecnologías como ZigBee, Bluetooth, ultrasonido, UWB (ultra-wideband), RFID (radio frequency identification), WLAN (wireless local area network), y WiFi (Wireless fidelity) [5, 10, 11]. En un estudio presentado por Zhuang et al. [5], los autores concluyen que WiFi y Bluetooth son las tecnologías más utilizadas a nivel de IPS, ya que estas se han desarrollado más ampliamente en dispositivos inteligentes. En dicho estudio, también reportan que la precisión mediante Bluetooth está entre 2 m y 5 m mientras que para WiFi es de 1 m a 7 m. La arquitectura consta de antenas RF posicionadas en el techo de un salón en diferentes puntos específicos y un receptor RF que porta el usuario. Con el fin de aprovechar las características difusas del canal y de las ondas de radio, se ha propuesto técnicas que ayudan al procesamiento de las señales y la estimación de parámetros necesarios en el proceso de localización. Ellas dependen del tipo de algoritmo empleado para el posicionamiento, el cual puede ser registro de huella, trilateración, triangulación, proximidad, entre otros [12]. Por ejemplo, el registro de huella consiste en un mapeo de potencias RF para diferentes puntos de prueba, que sirven como patrón para estimar la posición de un usuario mediante la correlación entre dichas variables. Dicha técnica es funcional en escenarios bien definidos con baja componente difusa e interferencia electromagnética [5]. El algoritmo de trilateración hace uso principalmente de la geometría conformada entre los transmisores RF y el receptor. Los parámetros como posición del transmisor y la estimación de las distancias con el receptor, son una meta. Para ello, se ha reportado diferentes técnicas como AOA (angle of arrival), TOA (time of arrival), TDOA (time difference of arrival), RSS (received signal strength), RSSI (received signal strength indication) y RSSR (received signal strength ratio). Entre ellas, RSS presenta menor complejidad, ya que aprovecha las propiedades de la señal recibida, por lo que es el más utilizado en IPS [1, 5, 11–13].

Para OWC el sistema IPS ha sido estudiado considerando tecnologías en el infrarrojo cercano y la luz visible [8, 12]. Ambas tecnologías comparten la misma arquitectura de WiFi o Bluetooth [2], donde las técnicas AOA, TOA y RSS para la estimación de parámetros de la luz también son adoptadas. El algoritmo de proximidad o triangulación son muy útiles en la estimación de la posición puesto que aprovecha las propiedades de la luz. De acuerdo con el trabajo planteado por Gu et al. [11], el sistema de localización por infrarrojo ha sido estudiado profundamente en la literatura, ya que es una tecnología existente en diferentes dispositivos inalámbricos. Ellos indican que la arquitectura IPS basada en infrarrojo es fácilmente desplegable en diferentes escenarios. Adicionalmente es rápida de instalar y requiere un bajo mantenimiento. Sin embargo, el principal inconveniente que presenta es el requerimiento de hardware costoso [11]. Aunque el transmisor por infrarrojo es económico, no existe

infraestructura en los escenarios de trabajo que pueda ser reutilizable. Adicionalmente, el hardware para el receptor es complejo puesto que utiliza arreglos de cámaras que podrían ser conectadas en red [11].

Por otra parte, la comunicación por luz visible en sistemas de posicionamiento ofrece un mayor aprovechamiento de la infraestructura de luminarias existentes en diferentes escenarios de trabajo, al igual que posibilita la transmisión de datos garantizando el servicio de iluminación [14]. El avance en la construcción de diodos emisores de luz blanca ha sido el pilar sobre el cual se soporta el sistema VLC y esto ha impactado positivamente el surgimiento de múltiples aplicaciones como es el caso de VLP [2, 8] y la creación de empresas de base tecnológica [15]. En el año 2005 fue creada la compañía Oledcomm como un Spin Off en la Universidad de Versalles [16]. En la actualidad, esta empresa es líder en investigación y desarrollo tecnológico, con una variedad de hardware y software VLC comercial. Dicha compañía cuenta con una línea de trabajo en geolocalización orientada a museos y centros de exhibición. La tecnología IPS que ofrece la compañía Oledcomm considera el controlador (driver) para las lámparas y un receptor basado en la lectura de la cámara de una tableta o teléfono inteligente. La compañía no reporta casos exitosos donde realice aplicaciones de campo con la tecnología mencionada. Sin embargo, deja como referencia una aplicación IPS en el museo de “Le Grand Curtius” en la ciudad de Liège, Bélgica. De manera análoga, en el año 2012 el profesor Harald Hass fundó PureLiFi como un Spin-Off en la Universidad de Edimburgo [17]. Dicha empresa es pionera en investigación y desarrollo tecnológico de sistemas VLC en diferentes aplicaciones. Otras compañías como Signify, Interact y Acuity Brands cuentan con un amplio portafolio de servicios con la tecnología VLC aplicada a IPS, internet de alta velocidad, internet de las cosas (IoT - internet of things), ciudades y transporte inteligente [18, 19]. De manera específica, la compañía Interact ofrece una línea de tecnología IPS orientada al comercio, la cual ha denominado marketing basado en ubicación. En conclusión, el comercio de IPS permea un cúmulo amplio de aplicaciones, desde fábricas hasta espacios públicos como los museos. Tanto la tecnología RF como OWC pueden ser desplegadas para ofrecer el servicio de localización. Sin embargo, IPS basado en OWC podría ser ventajoso para ser implementado en los escenarios que proveen niveles de ruido electromagnético o posibiliten reutilizar la infraestructura de luminarias.

### **1.1.2. Escenarios de Aplicación**

El IPS es parte fundamental del ecosistema de monitoreo o navegación en tiempo real de personas, robots o sistemas de seguimiento. En la última década, la mayoría de los sistemas de posicionamiento comerciales se han desarrollado con tecnologías por radiofrecuencia [11, 20]. Por el contrario, las aplicaciones IPS basadas en luz visible aún se encuentran bajo pruebas de campo [12]. Por ejemplo, Philips inició en el año 2015 un proyecto piloto de posicionamiento con tecnología VLC en el supermercado Carrefour en Lille, Francia [21]. Dicho sistema per-

mite a los usuarios encontrar productos de interés, promociones y puntos estratégicos como salidas de emergencia. Otros escenarios de aplicación se relacionan con fábricas y logística, centros comerciales y supermercados, espacios públicos, oficinas, universidades, centros de salud, estaciones de transporte, teatros, centros de exhibición y museos [2, 5].

En las fábricas, los sistemas IPS permiten la localización de empleados, navegación de robots y monitoreo de almacenamiento de mercancía, incrementando los niveles de seguridad y gestión [22]. En los centros comerciales y supermercados, los sistemas IPS pueden proveer a los usuarios información actualizada de productos de interés, así como, permitir a las personas con discapacidad visual navegar a través del establecimiento [23]. Adicionalmente, los sistemas IPS pueden proporcionar analíticas en tiempo real (por ejemplo, puntos o productos más frecuentados) para la toma de decisiones estratégicas por parte de directivos. Esto crea un modelo de negocio orientado a la publicidad y manejo de descuentos y promociones personalizados. La compañía canadiense Mapsted fue fundada en el año 2014 y provee soluciones IPS con tecnología por radiofrecuencia empleando dispositivos móviles en un ecosistema de navegación en tiempo real orientado a centros comerciales y supermercados. Cuenta con más de 40 patentes tecnológicas y 55 patentes en proceso [24].

Por otra parte, en los espacios públicos como museos, teatros y estadios, localizar personas en tiempo real, permite brindar al usuario experiencias interactivas con el entorno [25]. La localización en museos ofrece experiencias interactivas a los visitantes con las diferentes obras de arte [24]. Adicionalmente, los usuarios pueden acceder a información de puntos estratégicos del lugar y navegar en tiempo real a través del espacio museográfico. En el Museo Louvre de París se ha reportado estudios sobre el monitoreo de visitantes utilizando la tecnología Bluetooth [26]. Dicha tecnología permite realizar la localización y seguimiento de un usuario. Esta información es almacenada en una base de datos para ser utilizada en estudios de trazabilidad del museo y estadísticas de los puntos de interés recorridos por los visitantes. Por ejemplo: rutas, tiempo de permanencia en cada parada, detección de cercanías a nodos específicos y densidad de visitantes en diferentes nodos. El trabajo presentado en [4] reporta un sistema de navegación autónomo para personas con discapacidad visual en el Museo de Ciencias Naturales de La Salle del ITM (Instituto Tecnológico Metropolitano) utilizando una aplicación móvil. Los autores emplearon tecnologías de localización y navegación tradicional como guías podotáctiles, auriculares de conducción ósea, detectores de obstáculos e identificadores de códigos de respuesta rápida (QR - quick response). Sin embargo, el experimento no reporta el uso de tecnologías inalámbricas para la aplicación de localización.

### **1.1.3. Posicionamiento en Interiores Basado en Comunicación por Luz Visible**

El sistema VLP ha ganado un amplio interés en la investigación y desarrollo tecnológico como una alternativa a los sistemas de posicionamiento tradicionales. Esta tecnología utiliza LEDs como fuente de transmisión e iluminación de manera paralela. En consecuencia, VLP

aprovecha la alta capacidad de comunicación de los LEDs al igual que ofrece un ancho de banda cercano a los 12 MHz, tiene alta eficiencia energética y son de bajo costo [27]. Como se explora el espectro visible (380 – 780 nm), el sistema VLP ofrece alta flexibilidad en el diseño del receptor de luz. En la literatura se ha sugerido algunos sensores ópticos para el diseño del receptor como el fotodiodo, panel solar y sensor de imagen [2, 5]. También, tecnologías auxiliares como sensores inerciales, sensores magnéticos, infrarrojo, acelerómetros, sistema de posicionamiento global (GPS - global positioning system), Wi-Fi y Bluetooth han sido propuestos en conjunto con receptores ópticos para mejorar la precisión del sistema de localización [1]. Aunque dicha práctica suma más elementos de hardware al receptor y requiere un mayor compromiso computacional para el algoritmo de posicionamiento. Algunos trabajos recientes en estado del arte, han hecho un esfuerzo por clasificar los sistemas VLP en función de los sensores ópticos, algoritmos matemáticos, esquemas de modulación y multiplexación [1, 2, 5–8, 14, 20, 28]. Los sensores de imagen en VLP ofrecen alta convergencia tecnológica debido a la posibilidad de reutilizar tecnología existente en los teléfonos inteligentes. Esta tecnología utiliza algoritmos robustos de visión artificial para la estimación de parámetros de la luz para el problema de posicionamiento [29]. En contraste, los fotodiodos continúan siendo sensores atractivos para diseñar sistemas VLP de bajo costo y alto desempeño de localización y comunicación. Esto se puede evidenciar en el trabajo [7], donde más del 80 % de los artículos revisados, emplean fotodiodos en arquitecturas VLP basadas en LEDs de luz blanca. Adicionalmente, el receptor óptico basado en fotodiodos puede ser integrado con tecnología móvil existente mediante un hardware modulable aprovechando los protocolos de comunicación universal.

Sin embargo, uno de los desafíos del VLP es la exploración de los diferentes grados de libertad disponibles para el sistema de posicionamiento en función de las prestaciones del canal óptico con miras a proponer esquemas de multiplexación o modulación eficiente. También, se hace relevante un estudio que muestre el impacto del rendimiento del sistema VLP sobre los indicadores de desempeño que contemple las prestaciones del sistema VLP en función de los requerimientos de un escenario de aplicación real como los muros.

#### 1.1.4. Desafíos del Posicionamiento por Luz Visible

A pesar de tener ventajas inherentes en comparación con otros sistemas de IPS, VLP basado en fotodiodos como receptores, todavía enfrenta numerosos desafíos que deben ser abordados. Algunos de estos temas se tratan en esta Sección.

**Velocidad de transmisión de datos, modulación y localización:** Uno de los principales retos del VLC es ofrecer enlaces de comunicación de alta velocidad [30, 31]. Por lo tanto, los esquemas de modulación investigados en VLC [32], como OOK (On Off Keying), PPM (pulse position modulation), FSK (frequency shift keying), CSK, OFDM (orthogonal frequency division multiplexing), QAM (quadrature amplitude modulation), entre otros,

también son estudiados y adaptados para IPS [5, 6]. Esta característica es aprovechada en los sistemas VLP, ya que ofrece la posibilidad de localización y comunicación en espacios de interiores. Sin embargo, los esquemas de modulación para el VLP aún presenta retos, por ejemplo, la mitigación de la interferencia entre símbolos o la limitación del rendimiento del sistema IPS debido al ancho de banda de modulación del VLC, en arquitectura VLP que exigen múltiples transmisores ópticos que comparten un único canal de comunicación [5]. Adicionalmente, esto implica mayor dificultad para el receptor óptico decodificar los datos si se asume que los transmisores envían información de manera concurrente [5].

**Interferencia y multiplexación:** En VLP se pueden dar algunos tipos de interferencia entre señales. La interferencia entre celdas y la interferencia entre canales. Algunas son necesarias para el buen funcionamiento del VLP mientras que otras son nocivas para el desempeño de localización y comunicación. La interferencia entre celdas puede ser beneficiosa para el VLP si el sensor óptico capta señales de luz provenientes de dos celdas adyacentes y éstas pueden ser identificadas y decodificadas. Esto ayuda también a mejorar la cobertura de localización por el trabajo colaborativo entre celdas. La interferencia entre canales es la que mayor dificultad presenta en los sistemas IPS, ya que los datos transmitidos se pueden perder si se genera el fenómeno de interferencia entre símbolos, imposibilitando la aplicación IPS. En consecuencia, múltiples trabajos de investigación han sido propuestos en la literatura para mitigar los problemas mencionados [6]. Entre ellos se destaca las técnicas de multiplexación en el tiempo, frecuencia, longitud de onda, acceso múltiple por división de frecuencia, multiplexación por división de frecuencia ortogonal, entre otros. A pesar de dichos esfuerzos, en un estudio sobre sistemas VLP presentado por Zhuang et al. [5] en 2018, concluyen que las técnicas de multiplexación aún requiere de profundos estudios que ayuden al desempeño del sistema VLP. Adicionalmente ellos indican la necesidad de dirigir trabajos para explorar las características del canal VLC con miras a proponer esquemas de multiplexación adecuados.

**Ruido óptico:** Este es un problema fundamental en los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas. Por tanto, en el sistema VLP las fuentes de luz artificiales y naturales provenientes de lámparas fluorescentes, incandescentes y luz solar inyectan ruido óptico e interferencia al sistema de comunicación, puesto que dichas fuentes se encuentran en la misma banda del espectro visible. Dicho ruido óptico debe ser mitigado para mejorar la relación señal a ruido en el receptor que ayude al buen desempeño del algoritmo de localización [2].

**Demostración experimental y múltiples celdas:** El sistema VLP aún se encuentra en una etapa exploratoria [7]. En consecuencia, algunas propuestas de investigación son validadas mediante simulación [6]. Si bien, existen propuestas orientadas a demostraciones experimentales, la mayoría son dirigidas en escenarios de interiores con arquitecturas VLP basadas en tres o cuatro LEDs que conforman una celda [12, 33, 34]. Esto representa una desventaja de cobertura, ya que el rendimiento del sistema VLP puede verse afectado en

escenarios que requieran múltiples celdas.

**Otros:** A modo de referencia se menciona de manera resumida otros problemas fundamentales del sistema VLP [7]. El tiempo de latencia del sistema debe ser considerado para ofrecer un posicionamiento que cumpla con los tiempos mínimos requeridos por el ecosistema de navegación. El parpadeo de las luminarias puede representar una molestia para los usuarios. Por tanto, esto se puede mitigar configurando el transmisor con frecuencias de modulación superiores a los 200 Hz. Sin embargo, en aplicaciones VLP donde el sensor óptico tiene un bajo ancho de banda, esto sigue siendo un reto [5]. La evaluación de los efectos por múltiples trayectorias en sistema VLP considerando el modelo de canal con línea de vista (LOS - line of sight) y sin línea de vista (NLOS - non line of sight) aún sigue siendo una meta. Más aún cuando el modelo de canal VLC para IPS ha sido evaluado para una banda estrecha de longitud de onda, tanto en el infrarrojo como en el visible. Por último, otros retos se relacionan con la orientación del receptor óptico, sincronización entre el transmisor y el receptor, baja exactitud de localización en esquinas y laterales, entre otros [6, 7, 13].

## 1.2. Motivación

Las luminarias LED se contemplan como la tecnología de iluminación que reemplazarán las lámparas tradicionales para el alumbrado público a nivel de interiores y exteriores [6]. Esto brinda nuevos horizontes para las comunicaciones ópticas inalámbricas como VLC. Actualmente, esta tecnología ha sido definida como un complemento y una alternativa viable para el diseño del sistema de posicionamiento a nivel de interiores, denominado VLP [6]. De modo que, VLP adopta todas las características del sistema VLC como el reúso de la infraestructura de iluminación LED, alta eficiencia energética, canal de comunicación de alta capacidad de transmisión, nula interferencia electromagnética y sistema de comunicación en bandas libres que no requieren licencias para su operación [5]. Sin embargo, presenta desafíos que aún son motivo de investigación. Como se mostró en la Sección anterior, se requieren estudios que conduzcan al desarrollo funcional de sistemas VLP multi-celda. Adicionalmente, según reportan los trabajos de investigación [5, 7, 8], los esquemas de modulación o multiplexación requieren de futuros estudios y validaciones, que contribuyan al desarrollo funcional de sistemas VLP. En consecuencia, es un reto proponer esquemas de modulación o multiplexación que permitan la exploración de los diferentes grados de libertad disponibles para el sistema de posicionamiento en función de las prestaciones del canal óptico. Para el estudio de algunos esquemas de modulación o multiplexación, la mayoría de las investigaciones se orientan en el modelo de canal para el espectro infrarrojo adaptado al LED de luz blanca [30, 35, 36] en arquitecturas VLP tradicionales [6], no obstante, estos resultados muestran pocos grados de libertad que no permiten explotar el potencial de los esquemas mencionados debido principalmente al estrecho espectro óptico controlable del WLED.

## 1.3. Hipótesis

A partir de conocer el modelo del canal VLC de interés para interiores y evaluar los grados de libertad disponibles del sistema de posicionamiento, es posible identificar elementos relevantes y características particulares de dicho sistema que podrán ser utilizados de una forma efectiva y eficiente en la forma de esquemas de modulación o multiplexación. Su utilización permitirá alcanzar los indicadores de desempeño y tasas de transmisión de datos necesarias para su uso potencial en museos.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de posicionamiento en interiores mediante un esquema de modulación y/o multiplexación adaptado al canal de comunicación por luz visible, manteniendo el equilibrio entre los indicadores de desempeño y la tasa de transmisión de datos confiable a través del medio compartido, para un uso potencial en un museo.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

1. Estudiar el modelo del canal VLC y algunos esquemas de modulación o multiplexación para el sistema de posicionamiento de interés, considerando las características particulares del museo del ITM.
2. Evaluar por simulación algunos esquemas de modulación o multiplexación e identificar características para ser adaptadas al modelo del canal VLC para el problema de posicionamiento en interiores.
3. Proponer un sistema IPS basado en un esquema de modulación o multiplexación adaptado al modelo del canal VLC en un ambiente simulado, considerando el equilibrio entre los indicadores de desempeño y la tasa de transmisión de datos confiable a través del medio compartido.
4. Validar el sistema propuesto para el posicionamiento en interiores en un espacio característico del museo del ITM.

## 1.5. Contribuciones

El presente trabajo de investigación contribuye en la generación de nuevo conocimiento alrededor de los sistemas de comunicación por luz visible aplicados al posicionamiento a nivel de interiores. Adicionalmente, el impacto a nivel académico es positivo, ya que fue posible

crear asignaturas para apoyar el programa de Tecnología e Ingeniería de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingenierías del ITM.

- Se propuso una nueva arquitectura para un sistema VLP basado en múltiples longitudes de onda. En este sentido, se planteó y evaluó un modelo de canal VLP que contempla componentes LOS y NLOS para los canales RGB transmisores. El modelo presentado revela los grados de libertad de diseño (cromaticidad y multicanalización) que ofrece la arquitectura VLP propuesta. Esto permitirá explorar esquemas de modulación multinivel como CSK y la multicanalización mediante la multiplexación por división de frecuencia que permitirán explotar la capacidad de transmisión de datos en aplicaciones con VLC [27].
- Diseño y demostración experimental de un sistema VLP basado en múltiples celdas y multiplexación por división de frecuencia en un entorno característico del museo de La Salle del ITM.
- Contribución en el ámbito académico mediante la creación de las siguientes asignaturas: Comunicación por luz visible I, código de asignatura 210202002-1, Facultad de Ingenierías, ITM, 2019 y Comunicación por luz visible II, código de asignatura 210202003-1, Facultad de Ingenierías, ITM, 2019. En la primera se considera el estudio teórico de sistemas VLC como el modelo de canal Lambertiano, modulación CSK, OOK, multiplexación FDM, WDM y TDM. En la segunda asignatura se aborda el concepto de VLP a nivel de teoría y simulación en Matlab y Python.

## Publicaciones científicas

1. **R.A. Martínez Ciro, F.E. López Giraldo, J.M Luna Rivera and A.M. Ramírez Aguilera “An Indoor Visible Light Positioning System for Multi-Cell Networks,”** photonics MDPI, vol 9. no. 146, pp. 1-13, 2022
2. **R. Martínez Ciro, D. Morales Morales, F. López Giraldo and J. Rojas Usuga, “Visible light communication channel with a smartphone screen as a transmitter and color shift keying modulation for access control applications,”** Journal of Physics: Conf. Ser., pp. 1-5, 2020
3. **R. Zapata, R. Martínez Ciro, F. López Giraldo and G. Góez, “Wireless optical system using amplitude modulation with GNU radio on a Raspberry Pi,”** Journal of Physics: Conf. Ser., pp. 1-4, 2020
4. **J. Rojas Usuga, J. Navarro Restrepo, R. Martínez Ciro, and F. López Giraldo, “Caracterización de un conversor de luz a frecuencia TSL235R-LF, para su aplicación en un sistema de comunicación por luz visible,”** Revista EIA, vol 17. no. 34, pp. 1-7, 2020

## Divulgación del conocimiento en eventos científicos

1. J.F. Rojas Marín, R.A Martínez Ciro, and G.D. Góez Sánchez, “Visible light positioning using time division multiplexing and OOK modulation,” modalidad ponencia en XVII ENO – VIII CANCOA, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín - Colombia, 2021
2. R.E Zapata Quintero, R.A Martínez Ciro, and F.E López Giraldo, “Indoor positioning System based on VLC technology and FDM technique,” modalidad ponencia en XVII ENO – VIII CANCOA, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín - Colombia, 2021
3. R.A Martínez Ciro, F.E. López Giraldo, D.M. Morales Morales, J.D. Rojas Usuga, “Comunicación por luz visible basado en un dispositivo móvil inteligente y la modulación por color, aplicado a un sistema de control de acceso,” modalidad ponencia en XVI ENO – VII CANCOA, Universidad de Córdoba, Montería - Colombia, 2019
4. R.E. Zapata Quintero, R.A Martínez Ciro, F.E. López Giraldo, and G.D. Góez Sánchez, “Sistema óptico inalámbrico utilizando modulación en amplitud sobre una Raspberry Pi y GNUradio,” modalidad ponencia en XVI ENO – VII CANCOA, Universidad de Córdoba, Montería - Colombia, 2019
5. J.D. Garcia Hernandez, J.D. Navarro Restrepo, R.A Martínez Ciro, and F.E. López Giraldo, “Sistema de comunicación por luz visible basado en LEDs RGB y WDM aplicado a señales de audio,” modalidad ponencia en XVI ENO – VII CANCOA, Universidad de Córdoba, Montería - Colombia, 2019
6. R.A Martínez Ciro, “Sistema de comunicación por luz visible: aplicaciones, diseño, simulación y prototipo experimental,” presentado en modalidad de curso en el evento XVI ENO – VII CANCOA, Universidad de Córdoba, Montería - Colombia, 2019

## Registros de software

1. R.A. Martínez Ciro, F.E. López Giraldo and D.M. Morales Morales, “Software VLC para el posicionamiento en interiores basado en FDM,” Dirección Nacional de Registros de Autor código 13-90-319, 22-jun.-2022
2. R.A. Martínez Ciro, F.E. López Giraldo and D.M. Morales Morales, “Software VLC-CSK Android,” Dirección Nacional de Registros de Autor código 13-85-279, 14-jul.-2021

3. R.A. Martínez Ciro, F.E. López Giraldo, G.D. Góez Sánchez and A.F. Bencur Pérez, “Software para el diseño de constelaciones M-CSK-LTF aplicado a sistemas de comunicación por luz visible,” Dirección Nacional de Registros de Autor código 13-74-140, 10-jun.-2019
4. R.A. Martínez Ciro, F.E. López Giraldo, A. Herrera Granda and J.D. García Hernández, “Software para el procesamiento de señales de audio Matlab aplicado a sistemas de comunicación por luz visible,” Dirección Nacional de Registros de Autor código 13-72-378, 26-mar.-2019

## Dirección trabajos de grado

1. R. Restrepo, “Sistema de comunicación por luz visible basado en tres luminarias mediante el uso de la multiplexación por división de frecuencia para su aplicación en sistemas de posicionamiento a nivel de interiores,” trabajo de grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, ITM, Medellín, Colombia, 2022
2. F.A. Ortiz, “Aplicativo para la simulación de entornos de implementación de tecnologías VLC IPS,” trabajo de grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, ITM, Medellín, Colombia, 2021
3. J.P. Pineda Ortiz, “Sistema de posicionamiento al nivel de interiores utilizando la tecnología de comunicación por luz visible,” trabajo de grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, ITM, Medellín, Colombia, 2021
4. M. Arias Tamayo, Y.A. Murillo Cataño “Sistema de comunicación por luz visible basado en LEDs comerciales y fotodiodos tipo PIN,” trabajo de grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, ITM, Medellín, Colombia, 2021
5. S. Henao Garcés, S. Hómez Ortega, “Diseño de prototipo de un sistema de comunicación vehicular empleando VLC,” trabajo de grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, ITM, Medellín, Colombia, 2019
6. D.F. Londoño, “Distribución de luminarias simuladas en Python para un sistema de comunicación por luz visible,” trabajo de grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, ITM, Medellín, Colombia, 2019
7. P.E. Peredo, A.E. Rodríguez, “Sistema de comunicación por luz visible mediante protocolo Serial aplicado a un sistema de control de acceso,” trabajo de grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, ITM, Medellín, Colombia, 2019

8. C.A. Saldarriaga Holgín, “Diseño e implementación de un sistema VLC utilizando Raspberry PI y Python,” trabajo de grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, ITM, Medellín, Colombia, 2019

## 1.6. Contenido de la Tesis

A continuación se describe el contenido restante de este documento:

**Capítulo 2.** Se muestra el estado del arte actual del sistema de posicionamiento en interiores empleando la comunicación por luz visible. Se aborda el estudio del estándar para VLP. Se describen las arquitecturas del sistema VLP y se plantea una revisión a los esquemas de multiplexación y el modelo de canal.

**Capítulo 3.** Se exponen los conceptos teóricos del sistema VLP describiendo sus elementos de transmisión, recepción y el algoritmo de trilateración para el problema de localización. Así mismo, se describen las características del canal de propagación en una arquitectura VLP basada en LEDs de luz blanca.

**Capítulo 4.** Se propone una arquitectura VLP multi-celda basada en LEDs RGB como la aportación principal de esta tesis al estado del arte. Se plantea la caracterización del museo del ITM y se identifican las características a considerar en el modelo del canal VLC. Se muestra el algoritmo que se construyó para el problema de localización así como los grados de libertad que ofrece en el diseño del sistema VLP y su impacto sobre los indicadores de desempeño. Adicionalmente se muestra el análisis del rendimiento del sistema VLP considerando las componentes LOS y NLOS del canal óptico. Los resultados de éste Capítulo fueron publicados en [27].

**Capítulo 5.** Se valida la arquitectura VLP multi-celda basada en LEDs RGB mediante una demostración experimental. Se adopta un escenario de laboratorio con condiciones de iluminación controladas. Se muestra los procedimientos realizados en el diseño, implementación y caracterización de los transmisores VLP así como del receptor óptico. Se presenta la configuración del sistema VLP para un punto cromático de transmisión y los resultados del error de localización para diferentes puntos de prueba del sensor de luz. Adicionalmente, los resultados por simulación son comparados con los experimentales.

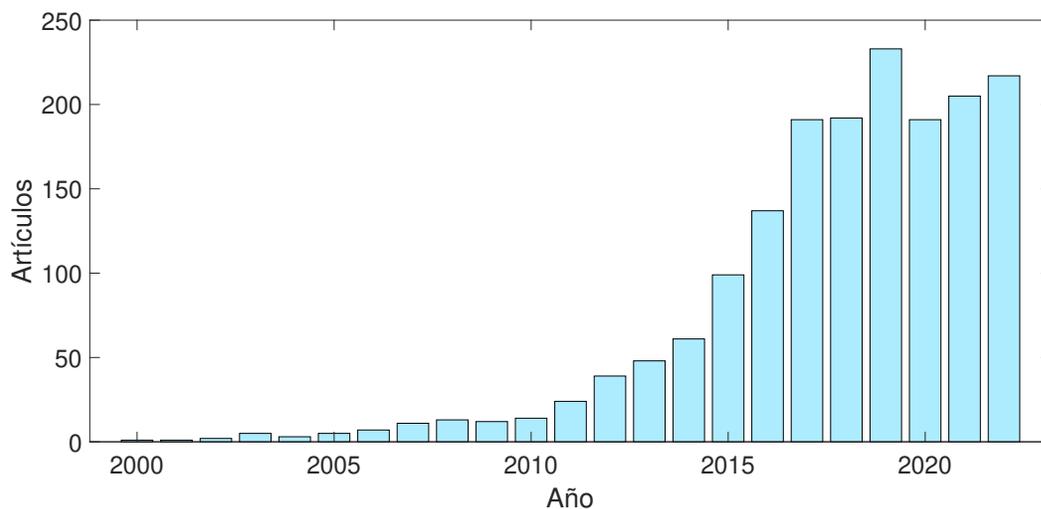
**Capítulo 6.** Se define y analiza los indicadores de desempeño del sistema VLP basado en LEDs RGB, la confiabilidad del sistema VLC y los grados de libertad, considerando los resultados obtenidos en el proceso de simulación y demostración experimental.

**Capítulo 7.** Se muestran las conclusiones y líneas futuras de este proyecto de investigación.

## 2 Estado del Arte del Posicionamiento en Interiores Basado en Luz Visible (VLP)

El rápido crecimiento en la demanda comercial de sistemas de navegación basado en los servicios de posicionamiento a nivel de interiores ha generado un fuerte interés por la comunidad científica. Esto ha permitido la exploración de múltiples tecnologías colaborativas en IPS, tales como sistemas de comunicación por radiofrecuencia y comunicaciones ópticas inalámbricas. Esta última posibilita la reutilización de la infraestructura de iluminación y la exploración del espectro visible que ofrece bandas de comunicación con alta capacidad de transferencia de datos. Esta combinación de tecnologías, recibe el nombre de posicionamiento a nivel de interiores basado en luz visible. La investigación en sistemas VLP se ha incrementado exponencialmente en los últimos años. Dicho interés puede ser observado en la Figura (2-1) donde el número de contribuciones por año de publicación en el campo VLP es analizado.

En este Capítulo se revisa el estado del arte en relación a la arquitectura y modelo de canal



**Figura 2-1:** Evolución del número de artículos por año según análisis realizado en la plataforma Scopus. Ecuación de búsqueda “light and indoor and positioning”.

para el IPS basado en la tecnología VLC con transmisores LED y receptores de fotodiodos. Se inicia con una identificación de estándares para sistemas VLP. Posteriormente, se brinda una revisión a las arquitecturas VLP propuestas en la literatura. Finalmente, se realiza una descripción de los modelos de canal mayormente referenciados en la literatura científica para el sistema VLP.

## 2.1. Estándar para el VLP

En la literatura aún no se evidencia un estándar internacional del sistema IPS basado en la comunicación por luz visible [2]. Sin embargo, sí se han dirigido esfuerzos para construir un documento técnico para VLP. Por ejemplo, un documento para sistemas de identificación por luz visible fue publicado por la JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) CP-1222 de Japón en el año 2007 [37]. Aunque dicho documento no está directamente relacionado con IPS, parte de sus técnicas y estructura son acogidas en la aplicación VLP. Por otra parte, Armstrong et al. proponen una hoja de ruta con algunas ideas que podrían ayudar a materializar un estándar internacional [38]. Dicho documento deja en evidencia el impacto de la tecnología LED en VLC aplicado a IPS, los escenarios potenciales de aplicación, arquitectura y algunas técnicas de posicionamiento. En dicho trabajo se considera el estándar de la IEEE (Institute of electrical and electronics engineers) parte 802.15.7 que dicta lineamientos para el diseño de sistemas VLC a nivel de interiores [39].

## 2.2. Arquitectura

La arquitectura del sistema VLP está en función del número de luminarias requeridas por el escenario de aplicación [6]. Por lo anterior, la literatura reporta arquitecturas VLP basadas en menos de tres luminarias LEDs [12, 34, 40–42] y tres o más LEDs [33, 43–47]. Como el presente estudio se encuentra enmarcado en sistemas VLP con múltiples celdas, en adelante se presenta una revisión detallada de la arquitectura VLP basada en tres o más luminarias. En consecuencia, se considera el análisis de los esquemas de modulación o multiplexación adaptados al VLC, el número de celdas habilitadas, el tipo de validación (simulación-experimental), características del escenario, y como los autores han considerado la evaluación de los indicadores de desempeño del posicionamiento y el rendimiento del sistema VLC.

Kim et al. proponen un sistema VLP basado en tres LEDs de luz blanca en un espacio de trabajo de (60x60x60) cm [48]. Adoptan la técnica de asignación de portadoras RF y la modulación de intensidad y detección directa para mitigar la interferencia entre celdas en el proceso de posicionamiento. Los identificadores de los LEDs son codificados mediante modulación QPSK (quadrature phase shift keying) en un sistema experimental basado en equipos de laboratorio. Sin embargo, el trabajo es conducido sólo con una celda tanto para

el proceso de simulación como experimental. Adicionalmente, la evaluación del rendimiento del sistema VLC fue concebido en una sola dirección entre el transmisor y el receptor, por lo que no se evidencia el comportamiento real en un espacio tridimensional. Adicionalmente, los autores emplearon frecuencias de modulación entre 2 MHz y 3 MHz, lo cual podría ser contra productivo para sistemas VLP prácticos, puesto que los identificadores de los LEDs solo ocupa un par de Bytes. El trabajo antes citado fue expandido por los autores en [33] para escenarios con diseño de celdas hexagonales, cuadradas y rectangulares. De manera análoga Hsu et al. propone un sistema VLP basado en tres LEDs blancos y una celda [49]. En dicho estudio se considera un escenario más realista con dimensiones de (0.9x0.9x2) m y frecuencias de portadora menores a 40 kHz. Los identificadores de los LEDs son codificados mediante modulación OOK y se emplea la técnica de la transformada rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier transform) sobre la señal óptica detectada para estimar parámetros útiles en el proceso de estimación de distancias Euclidianas entre el transmisor y el receptor de luz. Los autores reportan un error de localización promedio de 10 cm y un rendimiento del sistema de comunicación por luz visible de 2 kbits/s. Otros trabajos reportan el estudio de sistemas VLP considerando los efectos de las componentes reflejadas. Zhang et al. proponen un estudio para el análisis teórico de la exactitud del sistema VLP basado en la técnica RSS y los efectos de las componentes NLOS [50]. El estudio contempla el modelo de canal VLC Lambertiano, donde las componentes difusas hacen parte de las potencias ópticas detectadas por el receptor óptico. La arquitectura está integrada por 3 LEDs blancos y un fotodiodo. Emplean portadoras análogas con frecuencias entre 2 MHz y 4 MHz para codificar los identificadores de cada luminaria, sin embargo, no es claro el tipo de modulación utilizado. Los resultados de la evaluación del sistema VLP solo contemplan simulaciones numéricas para celdas con representaciones triangulares y cuadradas. Adicionalmente, los autores solo reportan la evaluación del rendimiento del error del sistema VLP, donde la distribución triangular mostró un mejor comportamiento y concluyen que las componentes reflejadas no generan alteraciones al posicionamiento. Por otra parte, Zhong et al. diseñan un sistema VLP bajo un entorno de simulación y laboratorio [47]. El escenario de aplicación cuenta con un área de (1.2x1.2x2) m y una celda conformada por tres LEDs blancos. Cada LED es modulado con una señal portadora RF con frecuencia entre 4 MHz y 4.4 MHz. Los autores no contemplan formatos de modulación para los identificadores de cada LED, ya que estos son correlacionados con las frecuencias centrales asociadas a cada portadora. Los resultados reportan un error de localización promedio de 9.2 cm a una frecuencia de muestreo de 500 MSa/s. Otros trabajos de investigación reportan sistemas VLP con arquitecturas conformadas por una celda en escenarios de trabajo con área de cobertura reducida [34, 43, 45, 46, 51].

Como se puede evidenciar, los trabajos antes mencionados muestran sistemas VLP básicos conformados por una celda y tres luminarias LED. En consecuencia, algunos trabajos emplean esquemas de modulación para la codificación de los identificadores de cada LED [33, 48, 49], aunque, otra propuesta [47] elimina dichas técnicas y acude a otros métodos

menos complejos como la asignación de portadoras por radiofrecuencia para el proceso de localización. Adicionalmente, se evidencia el interés en la evaluación y optimización del error de localización [52], aunque esto podría ser contra productivo en la construcción de sistemas VLP con indicadores de desempeño equilibrado que brinde un enfoque realista en el diseño de arquitecturas VLP funcionales. Por lo anterior, otros autores han propuesto arquitecturas VLP que buscan dar respuesta a dichos problemas. Una posible estrategia se orienta al estudio de sistemas VLP con múltiples celdas mediante la exploración de diferentes técnicas de multiplexación [5]. Sin embargo, en este nuevo enfoque surge un problema fundamental relacionado a la gestión de los múltiples transmisores LED en presencia de un único canal de comunicación. Adicionalmente, mitigar el problema de interferencia entre canales y celdas en el proceso de localización, también es una meta. En este sentido, en la literatura científica se evidencia trabajos de investigación en VLP donde algunas técnicas de multiplexación como tiempo (TDM - time division multiplexing) [20], frecuencia (FDM - frequency division multiplexing) [53] y longitud de onda (WDM - wavelength division multiplexing) [54] han sido evaluadas.

### 2.2.1. Multiplexación por División de Tiempo

Los trabajos VLP presentados por [5, 20, 55, 56] han sido propuestos con la TDM. Para que el sistema VLP pueda ser desarrollado, TDM divide el tiempo total de transmisión según el número de luminarias LED instaladas y requiere de una señal de sincronización entre el transmisor y el receptor. Lograr tal sincronía en una arquitectura VLP con múltiples luminarias es un reto. El estándar IEEE 802.15.7 sugiere códigos de cabecera en la trama TDM que ayude al proceso de sincronización. Sin embargo, dicha señal de reloj es difícil de sincronizar, ya que los LEDs no pueden recibir datos entre sí. Adicionalmente, los tiempos asignados a cada trama TDM aumentan la latencia del sistema de localización, lo cual dificulta la aplicación VLP en tiempo real.

### 2.2.2. Multiplexación por División de Frecuencia

La FDM aplicada a VLP no requiere de tiempos de sincronización y presenta baja interferencia entre celdas. Esta técnica divide el ancho de banda total en rangos de frecuencia no superpuestos correspondiente al número de LEDs utilizados [5, 53, 57]. Estudios han reportado que la FDM ofrece un mejor rendimiento del sistema VLP comparado con TDM, sin embargo, esta técnica requiere de filtros digitales y esquemas de procesamiento especializados que suman complejidad y costo en el despliegue de hardware. Aun así, FDM continúa siendo una de las técnicas de multiplexación preferidas en la literatura [53, 57, 58].

### 2.2.3. Multiplexación por División de Longitud de Onda

Una característica fundamental de IPS basado en VLP es brindar la posibilidad de reutilizar las luminarias de luz blanca existentes en la mayoría de escenarios de aplicación. Dicha luz blanca también puede ser generada mediante la combinación adecuada de LEDs rojo, verde y azul contemplando el estándar CIE 1931 [59]. Dichas luminarias pueden ser gestionadas con WDM de manera efectiva. Adicionalmente, permite la multicanalización y el uso de esquemas de modulación multinivel como CSK que podrían proporcionar enlaces de comunicación de alta velocidad. Esto ha sido estudiado y demostrado en sistemas VLC [60–63], sin embargo, en VLP aún falta mayores estudios y validaciones experimentales que demuestren su utilidad para la localización [54, 63, 64]. Esto se puede evidenciar en los trabajos [54, 65], donde reportan un sistema VLP basado en LEDs policromáticos, sin embargo la arquitectura VLP solo contempla una celda y no se evidencia el modelo de canal utilizado.

### 2.2.4. Modelo de Canal para VLP

El sistema de posicionamiento a nivel de interiores basado en la tecnología VLC adopta de manera directa el modelo de propagación de la luz y su relación con el canal y el detector óptico, para la estimación de parámetros útiles en el proceso de localización [34, 66]. Por tanto, la mayoría de trabajos de investigación en VLP toman como referencia el modelo de canal Lambertiano, el cual modela el comportamiento óptico de la luz generado por radiadores LED a través del espacio libre [2, 7, 8, 65]. Lo anterior ofrece una herramienta de cálculo útil para el diseño de sistemas VLC que al ser combinada con la técnica RSS y el algoritmo de trilateración configura la aplicación de posicionamiento [67, 68]. Dicha configuración básica es estudiada en la literatura, donde se considera la técnica de modulación de intensidad y detección directa que ofrece el sistema VLC en enlaces de comunicación con componente de línea de vista (LOS) y reflejadas (NLOS) [5, 50]. Lo anterior se expone con más detalle en el Capítulo 3.

### 2.2.5. Análisis Comparativo del Estado del Arte

La Tabla 2-1 muestra una comparación entre las características del sistema VLP de algunos trabajos representativos reportados en el estado del arte. Se analizaron algunos trabajos de VLP con arquitecturas basadas en luminarias WLEDs y LEDs RGB. En síntesis, esta propuesta de investigación reporta un sistema VLP con arquitectura multi-celda basada en LEDs policromáticos que ofrece características como: un estudio del modelo de canal VLC con aporte de NLOS y componentes de luz RGB; exploración cromática del transmisor óptico empleando el estándar de color CIE 1931; un proceso de localización que no requiere emplear esquemas de modulación VLC y que adopta la técnica de identificadores de luminarias mediante portadoras RF utilizando FDM, RSS y el algoritmo de trilateración para la estimación de la localización del receptor óptico.

**Tabla 2-1:** Comparación entre algunos sistemas VLP propuestos en la literatura.

Característica	Vieira et al. [54]	Rexhausen et al. [65].	Isam et al. [67]	Du et al. [47]
LEDs RGB	Sí	Sí	No	No
Arquitectura multi-celda	No	No	No	No
Estudio de canal	No	No	Sí	No
Exploración cromática	No	No	No	No
Simulación	Sí	No	Sí	No
Demostración	No	Sí	No	Sí
Error promedio (cm)	No reporta	10.8	1.4	9.2
Cantidad de indicadores evaluados	1	1	1	1
¿Requiere modulación VLC?	Sí	Sí	Sí	No
Multiplexación	WDM	WDM+TDM	No reporta	FDM

## 3 Marco Teórico

En este Capítulo se abordan los conceptos teóricos básicos del sistema VLC aplicado al posicionamiento a nivel de interiores. Por lo tanto, primero se describe de manera general los diferentes elementos que integran la tecnología VLC, como el transmisor, canal y receptor. Posteriormente, se muestra la arquitectura del sistema IPS basado en VLC, describiendo las técnicas y algoritmos que permiten la estimación de la posición del receptor.

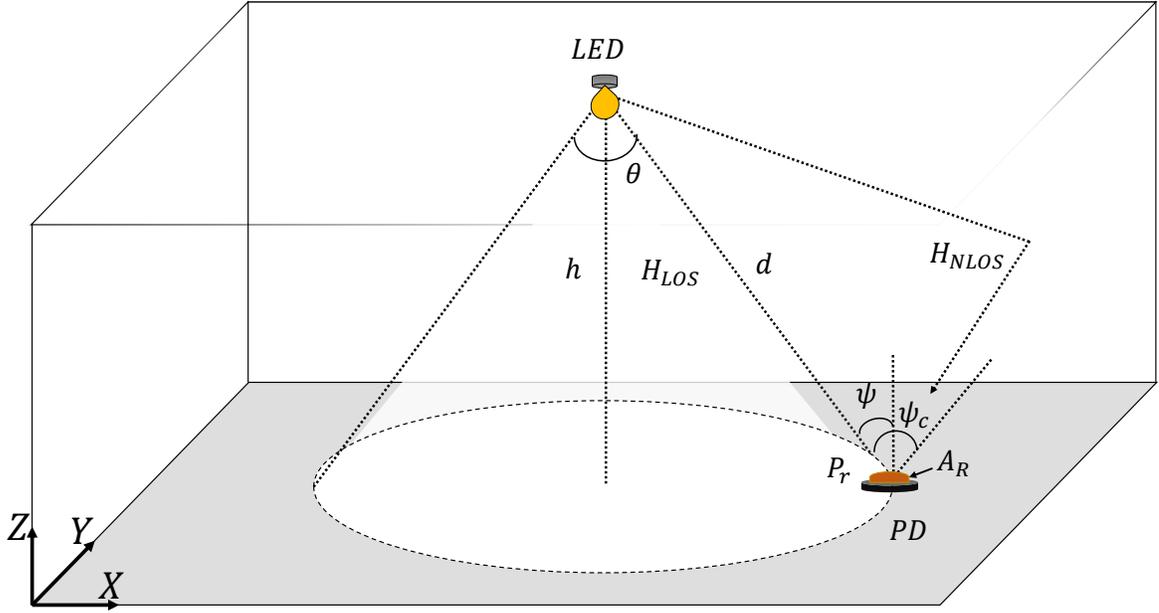
### 3.1. Sistema de Comunicación por Luz Visible

El sistema VLC es considerado como una tecnología promisoría para las aplicaciones de comunicaciones ópticas inalámbricas en interiores. Esto se debe principalmente a la capacidad de transmisión del canal y la baja complejidad de su arquitectura. Un enlace de comunicación óptico inalámbrico aplicado a nivel de interiores, está basado en la modulación de intensidad y detección directa (IMDD - Intensity Modulation and Direct Detection), que es un esquema básico para la implementación de sistemas VLC [7,9,50]. La arquitectura de un sistema VLC basado en un LED y un fotodiodo se muestra en la Figura (3-1). En esta se puede observar los diferentes elementos que intervienen el sistema VLC, como el transmisor, receptor y canal. En adelante, se describirá cada elemento y se ofrecerá el análisis matemático que lo modela según lo muestra la literatura.

El transmisor consta de una luminaria basada en tecnología LED, la cual permite transmitir datos binarios o digitales mediante los destellos de luz, al mismo tiempo que brinda iluminación al entorno. Las luminarias LEDs de luz blanca son preferidas en aplicaciones VLC debido a su capacidad de transmisión, alto ancho de banda (1 MHz) y alta eficiencia energética [69]. El LED se comporta como un radiador Lambertiano debido a la naturaleza incoherente de la luz emitida [9]. En este sentido, la potencia óptica emitida por el LED se muestra en la siguiente ecuación.

$$P_{T_{opt}}(t) = I_{LED}(t) \otimes h_{eo}(t) \quad (3-1)$$

Donde la potencia óptica  $P_{T_{opt}}(t)(W)$  generada por el LED está en función de la corriente de polarización  $I_{LED}(t)(A)$  y la convolución  $\otimes$  con la respuesta al impulso del sistema  $h_{eo}(t)$ .



**Figura 3-1:** Geometría del modelo de propagación del canal VLC.

El canal óptico permite la propagación de las señales de luz emitidas por el LED. Dichas señales son dispersadas por el espacio libre siguiendo un patrón de radiación Lambertiano dado a las características del LED. En este trabajo se considera el modelo de canal presentado en [50], donde la ganancia del canal  $H(f)$  con frecuencia de modulación  $f$  puede ser expresada como  $H(0)$  para una representación del canal óptico en corriente continua:

$$H(f) = H(0) = H_{LOS} + H_{NLOS} \quad (3-2)$$

Donde  $H_{LOS}$  representa las componentes de luz con línea de vista (LOS), la cual es independiente de la frecuencia de modulación.  $H_{NLOS}$  representa las señales reflejadas o sin línea de vista (NLOS) entre la fuente de luz y el receptor óptico. La componente  $H_{LOS}$  depende de las características del modelo Lambertiano del transmisor óptico y del receptor de luz, mientras que  $H_{NLOS}$  está en función de los índices de reflexión de los objetos presentes en el enlace de comunicación óptico. La ganancia del canal óptico en corriente continua DC - direct current para las componentes LOS y NLOS, se definen como sigue [7, 9, 50]:

$$H_{LOS} = \begin{cases} \frac{m+1}{2\pi d^2} A_R \cos^m(\Theta) \cos(\psi) T_s(\psi) G(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi \geq \psi_c \end{cases} \quad (3-3)$$

$$H_{NLOS} = \frac{A_R}{A_{room}} \frac{\langle \rho \rangle}{1 - \langle \rho \rangle} \quad (3-4)$$

Donde:

- $A_R$  es el área del fotodiodo;
- $m$  representa el índice de radiación Lambertiano;
- $d$  es la distancia euclidiana entre el transmisor y el fotodiodo;
- $\Theta$  ángulo de visión del LED;
- $\psi$  ángulo de incidencia óptica con respecto al eje normal a la superficie del fotodiodo;
- $\psi_c$  ángulo de visión del fotodiodo;
- $T_s(\psi)$  ganancia de un filtro óptico;
- $G(\psi)$  ganancia de un concentrador óptico;
- $A_{room}$  área de la superficie del salón;
- $\langle \rho \rangle$  reflexión promedio de un salón dado, que puede ser medido y tratado como una constante [50];

Para los sistemas VLC que no requieren utilizar filtros ópticos o concentradores en el receptor, las variables se asumen como  $T_s(\psi) = G(\psi) = 1$ . Por otra parte, el coeficiente Lambertiano  $m$  se estima mediante la siguiente ecuación [70].

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos(\Theta/2))} \quad (3-5)$$

Donde  $\Theta/2$  representa el ángulo medio de visión del LED. Por otra parte, considerando el eje perpendicular entre los LEDs y la superficie sensible del receptor, las siguientes equivalencias son realizadas  $\cos^m(\Theta) = (\frac{h}{d})^m$  y  $\cos(\psi) = \frac{h}{d}$ , donde  $h$  representa la altura entre la superficie del receptor y el plano formado por los LEDs sobre el techo [50, 70]. Por tanto, considerando las definiciones antes planteadas, es prudente reescribir la ecuación (3-2) como:

$$H(0) = \frac{m+1}{2\pi d^{m+3}} A_R h^{m+1} + \frac{A_R}{A_{room}} \frac{\langle \rho \rangle}{1 - \langle \rho \rangle} \quad (3-6)$$

Es evidente que la señal óptica emitida por un LED pierda energía a medida que se aleja de la fuente. Por tanto, la potencia óptica  $P_r(t)$  incidente sobre la superficie del receptor está dada por la siguiente ecuación:

$$P_r(t) = H(0)P_{Topt}(t) \quad (3-7)$$

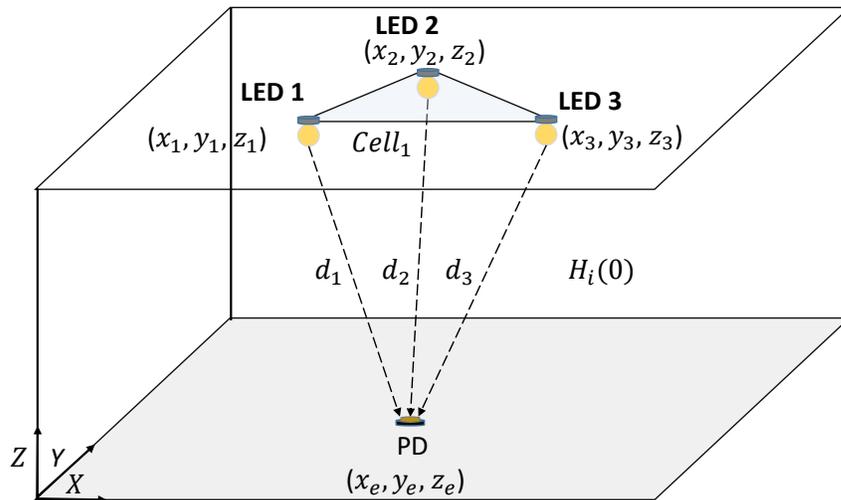
El receptor óptico está basado en un fotodiodo que tiene como función transformar la potencia óptica  $P_r(t)$  incidente en sus superficie en fotocorriente  $r(t)$  y se estima como sigue [50,70]:

$$r(t) = P_r(t)R(\lambda) + n(t) \quad (3-8)$$

Donde,  $R(\lambda)(A/W)$  representa la responsividad del fotodiodo para una longitud de onda específica y  $n(t)$  es el ruido asociado al sistema, que se modela como una variable aleatoria de naturaleza Gaussiana (AWGN - additive white Gaussian noise) con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ .

## 3.2. Modelo del Sistema VLP Basado en Trilateración

En esta Sección se brinda una breve revisión de los principios fundamentales de un modelo de sistema VLP común en la literatura [33,46,49]. Aunque algunos trabajos de investigación han considerado propuestas de arquitecturas VLP para múltiples celdas [33,46,49,53], ellos confinan la simulación o la demostración experimental en escenarios con una sola celda. Por lo tanto, se presenta la revisión de un modelo VLP básico basado en una celda y tres LEDs de luz blanca para un sistema de localización en dos dimensiones (2D), como se muestra en la Figura 3-2.



**Figura 3-2:** Arquitectura y modelo geométrico de un sistema VLP basado en tres LEDs de luz blanca.

En esta arquitectura, el espacio de interior con dimensiones  $XYZ$  está integrado por un receptor óptico basado en un fotodiodo (PD - photodiode) instalado a una altura  $z_e$  del suelo y un arreglo triangular de LEDs ubicados a una altura  $Z$  que conforman una celda ( $cell_1$ ). En un sistema VLP se hace uso de la geometría del sistema VLC como estrategia para la estimación de parámetros útiles en el problema de posicionamiento. En este sentido, el principio de funcionamiento del VLP se puede definir en dos problemas fundamentales: estimación de la posición de las luminarias  $(x_i, y_i, z_i)$  y cálculo de las distancias Euclidianas  $d_i$  entre cada LED y el fotodiodo. Dichas variables son suficientes para estimar la localización del receptor óptico  $(x_e, y_e, z_e)$  mediante el algoritmo de trilateración. En ambos problemas se ha presentado múltiples estrategias, como se expuso en la Sección de introducción. Sin embargo, por razones prácticas, en esta revisión se mostrará el análisis de la técnica RSS para la estimación de las distancias euclidianas y la estimación de la posición del LED mediante técnicas de modulación. Tenga en cuenta que lo antes mencionado aplica para arquitecturas VLP basadas en fotodiodos como receptores. El principio de funcionamiento del algoritmo de trilateración se basa en la manipulación trigonométrica de la geometría conformada por el sistema de luminarias y el receptor óptico. Esto exige conocer la posición de por lo menos tres LEDs para dar la estimación de posición  $(x_i, y_i)$  del receptor en 2D. Por tanto, el primer paso es estimar la distancia  $d_i$  entre el receptor y cada LED  $i$  mediante la siguiente expresión [33, 49, 53]:

$$d_i = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2 + (z_e - z_i)^2} \quad (3-9)$$

Se puede evidenciar en la Figura **3-2** que las luminarias LED están ubicadas a la misma altura del escenario de trabajo, por tanto,  $z_i = Z$  y  $z_e = 0$ . Luego, la estimación de la posición del receptor  $\mathbf{X} = [x_e \ y_e]^T$  en 2D, puede ser calculada resolviendo las siguientes ecuaciones lineales [33, 49]:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (3-10)$$

Donde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix}, \quad \text{and } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{(d_1^2 - d_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2)}{2} \\ \frac{(d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2)}{2} \end{bmatrix}$$

Uno de los objetivos principales con VLC es proporcionar un mecanismo para la estimación de  $d_i$  en función del modelo del canal, siendo RSS, AOA o TOA las técnicas que más se han trabajado en diferentes propuestas [33, 46, 49, 53]. Basado en la información mostrada en [46], el algoritmo AOA es frecuentemente utilizado en aplicaciones con sensores basados en cámaras, TOA y RSS son más frecuentes cuando se emplea un PD como receptor, sin embargo, TOA requiere un estricto tiempo de sincronización entre las luminarias y el receptor. En

contraste, la técnica RSS aprovecha de manera directa la respuesta de fotocorriente de un receptor óptico basado en fotodiodos, lo que facilita el análisis del sistema. Por lo tanto, se toma como referencia el análisis de una arquitectura VLP basado en una celda conformada por tres luminarias blancas, presentado por Constanzo et al. [53], donde aplican la técnica RSS. Ellos adoptan un canal VLC con aporte de componente LOS y la transmisión de señales digitales mediante portadoras de diferentes frecuencias, similar a como funciona un sistema FDM. Esto permite que la potencia óptica transmitida por cada LED  $P_{T_{opt}}$  pueda ser identificada por el receptor mediante la frecuencia asociada. El sensor de luz transforma la señal óptica en fotocorriente (ver ecuación 3-8) que luego es acondicionado por un amplificador de transimpedancia para generar un fotovoltaje  $x_i(t)$ . En síntesis, Constanzo et al. [53], proponen el siguiente análisis matemático para estimar la  $d_i$  en función de la respuesta del canal VLC:

$$d_i = \left( \frac{h_i^m (m+1) A_R \zeta P_{T_{opt}} T(\psi) g(\psi)}{2\pi Pr_i} \right)^{\frac{1}{m+2}} \quad (3-11)$$

Donde  $\zeta$  es un factor de calibración y el resto de términos fueron definidos en la Sección del sistema de comunicación por luz visible. Como se puede apreciar en la ecuación 3-11, todas las variables son conocidas, a excepción de  $Pr_i$  que es la potencia óptica recibida en el receptor, la cual es emitida desde la luminaria  $i$ . Por lo tanto, Constanzo et al. [53] propone el uso de la densidad espectral de potencia  $PSD[\cdot]$  de la señal de fotovoltaje para estimar  $Pr_i$ , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Pr_i = \int_{f_i - \frac{f_i}{Q_i}}^{f_i + \frac{f_i}{Q_i}} PSD[x_i(t)] df \quad (3-12)$$

Donde  $f_i$  y  $Q_i$  para  $i = 1, 2, 3$ , representan la frecuencia de la señal portadora y el factor de calidad del sistema de filtrado respectivamente. Por otra parte, ellos proponen la identificación de las luminarias mediante la transmisión de códigos binarios modulados en formato OOK, que permite al sistema de recepción estimar la posición  $(x_i, y_i, z_i)$  espacial de los LEDs transmisores. Con la información anterior y la suministrada por la ecuación (3-11) y (3-12), se procede a estimar la posición del receptor mediante la ecuación de trilateración (3-10).

# 4 Sistema VLP Multi-Celda Basado en Diodos Emisores de Luz Multicolor y Multiplexación por División de Frecuencia

Este Capítulo se estructura en dos procesos: Escenario de trabajo y modelo del sistema VLP. En el primero se propone un análisis y caracterización del museo de Ciencias Naturales de La Salle del ITM con el fin de identificar características a ser adaptadas al modelo de canal VLP. Posteriormente, se presenta el modelo de canal policromático del sistema de posicionamiento, contemplando una arquitectura basada en múltiples celdas integradas por LEDs RGB. Adicionalmente, se toma como estrategia la adaptación de la multiplexación por división de frecuencia y la multiplexación por división de longitud de onda, para la transmisión de los identificadores de cada luminaria. En ese sentido, se propone el uso de un receptor óptico basado en un solo fotodiodo, donde se explora la responsividad para diferentes longitudes de onda, como estrategia para la detección de las señales ópticas recibidas. Se plantea un análisis matemático del sistema VLP y se brindan las ecuaciones matemáticas necesarias para el problema de localización. Adicionalmente, se sugiere un algoritmo para la estimación del vector de distancias Euclidianas entre las luminarias y el receptor de luz, considerando la explotación de la densidad espectral de potencias de la señal FDM entregada por el detector óptico. Posteriormente, se emplea el algoritmo de trilateración para la estimación de la posición del receptor. Parte de la metodología mencionada y los resultados obtenidos fueron publicados en el artículo [27].

Finalmente, se muestran los resultados de la simulación del modelo VLP empleando el método Monte Carlo. Se analiza el rendimiento del error de localización en un espacio tridimensional explorando un grado de libertad del sistema VLP.

## 4.1. Caracterización del Museo de Ciencias Naturales de La Salle

El Museo de Ciencias Naturales de La Salle fue fundado en 1913 por los hermanos de La Salle y tiene como objetivo la preservación, la investigación y la divulgación del patrimonio

cultural y natural del departamento de Antioquia, Colombia [71]. El museo cuenta con una diversidad invaluable de especímenes para las colecciones de Zoología, Geología, Paleontología y Antropología, que han sido custodiados y preservados con rigurosos protocolos de conservación. El Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) se convirtió en el guardián del Museo desde el año 2006, poniéndolo a disposición de la academia, la investigación científica y del público en general [4]. El Museo hace parte de la Facultad de Artes y Humanidades del ITM y se encuentra localizado en el campus Fraternidad de la ciudad de Medellín, Antioquia. El Museo cuenta con 6 salas de exhibición distribuidas en 2 niveles. La sala 1, 2A, 2B, 3 y temporal se encuentran distribuidas en el primer nivel, mientras que la sala 4 se encuentra en el segundo nivel [72]. En la Figura 4-1 se muestra una toma panorámica del Museo del ITM, que se encuentra habilitado digitalmente en línea [72].

De manera general, todas las salas tienen condiciones de iluminación exterior controlada y utilizan diferentes tecnologías de luminarias instaladas en diversos puntos del salón. En adelante se ofrece una descripción resumida para cada sala.

1. *Sala 1:* En esta sala, los ejemplares zoológicos y apoyos museográficos están distribuidos sobre las paredes del salón y cuenta con luminarias de tecnología LED y de tubo fluorescentes para la iluminación. Una de las exposiciones en dicha sala, se encuentra iluminada con reflectores basados en tecnología LED que proyectan luz desde el piso hacia el centro de la pared donde se encuentra las artes. Así mismo, otras exposiciones cuentan con reflectores similares ubicados en el techo, justo encima de cada arte fijada a la pared. Bajo dichas condiciones, se evidencia buena iluminación en los laterales del salón o zonas cercanas a las paredes, mientras que zonas con sombras son evidenciadas en la parte central del salón.



**Figura 4-1:** Espacios del museo del ITM.

2. *Sala 2A:* Cuenta con 3 luminarias de tubo fluorescentes instaladas sobre el techo y la mayoría de sus artes se encuentran ubicadas en las paredes. Sin embargo, una de las exposiciones está instalada en el centro del salón, cubriendo un área aproximada de  $2m^2$ . El piso cerámico está cubierto de un material estampado de colores grises y oscuros, que proporciona cierta opacidad lumínica.
3. *Sala 2B:* Esta sala es utilizada para realizar exposiciones temporales de duración menores a 5 meses. Es considerada como una extensión de la sala temporal. Las luminarias empleadas son de tipo reflector de tecnología LED instaladas sobre rieles ubicados en el techo, que iluminan el centro de las paredes donde las artes son instaladas.
4. *Sala 3:* La sala 3 es utilizada para realizar exposiciones permanentes. Cuenta con luminarias de tubo fluorescentes instaladas sobre el techo y tiene una diversidad de especímenes y apoyos museográficos distribuidos por todo el salón. Algunos de ellos se encuentran ubicados en los laterales o instalados sobre las paredes.
5. *Sala temporal:* La sala de exposición temporal cuenta con luminarias basadas en reflectores de tecnología LED instaladas en un sistema de riel. Dichas luminarias tienen como función principal iluminar las obras de artes y apoyos museográficos que hacen parte de los diferentes proyectos expositivos.
6. *Sala 4:* Se encuentra en el nivel 2 y se accede a ella por medio de escaleras que conectan desde la sala 3. Las luminarias son de tecnología de tubo fluorescentes y son distribuidas de manera similar a las de la sala 3. El salón de la sala 4 cuenta con una división que crea un espacio en forma de “U”, donde especímenes y apoyos museográficos son instalados sobre el piso y las paredes.

En síntesis, las salas de exposición no tienen ingreso de luz externa debido a la ausencia de ventanas sobre las paredes y cuentan con luminarias de dos tecnologías (tubo fluorescentes y LED). Las de tubo hacen parte del sistema de iluminación estándar del ITM. Mientras que las luminarias de tecnología LED han sido adaptadas e instaladas por los funcionarios del Museo según las necesidades de iluminación requeridas para algunos especímenes o artes. Dichas luminarias se encuentran a una altura que oscila entre los 3 y 3.5 metros. Adicionalmente, en los salones de exposición, la mayoría de lámparas se encuentran instaladas en los laterales del techo debido a la reutilización de infraestructura de luminarias existentes. Por otra parte, a nivel de calidad de iluminación para algunas artes o especímenes, la curadora del Museo del ITM, Dany Zulay Urrego Cardenas, experta en museología y autora de algunos trabajos de investigación [4], indicó en una entrevista que la luz proveniente de tecnología LED es preferida para el museo. Más aún, si dicha luminaria permite controlar el color y la intensidad lumínica, características de la luz que podrían ser orientadas a investigaciones futuras respecto a la interacción con los compuestos químicos que preservan los

especímenes. Esta idea podría derivar trabajos en IPS empleando la tecnología de comunicación por luz visible y en el campo de la preservación de las artes en museos de ciencias naturales, donde se ha demostrado que los destellos de luz intensos con alto contenido de radiación ultravioleta e infrarrojo, podría contribuir a la degradación de las artes [73, 74]. Por lo tanto, en este trabajo es de interés solo el estudio de IPS aplicado al museo, donde la exploración de luminarias multicolor para el control de la cromaticidad también es una meta.

Se proyecta un estudio inicial del VLP considerando las características de la sala 3 del Museo del ITM. Las luminarias podrán ser instaladas a una altura de 3 m. Adicionalmente, para el sistema VLP se debe contemplar las componentes de línea de vista y reflejadas, por lo que es necesario hacer una identificación de los índices de reflexión de los materiales presentes en el salón. La sala 3 cuenta con un piso construido de un material cerámico pulido y las paredes están recubiertas de diferentes materiales, entre los que se destaca pinturas acrílicas de color blanco, azul y cian. Por tanto, considerando los diferentes materiales relacionados con las paredes y el piso del escenario de trabajo, los coeficientes de reflexión que podrían ser de utilidad para el modelo del sistema VLP serán extraídos de [35].

## 4.2. Modelo del Sistema VLP

La Figura 4-2 presenta la arquitectura multi-celda del sistema VLP propuesto. El área de cobertura ofrecida por el escenario de trabajo es dividida en  $k$  celdas ( $cell_k$ ) para  $k =$

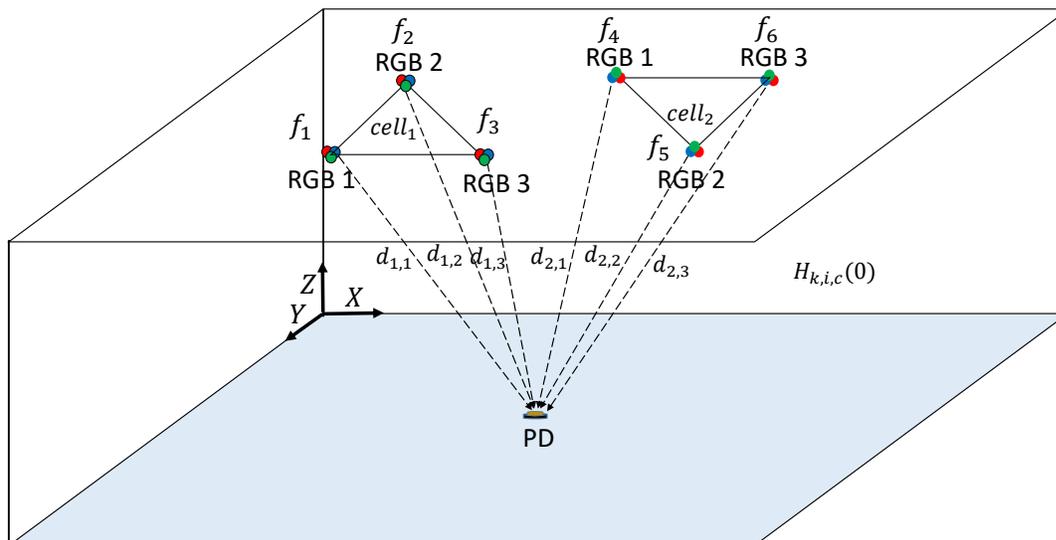


Figura 4-2: Arquitectura multi-celda del sistema VLP basado en LEDs.

1, 2, 3... $K$ . Cada celda consiste en tres LEDs RGB, los cuales son distribuidos sobre el techo del escenario de trabajo conformando un triángulo. Dicha distribución de los LEDs es adecuada para el buen funcionamiento del algoritmo de trilateración. Tenga en cuenta que el LED RGB cuenta con tres canales independientes que pueden ser utilizados para transmitir datos mediante el sistema VLC y que son de utilidad para el posicionamiento. La Figura 4-3 muestra el método propuesto del sistema VLP para una red multi-celda con luminarias ( $L$ ) basadas en LEDs RGB. Se puede observar que el método propuesto consiste en tres etapas: (1) protocolo de transmisión, (2) receptor óptico y (3) proceso de localización. La primera etapa consiste en la selección de la cromaticidad según el espacio de color definido por el CIE 1931, la técnica de multiplexación en frecuencia y adición de corriente continua (FDM+DC), los LEDs RGB como transmisores VLC y el canal óptico basado en el modelo Lambertiano. El receptor óptico está basado en el modelo de un detector de luz Thorlabs PDA 36A, donde se explota la respuesta sensitiva a diferentes longitudes de onda del fotodiodo para estimar la potencia óptica de la luz RGB como una función de la fotocorriente [60,62]. Luego, el PDA 36A convierte la fotocorriente en una señal de voltaje mediante un amplificador de transimpedancia. Finalmente, la última etapa está orientada al proceso de localización, donde se propone descomponer la señal FDM entregada por el detector de luz mediante la FFT. Luego, se sugiere un análisis matemático para calcular la distancia Euclidiana entre el LED RGB transmisor y el receptor óptico, mediante el método RSS [50]. Para la estimación de las posiciones espaciales de cada luminaria, se propone el uso de las frecuencias portadoras como

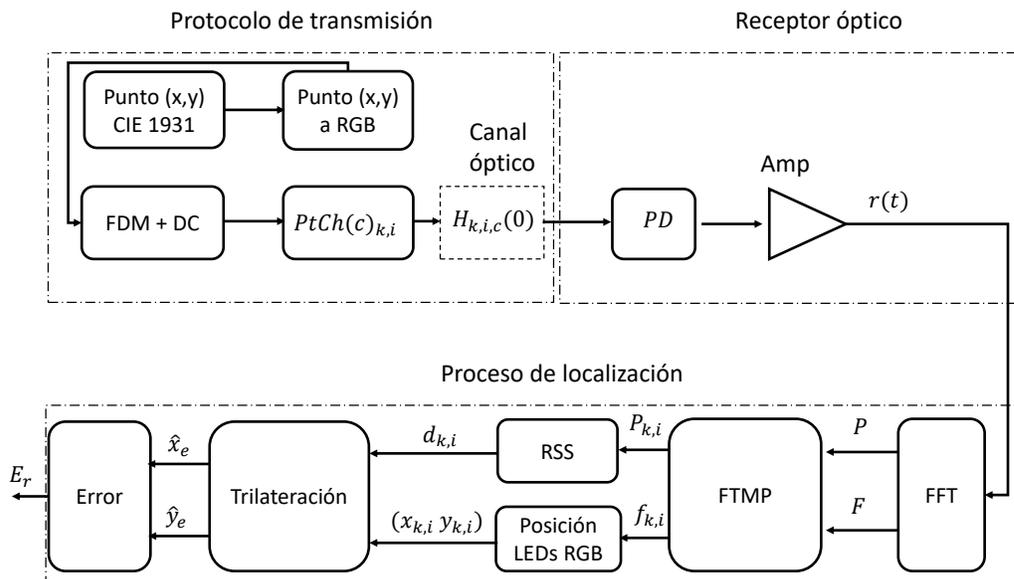


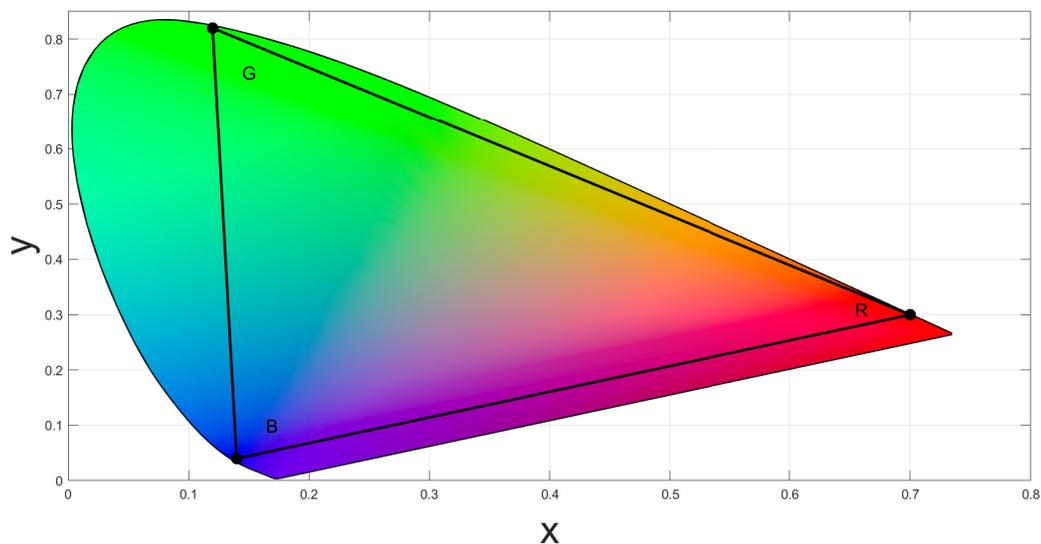
Figura 4-3: Método propuesto para el sistema VLP basado en LEDs RGB.

un posible identificador y la aplicación de un algoritmo de búsqueda de potencias máximas asociadas a dichas frecuencias (FTMP – frequencies-three maximum power), para identificar las tres luminarias que mayor energía aportan al sistema VLP. Seguidamente, se emplea el algoritmo de trilateración para estimar la posición del receptor óptico.

### 4.2.1. Protocolo de Transmisión

En esta Sección se introduce el protocolo de transmisión basado en LEDs RGB. Se emplea la notación  $PtCh(c)_{k,i}$  para hacer referencia a la potencia óptica transmitida por algún canal  $c$  del LED RGB  $i$  en la  $cell_k$ . Tenga en cuenta que  $c$  representa el canal R (red), G (green) o B (blue). Note que todos los canales del LED RGB son configurados para transmitir la misma señal portadora. Esto podría repercutir positivamente en la relación señal a ruido del sistema de comunicación. Adicionalmente, dicho método es compatible con la exploración del espacio de cromaticidad CIE 1931. En todas las celdas del sistema de posicionamiento, cada LED RGB transmiten una señal identificadora a través de una portadora con frecuencia específica. Este enfoque también facilita la exploración del espacio de color CIE 1931 y el mapeo de símbolos para el diseño de constelaciones de la misma forma que en los esquemas de modulación CSK. La Figura 4-4 ilustra el espacio cromático que puede generar un LED multicolor en el espacio CIE 1931, donde la región triangular está delimitada por los vértices de cada longitud de onda pico de un LED RGB.

De manera resumida, la etapa de transmisión del sistema VLP está conformada por múltiples procesos. El primer proceso es la selección del punto cromático en el espacio CIE 1931. Dicho punto cromático genera potencias ópticas normalizadas para cada canal de luz RGB. Luego,



**Figura 4-4:** Espacio cromático de un LED RGB según el CIE 1931.

esos niveles de potencia son usados para configurar el esquema FDM y el bloque de generación de corriente directa (DC). Las señales generadas por dicho sistema (FDM+DC) modulan la corriente de polarización de cada canal del LED RGB. La señal FDM codifica el identificador (ID) de cada LED transmisor mediante la frecuencia de la señal portadora, y la señal DC configura cada canal del LED RGB para que emita señales ópticas positivas. Este mecanismo garantiza que el LED RGB transmita el ID manteniendo el balance del color. En adelante se define de manera específica el protocolo de transmisión: primero, se selecciona un punto cromático  $(x_p, y_p)$  en el espacio de color mostrado en la Figura 4-4 para la configuración del transmisor. Dicho punto genera un vector de potencia ópticas normalizadas  $[P_r P_g P_b]^T$  a través de la ecuación 4-1. Cada punto cromático puede ser explorado en la transmisión de la señal portadora del sistema VLP:

$$\begin{bmatrix} P_r \\ P_g \\ P_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

Donde los pares ordenados  $(x_r, y_r)$ ,  $(x_g, y_g)$  y  $(x_b, y_b)$  representan los valores cromáticos  $(x, y)$  asociados a la longitud de onda pico de la fuente de luz R, G y B respectivamente [60]. Las señales de potencia óptica  $[P_r P_g P_b]^T$  para los LEDs RGB en la  $cell_k$  son transmitidos a través del canal óptico de espacio libre  $H_{k,i,c}(0)$ .

Usando la técnica FDM, el LED RGB  $i$  en la  $cell_k$  permite la transmisión de la señal identificadora  $PtCh(c)_{k,i}$  mediante una onda portadora RF de frecuencia específica a través de cada canal  $c$ . Como la señal portadora tiene variaciones negativas y positivas, una señal DC debe ser aplicada para que el LED funcione correctamente. Por lo tanto, la señal portadora transmitida por cada canal del LED RGB es mostrada en la ecuación 4-2:

$$PtCh(c)_{k,i} = \frac{P_c P_{led_c} \sin(2\pi f_{k,i} t) + 1}{2} \quad (4-2)$$

Donde  $P_c$  es la potencia óptica normalizada para el canal  $c$  y  $P_{led_c}$  corresponde a la potencia óptica de emisión máxima del canal  $c$  de los LEDs. Tenga en cuenta que estas potencias ópticas dependerán de las características del LED RGB empleado. La cromaticidad de la luz emitida por el LED RGB es establecida a través del proceso mencionado. Seguido del proceso de conversión del campo eléctrico al óptico, la señal óptica es propagada por el espacio libre, donde la ganancia DC del canal del sistema de comunicación por luz visible,  $H_{k,i,c}(0)$ , se compone de una componente con línea de vista LOS y sin línea de vista NLOS, tal que  $H_{k,i,c}(0) = H_{k,i,c}(LOS) + H_{k,i,c}(NLOS)$  [50]. Esto puede ser expresado por (4-3) [50]:

$$H_{k,i,c}(0) = \frac{(m+1)}{2\pi d_{k,i}^2} A_R \cos_{k,i}^m(\phi) \cos(\psi) T(\psi) g(\psi) + \frac{A_R}{A_{room}} \frac{\langle \rho_c \rangle}{1 - \langle \rho_c \rangle} \quad (4-3)$$

Donde  $A_{room}$  es área de la superficie del salón y  $\langle \rho_c \rangle$  representa el índice de reflectividad promedio del salón (el salón se refiere al escenario de trabajo). Por razones prácticas, en este trabajo se adopta valores para  $\langle \rho_r \rangle$ ,  $\langle \rho_g \rangle$  y  $\langle \rho_b \rangle$  propuestos en [35]. Por otra parte y con el objetivo de reducir la complejidad en el análisis matemático, se adopta la definición para el canal LOS propuesto por [53, 75]. Ellos asumen que  $\cos(\psi) = \cos(\phi)$  es también igual a la expresión  $h_{k,i}/d_{k,i}$  para una orientación horizontal del sensor. Donde  $h$  es la altura entre el receptor y el LED  $i$  en la celda  $k$ . Por lo tanto, la ecuación (4-3) puede ser reescrita como:

$$H_{k,i,c}(0) = \frac{(m+1)}{2\pi d_{k,i}^{m+3}} A_R h^{m+1} T(\psi) g(\psi) + \frac{A_R}{A_{room}} \frac{\langle \rho_c \rangle}{1 - \langle \rho_c \rangle} \quad (4-4)$$

### 4.2.2. Receptor Óptico

Se propone el uso de un solo fotodiodo como receptor VLC de las señales de luz RGB transmitidas por los LEDs. Tenga en cuenta, que dichas señales ópticas son emitidas de manera paralela, por lo que al incidir sobre la superficie sensible del fotodiodo, este proporciona una única señal de fotocorriente. Dicha señal es usada para el problema de posicionamiento. Por tanto, la señal óptica total recibida por el fotodiodo  $PrCh(c)$  puede ser determinada como sigue:

$$PrCh(c) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 PtCh(c)_{k,i} H_{k,i,c}(0) \quad (4-5)$$

Adicionalmente, la señal  $PrCh(c)$  induce una fotocorriente en el fotodiodo, la cual es convertida a una señal de voltaje  $r(t)$  mediante un amplificador de transimpedancia. Esto, tomando como referencia el modelo del detector de luz Thorlabs PDA 36A, considerado como un candidato potencial para la demostración experimental. La señal  $r(t)$  es distorsionada por ruido AWGN  $n(t)$ , como se muestra en la ecuación 4-6:

$$r(t) = G_{amp} S PrCh(c) R(\lambda_c) + n(t) \quad (4-6)$$

Donde  $G_{amp}$  corresponde a la ganancia del amplificador transimpedancia,  $S$  es el factor de escala, y los valores escalares de  $R(\lambda_c)$  para  $R(\lambda_R)$ ,  $R(\lambda_G)$  y  $R(\lambda_B)$  determinan la responsividad asociada a las longitudes de onda de los canales R, G y B respectivamente [76]. Tenga en cuenta que la potencia óptica recibida  $PrCh(c)$  está integrada por todas las señales portadoras transmitidas por los canales RGB de las luminarias. Por lo tanto, el esquema planteado ofrece una estructura FDM simplificada, donde la complejidad del receptor VLC también se ve impactada positivamente, ya que no es necesario emplear múltiples fotodiodos ni filtro RGB. Por lo tanto, en el proceso de localización se requiere la descomposición de la señal

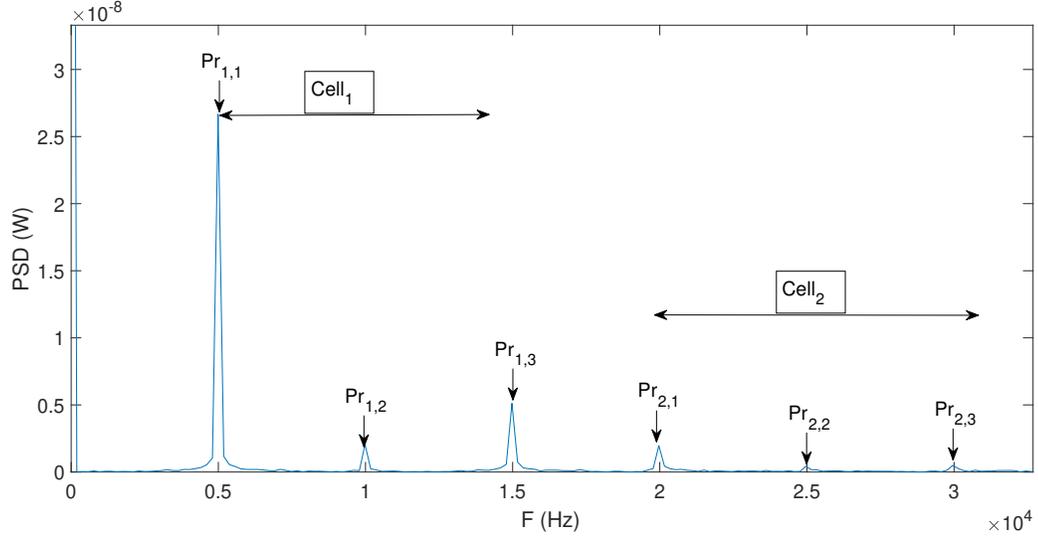
recibida por el detector de luz mediante la aplicación de la FFT. Este proceso permite estimar la densidad espectral de potencia (PSD - power-spectral density) de la señal óptica recibida, como se muestra en la ecuación (4-7):

$$PSD [PrCh(c)R(\lambda_c)] = PSD \left[ \frac{r(t)}{G_{amp}S} \right] \quad (4-7)$$

### 4.2.3. Proceso de Localización

En esta Sección se describe el proceso para la estimación de la posición del receptor en el sistema VLP basado en LEDs RGB. Por simplicidad, el análisis es propuesto en dos fases. Primero, la estimación de la distancia Euclidiana entre el receptor de luz y los LEDs RGB transmisores es computada en función de la magnitud de la potencia óptica incidente en el receptor de luz. Por tanto, dicha potencia óptica es estimada con el uso de la señal de voltaje generada con el sensor de luz mediante la FFT y la técnica RSS. Posteriormente, un simple algoritmo para la identificación de las frecuencias portadoras es utilizado para la estimación de la posición espacial de cada LED RGB. La segunda fase está relacionada con la estimación de la posición del receptor de luz mediante el uso del algoritmo de trilateración y los parámetros estimados en la primera fase. Con el fin de simplificar el análisis del posicionamiento para el sistema VLP en estudio, la Figura 4-5 muestra un ejemplo de la densidad espectral de potencia estimada para el sistema VLP con dos celdas. Esto considerando un punto de referencia del sensor cercano a la luminaria 1 y 3. En este ejemplo, se emplean 6 luminarias RGB y cada una transmite una portadora con frecuencia única. Note que  $Pr_{k,i}$  es el valor de potencia óptica máxima estimada por el receptor de luz para los canales R, G y B de la luminaria  $i$  en la  $cell_k$ . Esto se soporta en la ecuación 4-5. Por lo tanto, para calcular el valor de  $Pr_{k,i}$ , se aplicó la integral a la señal PSD en 4-7 en el intervalo de frecuencia  $f_{k,i} \pm \Delta$  como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Pr_{k,i} = R(\lambda_c)PtCh(c)_{k,i}H_{k,i,c}(0) = max \left( \int_{f_{k,i}-\Delta}^{f_{k,i}+\Delta} PSD \left[ \frac{r(t)}{G_{amp}S} \right] df \right) \quad (4-8)$$



**Figura 4-5:** PSD del vector de potencia óptica recibido por el sensor de luz para el sistema VLP basado en LEDs RGB.

Donde  $f_{k,i}$  representa la frecuencia de la señal portadora para la luminaria  $i$  en la  $cell_k$  y  $\pm\Delta$  son las frecuencias límites usadas para delimitar el área de la potencia máxima  $Pr_{k,i}$ . Tenga en cuenta que para el sistema VLP, solo tres señales ópticas son necesarias para el problema de posición en dos dimensiones (2D). En consecuencia, se propone un algoritmo básico para identificar en  $Pr_{k,i}$  las 3 potencias que mayor energía aportan al sistema y las frecuencias asociadas. Las potencias identificadas son empleadas para estimar las distancias Euclidianas  $\hat{d}_{k,i}$  entre el LED transmisor y el receptor de luz. Mientras que las frecuencias asociadas a dichas señales, permiten identificar la luminaria  $i$  transmisora en la  $cell_k$ , donde la posición espacial  $(x_{k,i}, y_{k,i})$  es conocida. Tenga en cuenta que las potencias y distancias estimadas son valores escalares. Por lo tanto, para calcular la distancia  $\hat{d}_{k,i}$ , se consideró la raíz cuadrática media (RMS - root mean square) de los valores de potencia óptica transmitidos por el LED para cada canal  $c$ , con  $P_{trms}(c)_{k,i} = RMS(PtCh(c)_{k,i})$ . Adicionalmente, cabe señalar que cada LED RGB transmite la misma señal portadora a través de los canales  $c$ . Por lo tanto, la contribución total del valor RMS de la potencia óptica emitida por cada canal  $c$ , fue considerado como una sumatoria. En consecuencia y sustituyendo la ecuación 4-4 en 4-8, la distancia Euclidiana es estimada como se muestra en la ecuación 4-9:

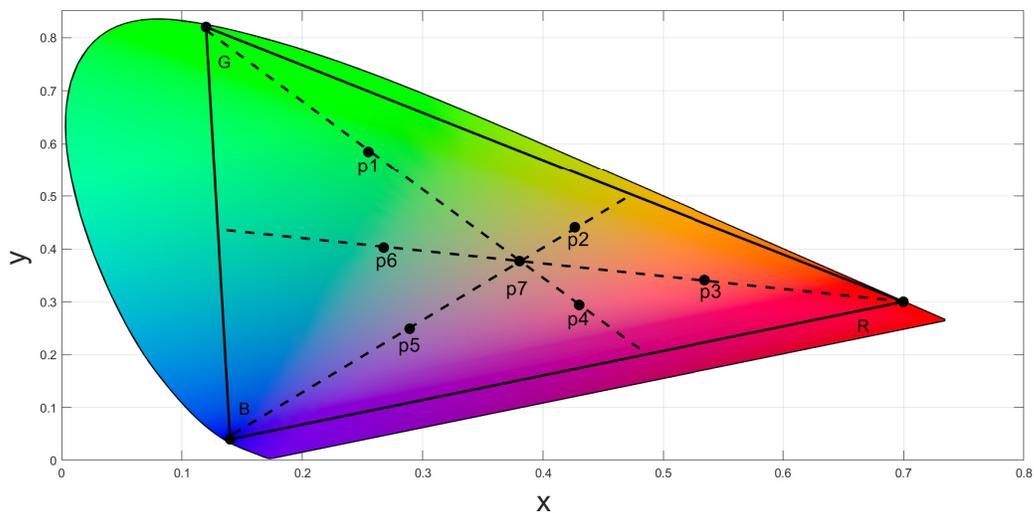
$$\hat{d}_{k,i} = \sqrt[m+3]{\frac{(m+1) \sum_{c=R}^B (R(\lambda_c) P_{trms}(c)_{k,i}) A_R h^{m+1} T(\psi) g(\psi)}{2\pi (Pr_{k,i} - \sum_{c=R}^B (R(\lambda_c) P_{trms}(c)_{k,i}) H_{k,i,c}(NLOS))}} \quad (4-9)$$

Finalmente, los valores estimados para  $\hat{d}_{k,i}$  y  $(x_{k,i}, y_{k,i})$  son empleados para proyectar la posición del receptor óptico  $(\hat{x}_e, \hat{y}_e)$  mediante el algoritmo de trilateración representado por la Ecuación 3-10.

### 4.3. Resultados y Discusión

En esta Sección se presenta el análisis de resultados del rendimiento del sistema VLP basado en LEDs RGB, considerando el grado de libertad de la cromaticidad y su impacto sobre algunos indicadores de desempeño. Por lo tanto, se propone explorar un diagrama de constelación para 7 puntos cromáticos  $p_1$  a  $p_7$  (similar a 7-CSK), como se muestra en la Figura 4-6. Dichos puntos cromáticos fueron seleccionados sobre el espacio de color CIE 1931.

Tenga en cuenta que el método propuesto en la Figura 4-3 es ejecutado para cada punto cromático emitido por el LED RGB. Se empleó el método Monte Carlo para evaluar el rendimiento del error de posición del sistema VLP propuesto. Los resultados por simulación son presentados usando diferentes posiciones de referencia del sensor de luz para cada punto cromático configurado en el transmisor VLP. Las coordenadas cromáticas sobre el espacio CIE 1931 de los canales rojo, verde y azul del LED fueron (0.70, 0.30), (0.19, 0.78), and (0.09, 0.13) respectivamente. Los valores específicos para los puntos cromáticos  $(x_p, y_p)$  y el vector de potencia óptica normalizada  $[P_r \ P_g \ P_b]^T$  para los canales RGB, son mostrados en la Tabla 4-1. Cabe señalar que cada vector de potencia óptica satisface la regla  $P_r + P_g + P_b = 1$  dada por el estándar CIE 1931 [59]. La simulación para el sistema VLP en estudio contempla dos celdas y 6 luminarias RGB. Dicha configuración permitirá validar el método propuesto en la Figura 4-3. Vale resaltar que esta arquitectura VLP podrá ser escalada para múltiples celdas en función del área del escenario de aplicación.



**Figura 4-6:** Puntos cromáticos en el espacio CIE 1931 para explorar en el sistema VLP basado en LEDs RGB.

**Tabla 4-1:** Coordenadas cromáticas y vector de potencia óptica normalizada.

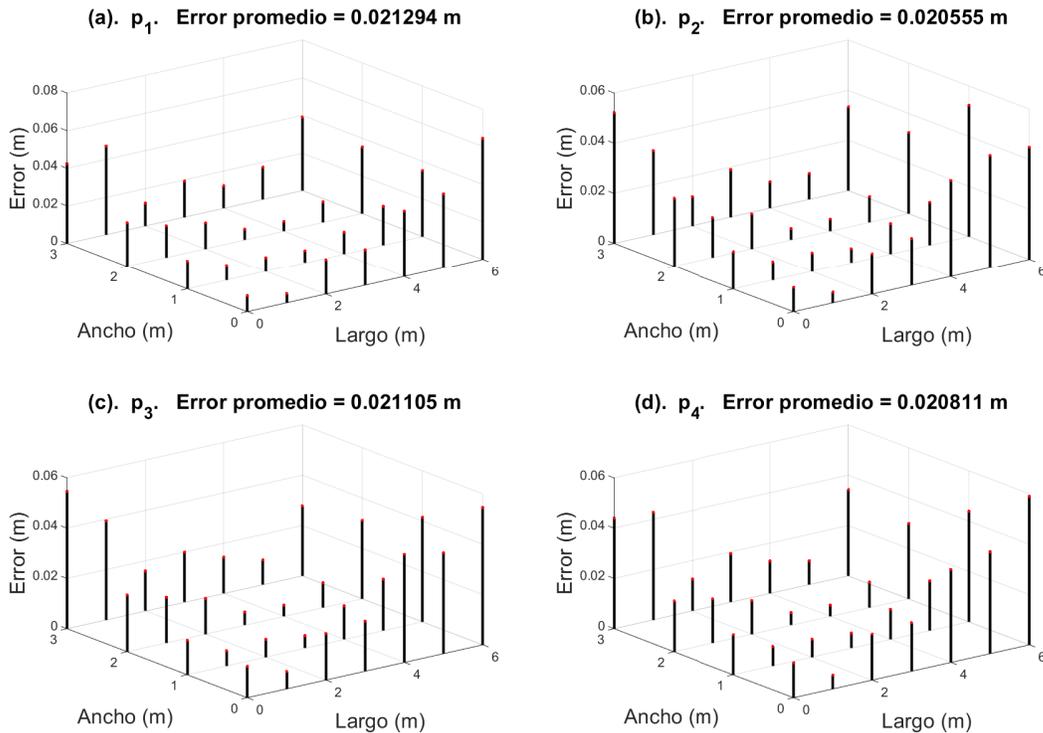
Punto cromático	$(x_p, y_p)$	$[P_r P_g P_b]^T$
$p_1$	(0.2549, 0.5849)	$[0.2274 \ 0.6228 \ 0.1498]^T$
$p_2$	(0.4264, 0.4410)	$[0.5236 \ 0.3396 \ 0.1369]^T$
$p_3$	(0.5349, 0.3411)	$[0.7105 \ 0.1492 \ 0.1403]^T$
$p_4$	(0.4310, 0.2940)	$[0.5233 \ 0.1512 \ 0.3255]^T$
$p_5$	(0.2892, 0.2490)	$[0.2728 \ 0.1770 \ 0.5502]^T$
$p_6$	(0.2676, 0.4024)	$[0.2416 \ 0.3841 \ 0.3743]^T$
$p_7$	(0.3804, 0.3769)	$[0.4395 \ 0.2854 \ 0.2751]^T$

Los parámetros usados en la simulación del sistema VLP son resumidos en la Tabla 4-2. La distancia entre la superficie del fotodiodo y el techo es fijada a 2.2 m. Esto se asume, ya que en aplicaciones reales el usuario podría portar el receptor VLC a una altura ( $z_e$ ) aproximada de 0.8 m del piso. El área del espacio de trabajo fue dividida con una rejilla de  $4 \times 7$  puntos sobre el plano X–Y. Cada punto de la rejilla indica un punto de prueba correspondiente a la coordenada real ( $x_e, y_e$ ) del fotodiodo (receptor óptico). Los transmisores VLP basados en LEDs RGB transmitirán las señales portadoras con diferentes frecuencias. Tenga en cuenta que la selección de la máxima frecuencia de la señal portadora podría impactar la complejidad del sistema de procesamiento, debido a la frecuencia de muestreo y el número de puntos de la FFT. Por lo tanto, para este trabajo se seleccionaron frecuencias máximas de 30 kHz para las señales portadoras, lo cual habilita sistemas de procesamiento de baja capacidad

**Tabla 4-2:** Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Dimensión	$X = 6 \ Y = 3 \ Z = 3 \text{ m}$	Potencia óptica por canal $c$	3.333 W
Coordenada RGB 1	(0.75, 0.75, 3) m	$f_{1,1}$	5 kHz
Coordenada RGB 2	(1.50, 2.25, 3) m	$f_{1,2}$	10 kHz
Coordenada RGB 3	(2.25, 0.75, 3) m	$f_{1,3}$	15 kHz
Coordenada RGB 4	(3.75, 2.25, 3) m	$f_{2,1}$	20 kHz
Coordenada RGB 5	(4.50, 0.75, 3) m	$f_{2,2}$	25 kHz
Coordenada RGB 6	(5.25, 2.25, 3) m	$f_{2,3}$	30 kHz
Ángulo medio de visión del LED	$\phi/2 = 60^\circ$	$R(\lambda_R)$	0.41 A/W
Área del fotodiodo ( $A_R$ )	$13^{-6} \text{ m}^2$	$R(\lambda_G)$	0.2 A/W
$G_{amp}$	$0.75^6 \text{ V/A}$	$R(\lambda_B)$	0.12 A/W
Factor de escala ( $S$ )	0,5	ruido (RMS)	$340^{-6} \text{ V}$
$T(\psi)$	1	$g(\psi)$	1
Fs	96 kHz	puntos FFT	1500
$\Delta$	300 Hz	$\langle \rho_r \rangle$	0.0733
$\langle \rho_g \rangle$	0.0450	$\langle \rho_b \rangle$	0.0558
$A_{room}$	$90 \text{ m}^2$	$m$	1

computacional equipados con (ADC - analog to digital converter) con frecuencia de muestreo de 96 kHz [53]. Para el modelo del canal VLC, se usó la definición propuesta en [50] para el canal NLOS y se adoptó el índice de reflexión promedio propuesto en [35]. Sin embargo, los coeficientes de reflexión presentados en [35] fueron estimados considerando el espectro de potencia de un LED de luz blanca como fuente de emisión. En consecuencia, los valores para  $\langle \rho_r \rangle$ ,  $\langle \rho_g \rangle$  y  $\langle \rho_b \rangle$  del LED RGB adoptado en este trabajo son valores aproximados de las componentes R, G y B aportados por el sistema de iluminación propuesto por [35]. Seguidamente, se estimó la potencia óptica aportada por las luminarias mediante la PSD de acuerdo a la ecuación 4-7, donde las tres potencias ópticas máximas recibidas por el fotodiodo para los canales R, G y B fueron computados con la ecuación 4-8. Después, el resultado de la posición  $(\hat{x}_e, \hat{y}_e)$  del receptor puede ser obtenido al resolver las ecuaciones 4-9 y 3-10. Tenga en cuenta que el error de posición es definido como la distancia Euclidiana entre la coordenada real  $(x_e, y_e)$  y la coordenada estimada  $(\hat{x}_e, \hat{y}_e)$  del receptor óptico para todos los puntos de prueba.



**Figura 4-7:** Error de posición para los puntos cromáticos  $p_1$  a  $p_4$ .

### 4.3.1. Análisis de la Precisión

Las Figuras 4-7 y 4-8 muestran los resultados del error de posición del receptor óptico para todos los puntos cromáticos ( $p_1-p_7$ ) testeados. Se logró evidenciar un rendimiento del error de posición similar para todos los puntos cromáticos. Se puede ver que el error de posición más bajo fue obtenido para el punto  $p_6$ , sobre un error promedio de 1.96 cm, como se muestra en la Figura 4-8b. En contraste, el  $p_5$  mostró un error promedio alto de alrededor de 2.13 cm, como se muestra en la Figura 4-8a. Estas pequeñas variaciones en el error de localización promedio para los diferentes puntos cromáticos podría estar relacionada con los efectos de las componentes NLOS, el vector de responsividad y el ruido asociado al receptor óptico o el estimador de potencias ópticas máximas. El rendimiento del sistema VLP mostró un error de localización ligeramente mayor para algunos puntos cromáticos, cuando el sensor de luz estaba ubicado en las esquinas o laterales del escenario de trabajo. Esto se debe a que en dichas zonas las distancias entre las luminarias y el receptor óptico son máximas, lo cual se puede comprobar con la ecuación (4-9) y, en consecuencia, el sistema de recepción experimenta una baja potencia óptica aportada por las luminarias RGB sobre la superficie del fotodiodo [9, 77]. Sin embargo, el resultado del máximo error de localización promedio que

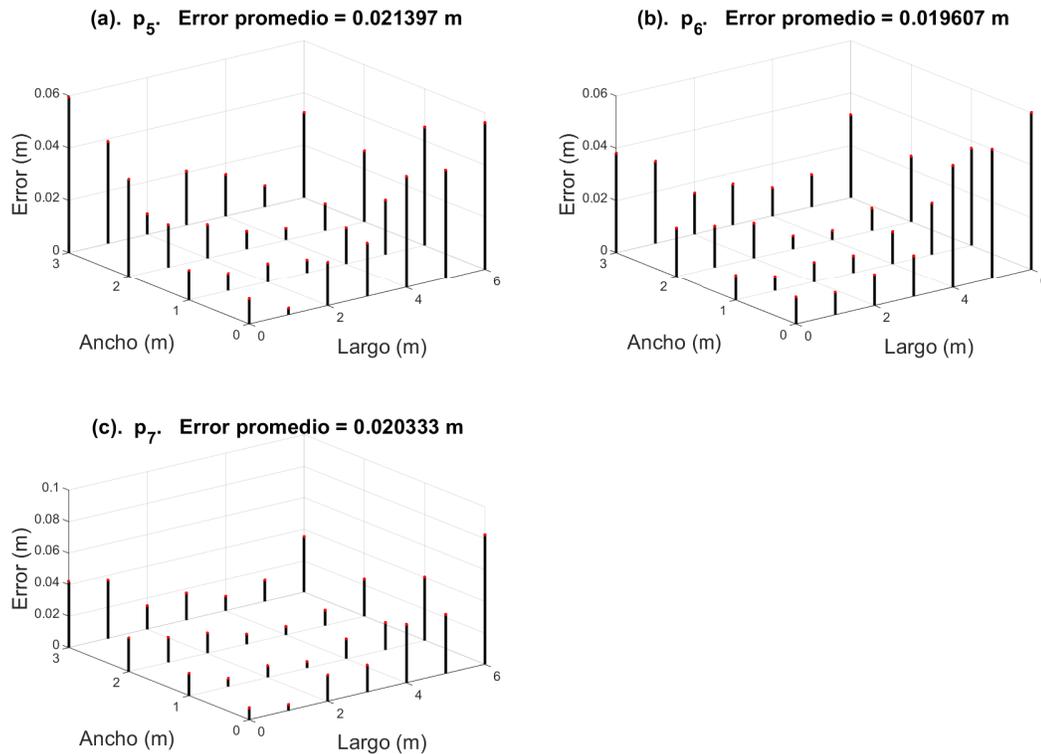


Figura 4-8: Error de posición para los puntos cromáticos  $p_5$  a  $p_7$ .

fue de 2.13 cm mostró un rendimiento aceptable del sistema VLP basado en LEDs RGB. Estos resultados validan el método propuesto y las ecuaciones derivadas en el proceso de estimación de parámetros. Se deja claro que cualquier punto cromático en el espacio CIE 1931 podrá ser explotado en el diseño del sistema VLP en estudio. No obstante, el balance del color podría ser configurado de acuerdo a los requerimientos de iluminación exigidos por el escenario de aplicación. Por ejemplo, el punto de color  $p_7$  (ver Figura 4-8c) puede ser usado si el escenario de aplicación requiere un balance de luz blanca. De otra manera, la cromaticidad aportada por los puntos  $p_1$  a  $p_6$  puede ser más aconsejable para escenarios donde el color de la luz emitida también son una meta. Por ejemplo, en los museos, la arquitectura VLP propuesta a parte de prestar el servicio de localización, también puede permitir la planificación del color de las luminarias para algunas artes o especímenes.

El sistema VLP basado en LEDs RGB mostró un buen rendimiento del error comparado con arquitecturas tradicionales de sistemas VLP basados en LEDs de luz blanca [33, 46, 78]. Adicionalmente, se observó que la arquitectura VLP propuesta presenta un impacto positivo en la relación señal a ruido, ya que las luminarias transmiten la misma señal portadora por los canales RGB, mientras que en LEDs blancos solo emplea un solo canal [33, 46, 78]. Adicionalmente, este sistema VLP también permite la manipulación de la temperatura del color generado por las luminarias RGB considerando el estándar CIE 1931. Dicha característica no es posible lograrla con LEDs de luz blanca. Sin embargo, es importante resaltar que el sistema VLP propuesto requiere más componentes de hardware que el basado en LEDs blancos, debido a los múltiples canales que ofrece el LED RGB. Por otra parte, la literatura reporta trabajos VLP basados en LEDs multicolor [54, 65], sin embargo, la arquitectura VLP presentada en dichas referencias solo contempla 4 LEDs RGB y una celda. Adicionalmente, no se evidencia un modelo matemático para el sistema VLP donde se considere las múltiples longitudes de onda de los transmisores VLP basados en LEDs RGB y tampoco la exploración del espacio cromático y su evaluación en el rendimiento del error de localización.

## 4.4. Conclusiones

En éste Capítulo se presentó un diseño novedoso de un sistema VLP basado en LEDs RGB como transmisores, considerando múltiples celdas y un esquema de multiplexación por división de frecuencia. Se propuso un sistema de posicionamiento adoptando un canal VLC con componentes LOS y NLOS, las cuales fueron evaluadas por simulación. Adicionalmente, se introduce un nuevo método para la estimación de la posición del receptor óptico en una red multi-celda, sugiriendo la exploración de múltiples puntos cromáticos en el espacio de color CIE 1931 para la configuración del transmisor. Este sistema VLP adopta la técnica RSS y el algoritmo de trilateración que combina la identificación de frecuencias de las señales portadoras para el problema de localización. El diseño propuesto ofrece un método para la estimación de los identificadores de las luminarias transmisoras sencillo y flexible

que usando identificación de frecuencias combinado con técnicas de modulación digital para el sistema VLC que tradicionalmente se emplea en VLP. Este sistema habilita el control de la cromaticidad del sistema de iluminación al mismo tiempo que facilita la transmisión de señales portadoras mediante VLC ofreciendo el servicio de localización de manera simultánea.

Un ejemplo de prueba de concepto fue desarrollado por simulación para validar la idea mencionada. Se simuló un escenario de aplicación práctico configurando la altura del salón a 3 m con una distancia de 2.2 m entre el LED RGB y el sensor óptico. Adicionalmente, la simulación numérica bajo el método Monte Carlo ha sido conducida en pro de validar la expresión analítica derivada para la estimación de las distancias Euclidianas entre el transmisor y el receptor VLC. Los resultados del rendimiento del error de localización, mostraron buena sintonía entre la simulación y el análisis teórico. Se observó un mejor desempeño en la exactitud del error promedio de posición para el punto cromático  $p_5$  comparado con los otros puntos cromáticos. Sin embargo, el error promedio de posición para todos los puntos cromáticos fue relativamente pequeño (menor a 2.2 cm), lo cual indica que el análisis matemático planteado para el sistema VLP es consistente y no requiere ajustes analíticos si se varía el croma de la luz generada por el LED RGB. El sistema VLP propuesto podría ser empleado en diferentes escenarios de aplicación que requieran servicios de localización, donde el control de la cromaticidad de la luz también es una meta. El punto cromático  $p_7$  puede ser recomendado para aplicaciones VLP donde se requiera un balance de color blanco. Más importante, este sistema VLP basado en LEDs RGB mantiene la compatibilidad con el uso del estándar CIE 1931.

# 5 Demostración Experimental del Sistema VLP Basado en LEDs Multicolor

En esta Sección se presenta la metodología implementada para abordar la demostración experimental del sistema VLP. De manera general, se presenta el diseño experimental, la fabricación y caracterización del transmisor y del receptor VLP, y los resultados. En adelante, se muestra de manera detallada el desarrollo de cada una de las actividades mencionadas.

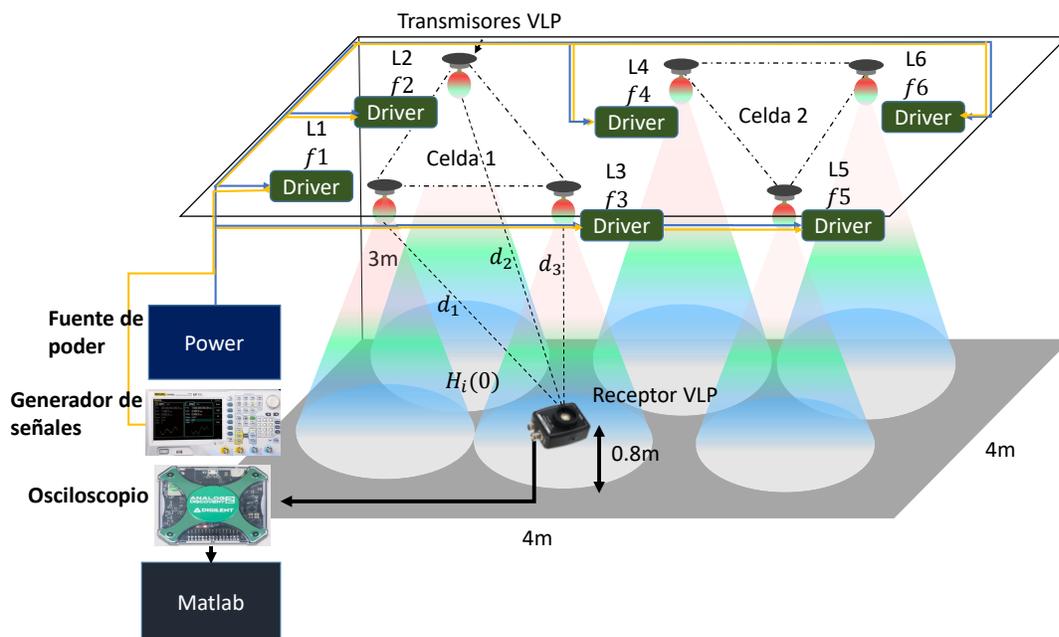


Figura 5-1: Esquema general del sistema experimental.

## 5.1. Diseño Experimental

En esta Sección se expone el diseño y validación del experimento VLP para el concepto presentado en la Sección 4. Para esta fase inicial del proyecto se optó por llevar a cabo la

prueba de concepto en el laboratorio de Visión Artificial y Fotónica del ITM, donde las condiciones de iluminación fueron controladas. De manera general, la Figura 5-1 representa la infraestructura del sistema VLP basada en un receptor óptico y 6 LEDs RGB que integran 2 celdas. Las coordenadas que representan cada posición de los transmisores VLP ( $L_1 - L_6$ ) y las frecuencias de las señales portadoras, se muestran en la Tabla 5-1. Adicionalmente, la Figura 5-1 muestra las dimensiones espaciales del escenario de trabajo al igual que los instrumentos de laboratorio requeridos para la generación de las portadoras análogas aplicadas a los LEDs y el procesamiento de las señales entregadas por el detector óptico. Tenga en cuenta que las referencias técnicas de los instrumentos de laboratorio y los dispositivos electrónicos y ópticos, son descritos en las Secciones de diseño y fabricación del transmisor y del receptor VLP. Por otra parte, la fuente de poder proporciona la corriente de polarización para cada LED RGB, donde la magnitud de dicha corriente esta en función del punto cromático seleccionado en el espacio de color CIE 1931. Esto se trata en detalle en la Sección 5.1.4 (Estimación y Ajuste del Punto Cromático Generado por el Transmisor VLP). Cada LED RGB cuenta con un driver, el cual se encarga de sumar la señal portadora con la corriente de polarización para generar la potencia óptica. El receptor VLP transforma las potencias ópticas provenientes de los LEDs RGB en una señal de voltaje. Dicha señal de voltaje es procesada por el osciloscopio Digilent y posteriormente almacenada en un archivo .txt. Finalmente, se emplea el programa Matlab para leer los datos almacenados en dicho archivo y emplearlos como insumo en el algoritmo de localización, el cual se introduce en la Sección 5.3.1 (Validación del Sistema VLP y Análisis de la Precisión).

**Tabla 5-1:** Coordenadas para cada LED RGB y frecuencia de la portadora.

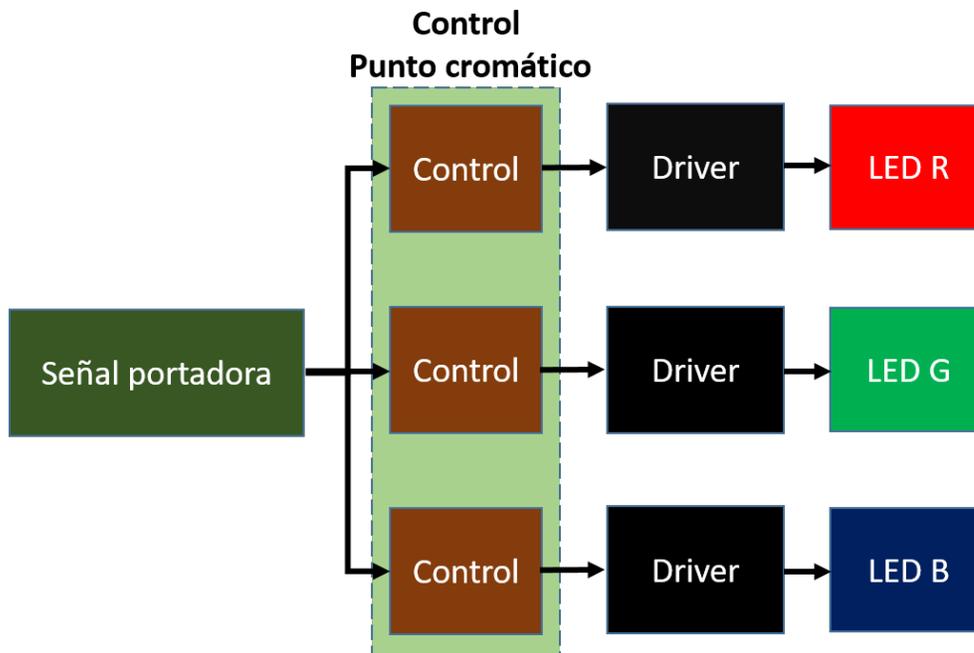
Transmisor	$(x, y, z)$ m	Frecuencia (kHz)
$L_1$	(0.5, 1.25, 3)	$f_1 = 5$
$L_2$	(1.25, 2.75, 3)	$f_2 = 10$
$L_3$	(1.75, 1.25, 3)	$f_3 = 15$
$L_4$	(2.25, 2.75, 3)	$f_4 = 20$
$L_5$	(2.75, 1.35, 3)	$f_5 = 25$
$L_6$	(3.5, 2.75, 3)	$f_6 = 30$

En adelante se describe de manera detallada las etapas de fabricación y caracterización del transmisor y el diseño del receptor VLP.

### 5.1.1. Diseño y Caracterización del Transmisor VLP

Inicialmente se realizó una búsqueda de artículos de investigación sobre sistemas VLP con énfasis en demostraciones experimentales. Se analizaron los circuitos electrónicos empleados para modular las corrientes de polarización de las luminarias. Dicho procedimiento permitirá

identificar componentes ópticos y electrónicos para ser empleados en el diseño del driver del LED RGB. Tenga en cuenta que tales componentes para el diseño del driver deberán permitir la manipulación de la cromaticidad del LED al igual que la modulación de las señales portadoras. En la Figura 5-2 se proyecta un diagrama por bloques del transmisor VLP. Se puede observar que la misma señal portadora es aplicada a cada driver que controla los canales R, G y B del LED. Dicha configuración debe ser garantizada para cumplir con las exigencias del protocolo de transmisión según la ecuación 4-2. De manera análoga, el diseño del circuito para controlar el punto cromático en el espacio de color CIE 1931, debe ser flexible en cuanto a la configuración de las potencias ópticas para cada canal del LED RGB cumpliendo la regla presentada en la ecuación 4-1. Considerando lo anterior, es probable que el circuito electrónico para el transmisor VLP sea poco convencional a los presentados en la literatura, puesto que un gran porcentaje de artículos de investigación emplean arquitecturas de posicionamiento con tecnología VLC basadas en luminarias de luz blanca [6, 79].



**Figura 5-2:** Diagrama de bloques del transmisor VLP.

Finalmente se empleó el software de código abierto CircuitMaker para el diseño de los circuitos electrónicos y la generación de los archivos Gerber para la fabricación de la placa de circuito impreso (PCB - printed circuit board). En este sentido, se procedió a fabricar y ensamblar las componentes electrónicas y ópticas.

Por otra parte, se realizó el siguiente experimento para caracterizar el transmisor VLP en función de la respuesta en frecuencia. Por lo tanto, se estimó el ancho de banda (BW - bandwidth) del driver para cada canal de transmisión del LED RGB, mediante el montaje experimental mostrado en la Figura 5-3 a modo de diagrama por bloques. Se inyectó al driver

una señal sinusoidal de amplitud constante ( $1 V_{pp}$ ) y frecuencia variable mediante el generador de señales RIGOL DG 4162. En esta parte, se aseguró que la corriente de polarización para cada canal RGB no generara distorsión a la señal sinusoidal. Posteriormente, se empleó el osciloscopio TELEDYNE LECROY WAVEACE 2032 para analizar la señal de entrada al driver y la señal modulada aplicada al terminal del LED RGB, con el fin de estimar el BW a  $-3$  dB.



Figura 5-3: Procedimiento para estimar el ancho de banda del transmisor VLP.

### 5.1.2. Linealizar la Respuesta Electro-óptica del LED Multicolor

La relación entre la potencia óptica emitida por el LED RGB y la corriente de polarización tiene un comportamiento no lineal, por lo que se aplicó el método de linealización propuesto por el autor en el trabajo [60] y que se describe en la Sección 5.3. Dicho método permitió encontrar las ecuaciones matemáticas que relacionan la corriente de polarización del LED RGB y la potencia óptica emitida, las cuales son mostradas en la Sección 5.3 ecuación 5-3. Esto es necesario para el proceso de transmisión y la configuración de la cromaticidad generada por las fuentes de luz RGB. Por lo tanto, la caracterización del LED RGB fue realizada en el laboratorio de Óptica y Fotónica del ITM, donde las condiciones de iluminación fueron controladas, dejando solo la proveniente del LED RGB. Cada canal RGB fue caracterizado mediante el siguiente procedimiento. Inicialmente se aplicó una corriente eléctrica variable (0 - 300) mA de polarización a cada canal del LED RGB de manera individual mediante la fuente de poder EA-PS 3016-20B. Posteriormente, se midió la potencia óptica emitida por cada canal del LED mediante el instrumento Thorlabs PM100D acoplado al sensor óptico S120C. Dicho instrumento fue sintonizado a la longitud de onda pico del LED RGB. Los datos de corriente de polarización y potencia óptica emitida por cada canal del LED RGB fueron almacenados en un archivo .txt. Finalmente, se empleó la función polyfit de Matlab para analizar y linealizar los datos previamente guardados.

### 5.1.3. Estimar la Longitud de Onda Pico del LED Multicolor

El transmisor VLP basado en LEDs RGB permite reproducir cualquier color que se encuentre en el área cromática formada por las longitudes de onda pico asociadas a cada canal RGB en el espacio de color CIE 1931 (ver Figura 4-4), similar al diseño de constelaciones para la modulación por color en sistemas VLC [60]. Por lo tanto, identificar tales longitudes de onda es una meta. En consecuencia, la estimación del espectro de emisión del LED RGB para identificar la longitud de onda pico para el canal rojo, verde y azul, es mostrado en la Figura 5-4. Se empleó el analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6373. Los canales del LED RGB fueron polarizados con una corriente eléctrica de 150 mA. Finalmente, la luz generada fue canalizada por la fibra óptica EOS-A637940 para llevar la muestra de luz al analizador YOKOGAWA. La longitud de onda pico del LED RGB fueron estimadas como sigue:  $\lambda_R = 636$  nm para el canal rojo,  $\lambda_G = 523$  nm para el canal verde y  $\lambda_B = 426$  nm para el canal azul.

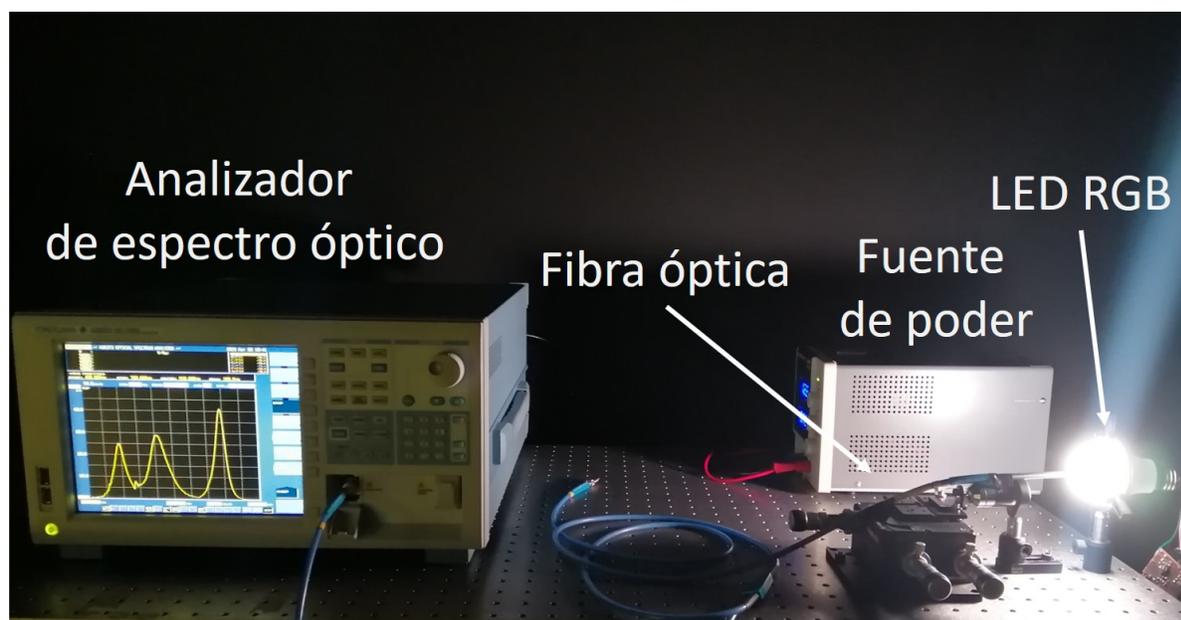


Figura 5-4: Estimación del espectro óptico generado por el LED RGB.

### 5.1.4. Estimación y Ajuste del Punto Cromático Generado por el Transmisor VLP

El sistema VLP basado en LEDs RGB posibilita la manipulación del grado de libertad de la cromaticidad en el transmisor. Para ello se propuso el experimento mostrado en la Figura 5-5 para evaluar el punto cromático en el espacio de color CIE 1931 y de ser necesario, el usuario podría ajustar la potencia óptica de la luminaria RGB. El método utilizado en dicho experimento es similar al empleado por el autor en el año 2020 para explorar la modulación

por color CSK y la pantalla de un dispositivo móvil como transmisor de datos [80], pero con la salvedad de que en [80] solo se consideró la identificación de los símbolos de la modulación M-CSK. En este experimento, se empleó el sensor de color ADJD-S311 que integra los circuitos electrónicos necesarios para acondicionar las señales de fotocorriente y entregar los datos a un microcontrolador (MCU) mediante el protocolo de comunicación (I2C - inter integrated circuit). Los datos fueron transmitidos al computador mediante comunicación serial empleando el microcontrolador ATmega 328P. Finalmente se usó la herramienta Matlab para procesar los datos y estimar el punto cromático en el espacio de color CIE 1931. Tenga en cuenta que el sensor RGB requiere de un proceso de calibración para un correcto funcionamiento, el cual se describe a continuación.

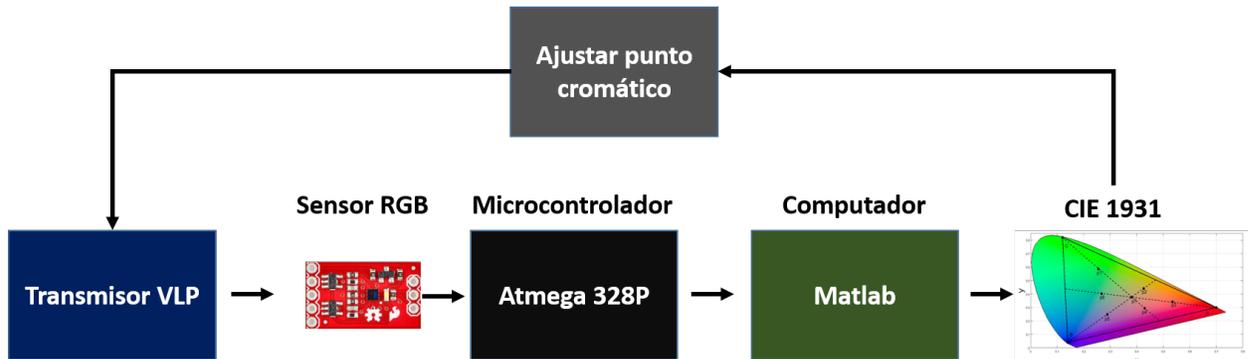


Figura 5-5: Estimación y ajuste del punto cromático generado por el LED RGB.

### 5.1.5. Calibración del Sensor RGB

El método para la calibración del sensor RGB es mostrado en la Figura 5-6. Inicialmente cada canal del LED RGB fue activado de manera individual con una corriente de polarización de 300 mA.

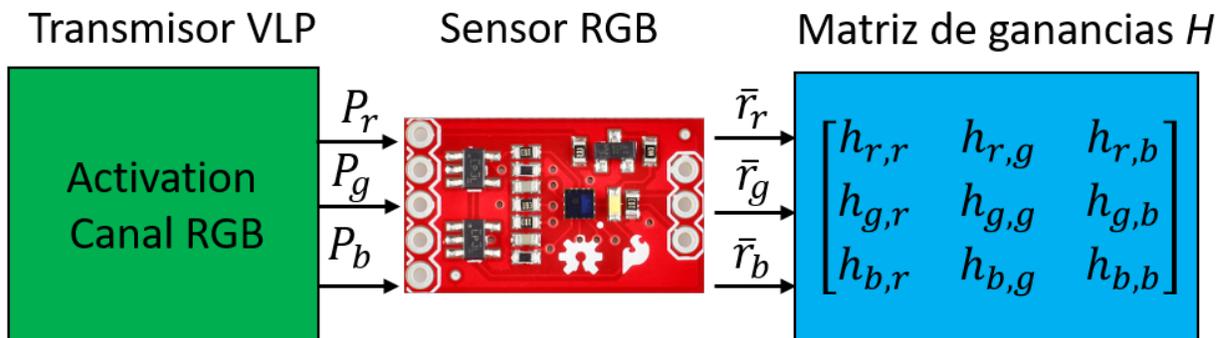


Figura 5-6: Método para calibrar el sensor e identificar la matriz de ganancia óptica para las señales generadas por los canales RGB.

El ADJD tiene un conversor análogo a digital con resolución de 10 bits, por lo que las señales de salida  $\bar{r}_r$ ,  $\bar{r}_g$  y  $\bar{r}_b$  del sensor R,G y B respectivamente, oscilan entre 0 y 1023. Se registró el valor digital entregado por el sensor de luz para cada longitud de onda incidente. Es decir, se activa solo el canal R ( $P_r$ ) y se registra en el detector la respuesta del sensor R ( $\bar{r}_r = h_{r,r}$ ), G ( $\bar{r}_g = h_{r,g}$ ) y B ( $\bar{r}_b = h_{r,b}$ ). El mismo procedimiento fue aplicado para los otros canales de transmisión [2]. Finalmente, se emplea la ecuación 5-1 para estimar el vector de potencias ópticas  $\bar{P}$  mediante la respuesta del sensor RGB. Con esto, se procede a calcular los valores cromáticos ( $\bar{x}_p$ ,  $\bar{y}_p$ ) en el espacio de color CIE 1931, mediante la ecuación 5-2. Tenga en cuenta que los valores cromáticos ( $x_r = 0.7$ ,  $y_r = 0.3$ ), ( $x_g = 0.19$ ,  $y_g = 0.78$ ) y ( $x_b = 0.09$ ,  $y_b = 0.13$ ) asociados a las longitudes de onda pico del LED R, G y B respectivamente, fueron tomados del espacio de color CIE 1931.

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_r \\ \bar{P}_g \\ \bar{P}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{r,r} & h_{r,g} & h_{r,b} \\ h_{g,r} & h_{g,g} & h_{g,b} \\ h_{b,r} & h_{b,g} & h_{b,b} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \bar{r}_r \\ \bar{r}_g \\ \bar{r}_b \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

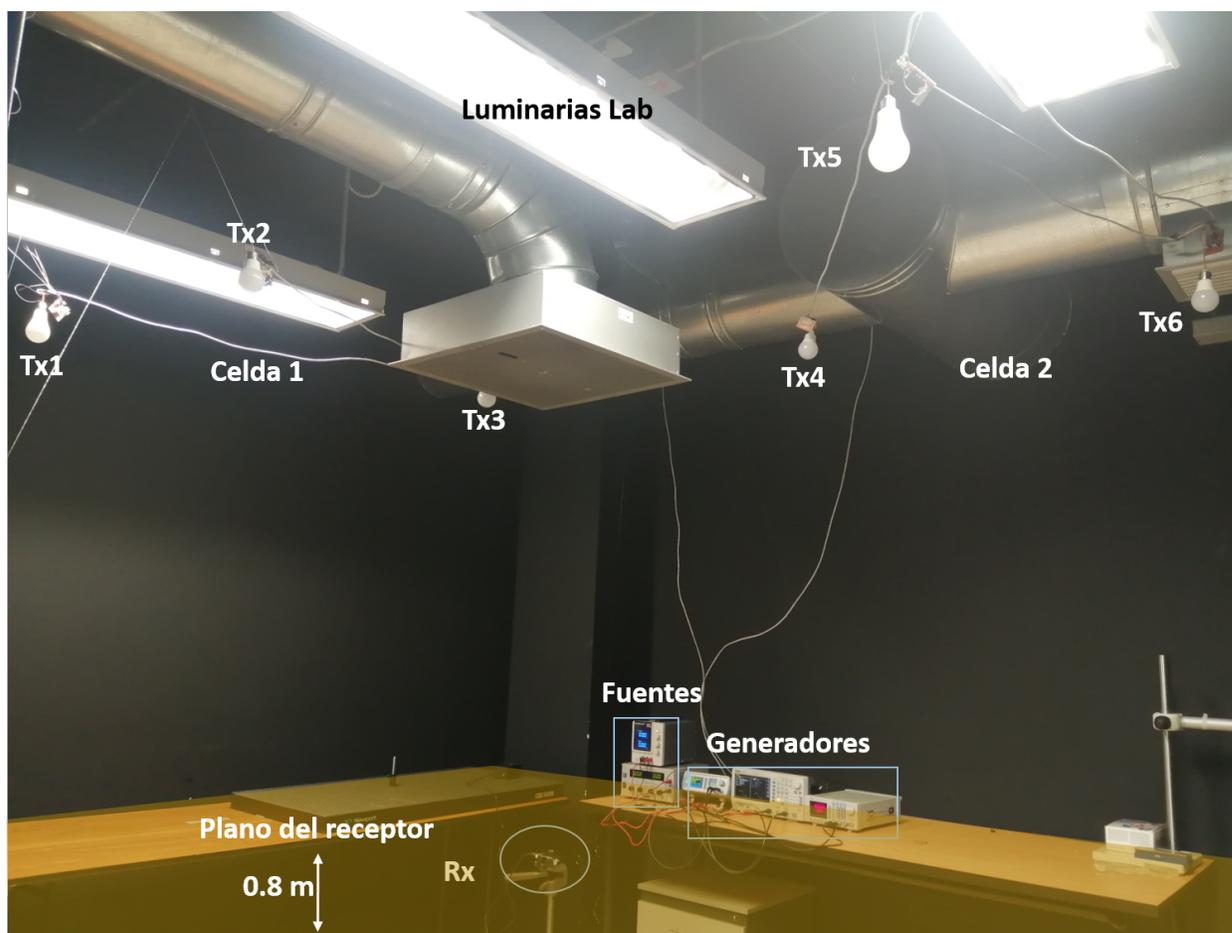
$$\begin{bmatrix} \bar{x}_p \\ \bar{y}_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \bar{P}_r \\ \bar{P}_g \\ \bar{P}_b \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

## 5.2. Diseño del Receptor VLP

Para la demostración del funcionamiento del sistema VLP, se empleó el receptor óptico de Thorlabs PDA 36A. Dicho sensor cuenta con todos los componentes de acondicionamiento y amplificación necesarios para el buen funcionamiento del fotodiodo. Es por ello, que no fue necesario proponer etapas de diseño, fabricación y caracterización del receptor óptico, puesto que el fabricante Thorlabs ofrece los parámetros de funcionamiento en la hoja de datos [76].

## 5.3. Resultados Experimentales

En la Figura 5-7 se muestra el despliegue de hardware de la infraestructura VLP en el laboratorio de Visión Artificial y Fotónica del ITM y la distribución de los 6 transmisores (Tx) VLP, el receptor (Rx) óptico y las fuentes de poder y generadores de señales. Adicionalmente, en la evaluación del sistema VLP se consideró emplear la red de luminarias (Luminarias Lab) y el ingreso de luz externa (solar) a través de la puerta del laboratorio como fuente potencial de ruido óptico. El experimento fue realizado en horas del mediodía con la intención de aprovechar la componente de luz externa.



**Figura 5-7:** Despliegue de hardware del sistema VLP en el laboratorio del ITM.

En adelante se mostrarán los resultados del diseño y evaluación del transmisor al igual que la validación del experimento. Referente al diseño del transmisor, se analizaron algunos circuitos electrónicos propuestos en artículos de investigación en VLP. En la Tabla 5-2 se presenta de manera resumida los artículos de investigación revisados y las características de los drivers propuestos en los procesos experimentales. Adicionalmente, se identificaron los trabajos de investigación que sirvieron de apoyo para la construcción del driver VLP. Sin embargo, la mayoría de trabajos están orientados a luminarias LED de luz blanca.

**Tabla 5-2:** Análisis de artículos VLP como apoyo al diseño del driver del LED RGB.

Referencia	Análisis	¿Es de utilidad para el sistema VLP propuesto?
[81]	Los autores proponen un driver VLC basado en un controlador de motores L298N para controlar un LED blanco de 10W de potencia óptica. Sin embargo, el driver requiere una señal de entrada en formato digital, por lo que es necesario aplicar técnicas de conversión análogo a digital.	Es poco probable, porque el sistema VLP debe transmitir señales análogas en banda base.
[82]	Proponen un driver basado en transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor) IRF 530N para controlar la corriente de polarización de un LED de luz blanca de 3 W de potencia óptica. Los autores proporcionan un circuito básico que permite operar con señales en banda base digital o analógica.	Sí. El sistema propuesto podría ser adaptado para LEDs de mayor potencia empleando un transistor MOSFET adecuado. .
[83]	Proponen un circuito electrónico basado en transistores MOSFET para controlar un LED RGB. Sin embargo, el driver propuesto para controlar el MOSFET solo opera con señales en formato digital.	Podría ser de utilidad si el driver del MOSFET es modificado para ser modulado con señales análogas.
[43]	Los autores proponen un driver basado en un controlador LTC3783 para controlar la corriente de un LED de luz blanca. El controlador emplea una señal PWM para manipular la potencia de emisión del LED.	No. Puesto que el transmisor VLP requiere transmitir una señal análoga.

[46, 47, 49]	Emplean un Bias-T como driver y modulador de la corriente de polarización de un LED de luz blanca.	No. El Bias-T es un dispositivo electrónico especial para operar con señales análogas o digitales de baja o alta frecuencia. Dichas características hacen que sea relativamente costoso y además, es escaso en el mercado electrónico local. Adicionalmente, sería poco práctico para el diseño del transmisor VLP, ya que el sistema exige tres Bias-T por transmisor debido a los canales RGB.
[84]	Los autores proponen un circuito de potencia basado en transistores MOSFET y una placa Arduino Uno para generar las señales de control. Adicionalmente, reutilizan luminarias LED de luz blanca comerciales y las acoplan al transmisor VLP.	Es probable emplear algunas partes del sistema de potencia como lo es la configuración del driver para manipular la corriente de polarización del LED RGB.

En la Figura 5-8 se presenta el circuito electrónico diseñado para el transmisor VLP basado en LEDs RGB al igual que el diseño 3D de la tarjeta electrónica. Se puede observar que las señales de entrada para cada canal RGB son independientes. Esto permitirá a futuro realizar experimentos con la multiplexación por división de longitud de onda. Luego de generar los archivos de fabricación Gerber en el software Circuitmaker, las tarjetas fueron procesadas en la empresa colombiana Colcircuitos. Posteriormente se procedió a ensamblar las componentes electrónicas en dicha tarjeta pcb, la cual es mostrada en la Figura 5-9a. Se puede observar los subsistemas que hacen parte del control del punto cromático y driver para cada canal del LED RGB. Los drivers están basados en transistores MOSFET canal P IRF 9630 que soporta voltajes de 200 V, corriente de 6.5 A y resistencia interna de 0.8  $\Omega$ . Se empleó el LED RGB HPC-62738 de 10 W de potencia óptica. El canal R G y B requiere voltajes de polarización de 6.5 V, 9.2 V y 9.4 V respectivamente. Adicionalmente, cada canal consume una corriente máxima de 300 mA. Debido a la potencia óptica generada por cada canal, se propuso acoplar el LED RGB a un disipador de calor. Para este caso se reutilizó el disipador de calor de lámparas LED de 12 W comunes en el mercado local, como lo muestra la Figura 5-9b. El difusor de luz en dichas lámparas también fue adoptado para el LED RGB.

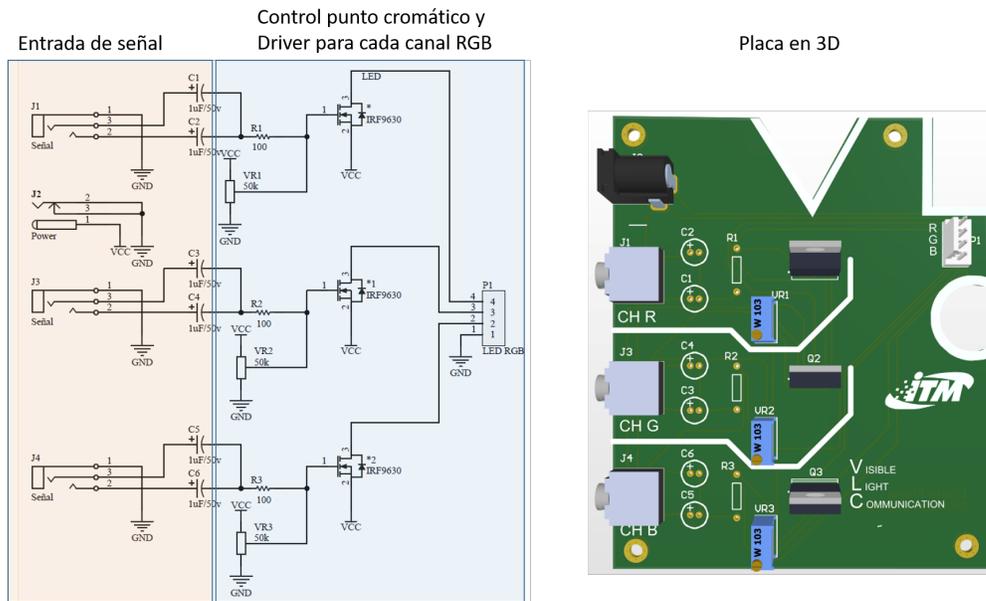


Figura 5-8: Circuito electrónico para el transmisor VLP y modelo en 3D de la placa electrónica.

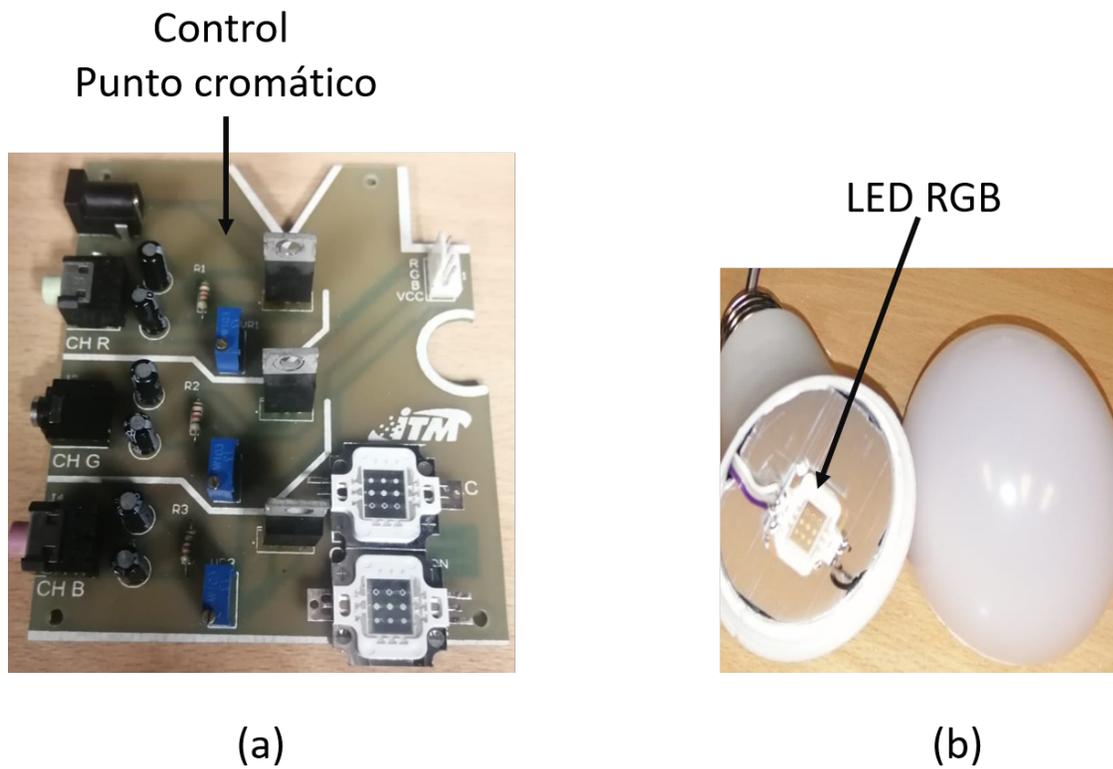
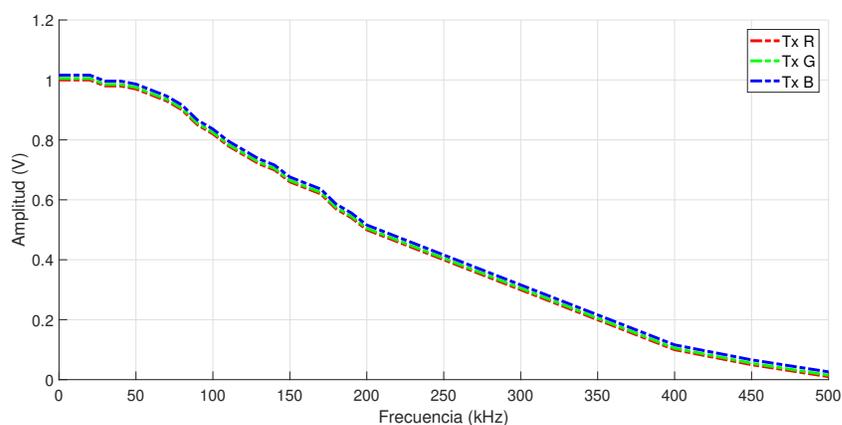
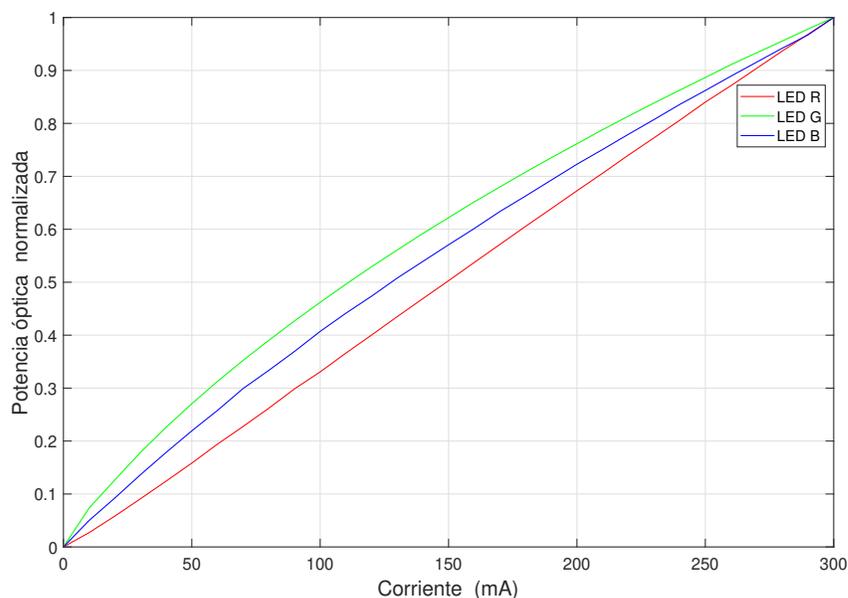


Figura 5-9: Transmisor VLP. a) Tarjeta del transmisor VLP fabricada. b) LED RGB con disipador de calor en luminaria LED genérica.



**Figura 5-10:** Respuesta en frecuencia del transmisor VLP.

La Figura 5-10 muestra la respuesta en frecuencia que soporta el transmisor VLP para cada canal del LED RGB. Se encontró que el ancho de banda para los canales RGB es aproximado a 200 kHz. El bajo ancho de banda se debe principalmente a las características del transistor de potencia MOSFET, ya que está demostrado que los LEDs cuentan con un BW superior a 1 MHz [85]. Sin embargo, dicha respuesta en frecuencia es suficiente para el sistema VLP en estudio, ya que las señales portadoras empleadas para ser transmitidas por el LED RGB son máximo de 30 kHz.



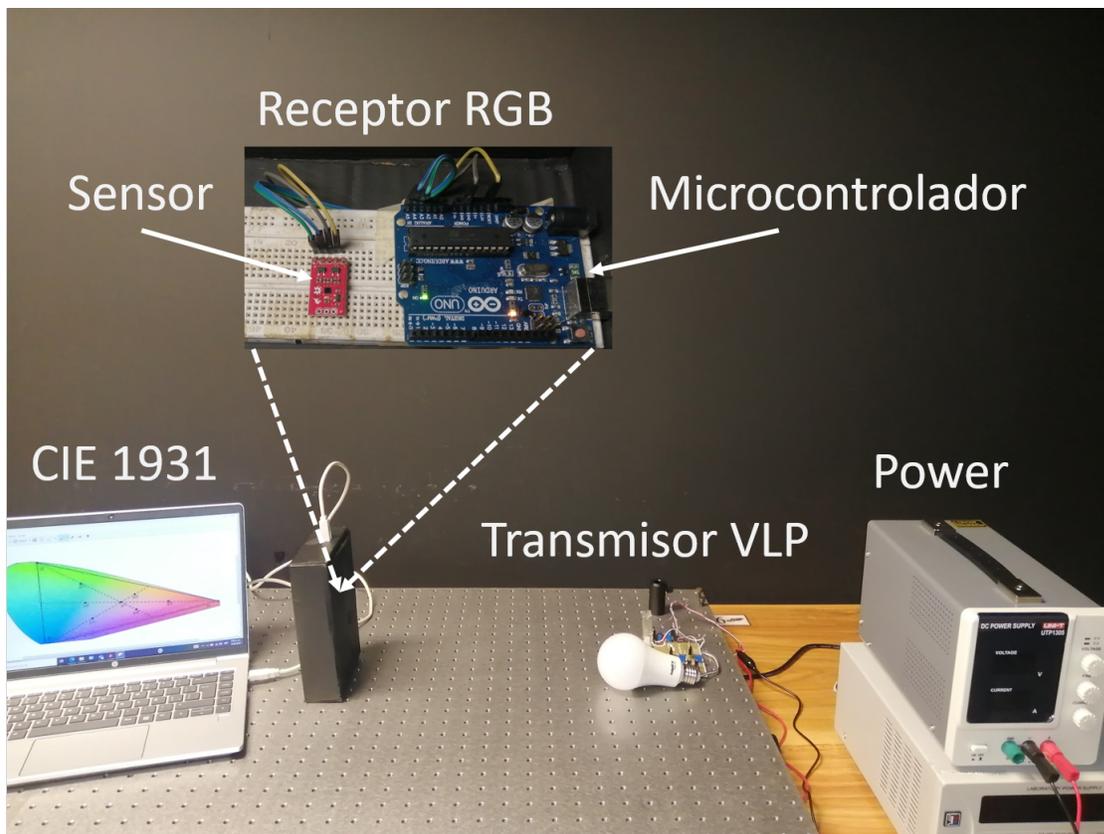
**Figura 5-11:** Respuesta electro-óptica del LED RGB.

La respuesta electro-óptica del LED RGB es mostrada en la Figura 5-11. Se puede observar la

no linealidad entre la corriente de polarización y la potencia óptica emitida por el LED RGB. El proceso de linealización fue realizado mediante una regresión polinomial de tercer orden empleando la función polyfit en el software Matlab. Por tanto, la corriente de polarización  $I_r$ ,  $I_g$ , e  $I_b$  del LED RGB podrá ser estimada en función de la potencia óptica normalizada  $P_r$ ,  $P_g$ , y  $P_b$  para cada canal RGB, como sigue.

$$\begin{aligned} I_r &= 30,91P_r^3 - 39,71P_r^2 + 307,4P_r + 1,59 \\ I_g &= 0,712P_g^3 + 152,8P_g^2 + 147P_g - 0,8402 \\ I_b &= -14,77P_b^3 + 113,9P_b^2 + 202,4P_b + 0,09 \end{aligned} \quad (5-3)$$

En la Figura 5-12 se muestra el montaje experimental para medir y ajustar manualmente el punto cromático emitido por el LED RGB. También la disposición de las componentes eléctricas y ópticas relacionadas con el transmisor VLP, el receptor RGB y equipo de cómputo con el programa Matlab para calcular el punto cromático en el espacio de color CIE 1931. El experimento fue realizado con niveles de iluminación externas controladas, puesto que dichas fuentes podrían alterar las mediciones de la cromaticidad.

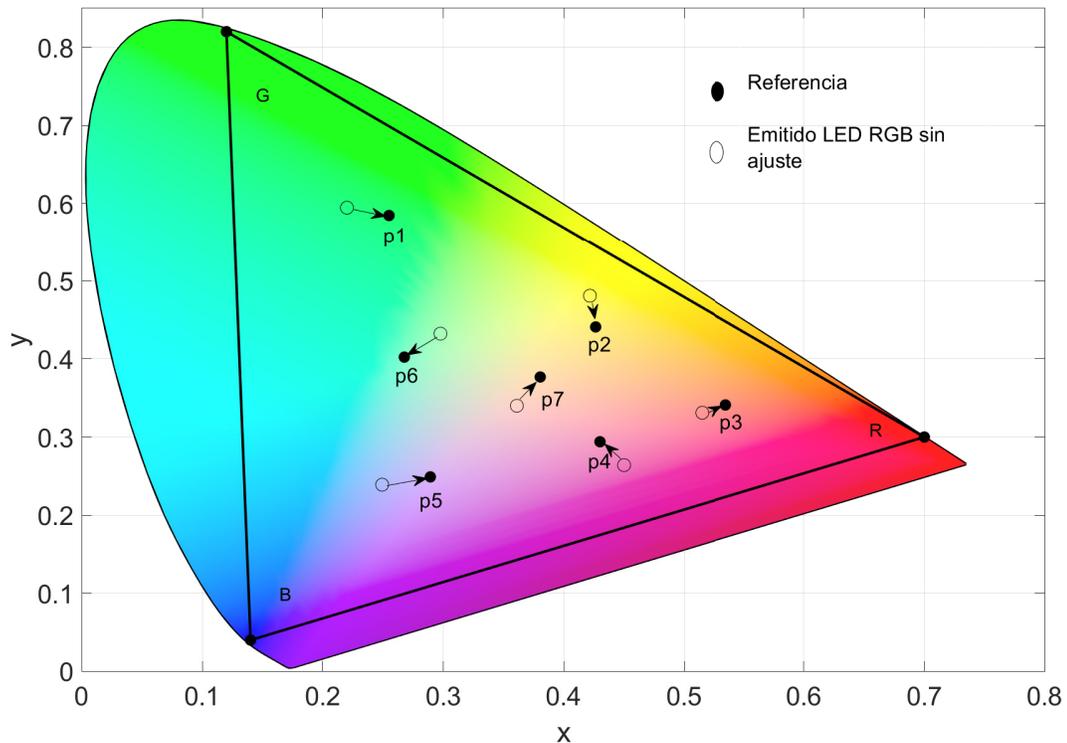


**Figura 5-12:** Montaje experimental para medir y ajustar la cromaticidad del transmisor VLP.

Luego de aplicar el proceso de calibración del sensor RGB, se logró estimar la matriz de ganancias  $H$  que posibilita el cálculo del vector de potencias RGB mediante la ecuación 5-4.

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_r \\ \bar{P}_g \\ \bar{P}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 425 & 115 & 84 \\ 92 & 520 & 110 \\ 78 & 112 & 380 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \bar{r}_r \\ \bar{r}_g \\ \bar{r}_b \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

Posteriormente, se empleó la ecuación 5-2 para estimar los puntos cromáticos en el espacio de color CIE 1931 como se muestra en la Figura 5-13. En dicha gráfica se observa los puntos cromáticos emitidos por el LED RGB al ser polarizado con las corrientes eléctricas estimadas por simulación. Sin embargo, dichos puntos están desviados de los de referencia posiblemente debido a la no linealidad de los dispositivos electrónicos y ópticos y también la baja precisión del sensor RGB. En la Tabla 5-3 se dan los parámetros de corriente y las coordenadas de los puntos cromáticos emitidos por el LED RGB. Adicionalmente, se identificaron los valores de ajuste de corriente del LED RGB para lograr el punto cromático de referencia.



**Figura 5-13:** Puntos cromáticos en el espacio CIE 1931 emitidos por el LED RGB.

**Tabla 5-3:** Corriente de polarización del LED RGB y puntos cromáticos en el espacio CIE 1931.

Sin ajustar parámetros de emisión del LED RGB		Con ajuste de parámetros de emisión del LED RGB	
Corriente de polarización $(I_r, I_g, I_b)$ mA del LED RGB según datos de potencia para cada punto cromático	Punto cromático $(\bar{x}_p, \bar{y}_p)$ estimado en el espacio CIE 1931.	Ajuste de la cromaticidad mediante el control de corriente de polarización $(I_r, I_g, I_b)$ mA del LED RGB	Punto cromático $(\bar{x}_p, \bar{y}_p)$ corregido y ajustado al de referencia
(69.80, 150.14, 32.92)	p1 (0.22, 0.5949)	(72, 180, 46)	p1 (0.2549, 0.5849)
(156.10, 66.72, 29.90)	p2(0.42164, 0.481)	(155, 109, 40)	p2(0.4264, 0.441)
(211.04, 24.99, 30.69)	p3 (0.5149, 0.3311)	(222, 41, 36)	p3 (0.5349, 0.3411)
(156.01, 24.87, 77.53)	p4(0.45, 0.264)	(154, 48, 102)	p4(0.43, 0.294)
(83.12, 29.96, 143.47)	p5(0.2492, 0.239)	(89, 51, 160)	p5(0.2892, 0.249)
(73.98, 78.2, 91.04.30)	p6(0.2976, 0.4324)	(68, 110, 121)	p6(0.2492, 0.239)
(131.65, 53.57, 64.09)	p7(0.361, 0.34)	(136, 87, 61)	p7(0.3804, 0.3769)

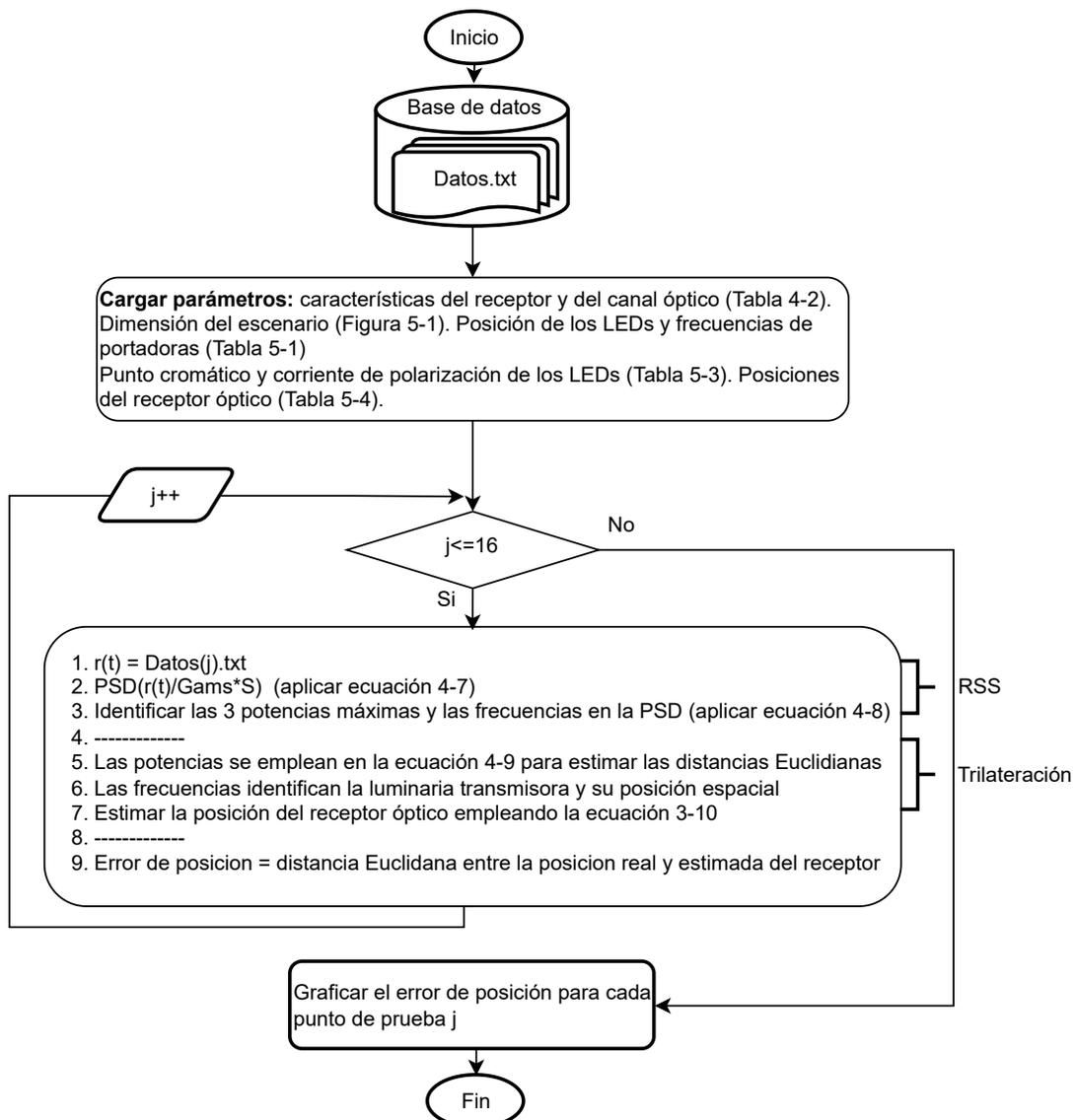
### 5.3.1. Validación del Sistema VLP

La validación del sistema de posicionamiento inicia con la selección del punto cromático que emitirá cada transmisor VLP. Por razones prácticas se consideró hacer la demostración con un punto cromático arbitrario. De manera particular, cada transmisor fue configurado para generar el punto cromático p7, considerando los parámetros de corriente de polarización para cada canal RGB del LED, mostrados en la Tabla 5-3. Posteriormente, se utilizaron 3 generadores de señal RIGOL DG 4162 para construir 6 portadoras sinusoidales, donde las frecuencias fueron definidas en la Tabla 5-1. Las corrientes de polarización y las señales portadoras son sumadas en el driver diseñado para controlar la potencia óptica de cada LED RGB. Tenga en cuenta que los transmisores VLP todo el tiempo emiten luz modulada con dichas señales portadoras manteniendo la iluminación del escenario simultáneamente.

Se empleó el detector de Thorlabs PDA 36A como receptor VLP y se configuró a 40 dB de ganancia el cual ofrece un ancho de banda de 150 kHz [76] que es suficiente para el sistema en estudio [86]. Se consideraron 16 puntos de prueba en el escenario de trabajo. Cada punto de prueba corresponde a la posición real del receptor VLP, las cuales son mostradas en la Tabla 5-4. Se usó la tarjeta de adquisición de datos Digilent Analog Discovery 2 que funciona como osciloscopio para procesar las señales entregadas por el sensor de luz. Mediante dicho instrumento, se procedió a registrar 1500 muestras a una frecuencia de muestreo de 96 kHz y se guardaron en un archivo con extensión txt. Este procedimiento se repitió para

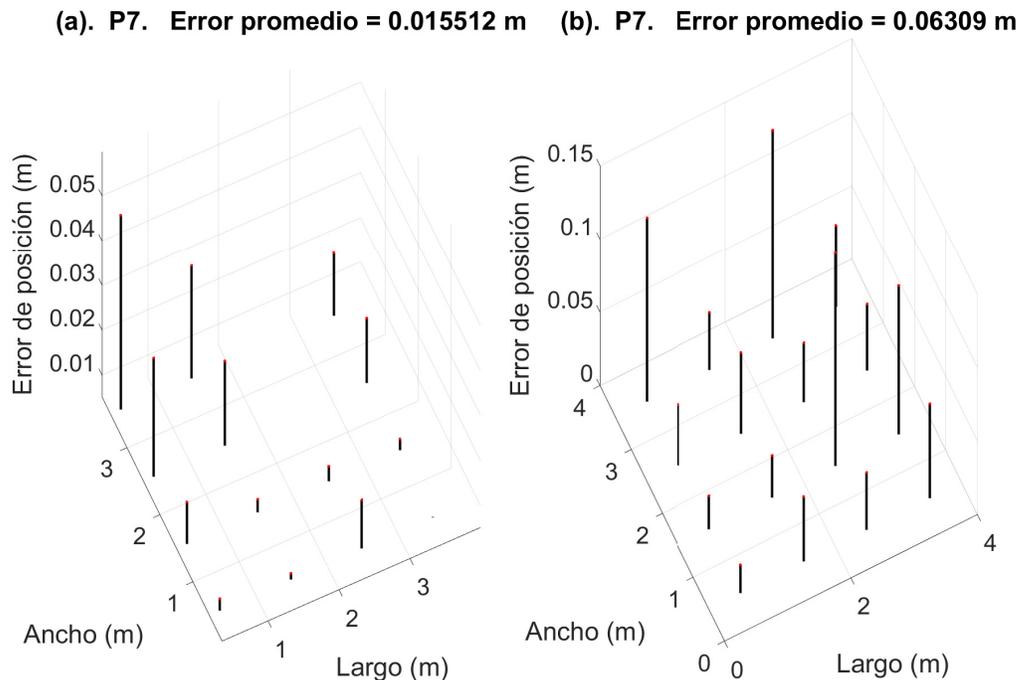
**Tabla 5-4:** Coordenadas del receptor VLP para cada punto de prueba.

Punto de prueba	$(x, y, z)$ m	Punto de prueba	$(x, y, z)$ m
1	(0.5, 0.5, 0.8)	9	(0.5, 2.5, 0.8)
2	(1.5, 0.5, 0.8)	10	(1.5, 2.5, 0.8)
3	(2.5, 0.5, 0.8)	11	(2.5, 2.5, 0.8)
4	(3.5, 0.5, 0.8)	12	(3.5, 2.5, 0.8)
5	(0.5, 1.5, 0.8)	13	(0.5, 3.5, 0.8)
6	(1.5, 1.5, 0.8)	14	(1.5, 3.5, 0.8)
7	(2.5, 1.5, 0.8)	15	(2.5, 3.5, 0.8)
8	(3.5, 1.5, 0.8)	16	(3.5, 3.5, 0.8)

**Figura 5-14:** Flujograma del algoritmo VLP implementado en Matlab.

los 16 puntos de prueba, con lo cual se construyó una base de datos que será utilizada en el software Matlab para el problema de posicionamiento. El diagrama de flujo que describe el funcionamiento del algoritmo VLP se puede apreciar en la Figura 5-14. En consecuencia, para cada archivo se aplica el mismo procesamiento. Los tres primeros procedimientos muestran como estimar los vectores de potencia y frecuencia mediante el algoritmo RSS. Posteriormente se ejecutan los procedimientos 5-7 para estimar la posición del receptor VLP mediante el algoritmo de trilateración. Finalmente se estima el error de posición mediante la ejecución del procedimiento 9. El algoritmo finaliza con las gráficas tridimensionales del error de posición estimado para cada punto de prueba del receptor VLP.

El error de precisión del sistema VLP se muestra en la Figura 5-15. El error de localización por simulación del sensor de luz en el espacio tridimensional es mostrado en la Figura 5-15a. Así mismo, la Figura 5-15b muestra el error de localización obtenido con el experimento VLP. La simulación mostró un error promedio de 1.5 cm, mientras que el error del sistema experimental fue alrededor de 6.3 cm. Se evidencia cierta variación del error de localización entre ambos sistemas analizados, lo cual toma sentido desde el punto de vista experimental, donde la no linealidad de los dispositivos ópticos y electrónicos podrían aportar desviaciones en las señales lumínicas transmitidas y detectadas. Sin embargo, la diferencia de error promedio entre simulación y la demostración experimental no supera los 5 cm, lo cual indica que

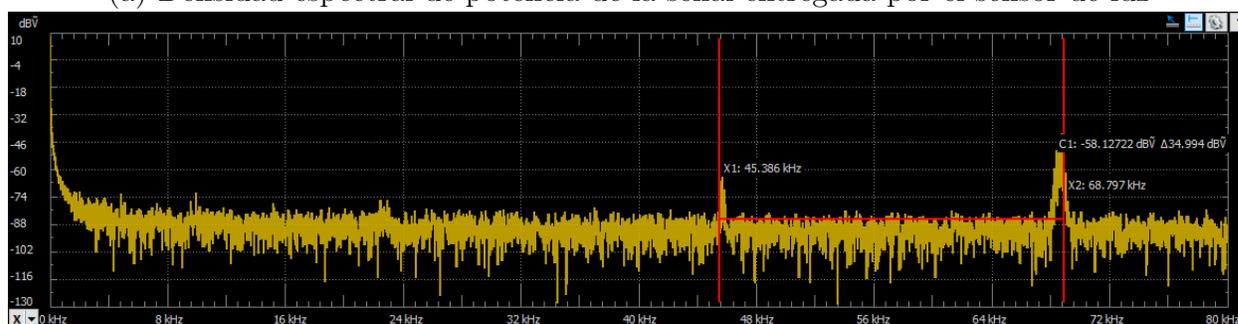


**Figura 5-15:** Error de localización del sistema VLC. a) simulación del punto cromático P7 y b) demostración experimental.

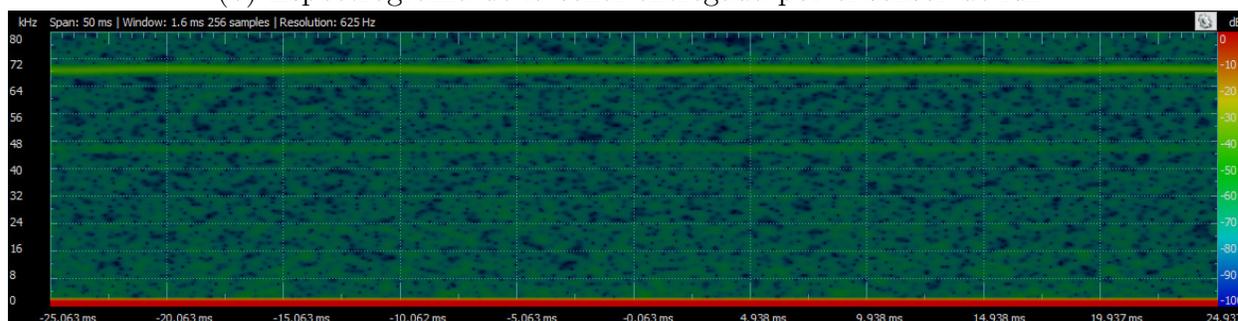
el experimento propuesto es consistente con el modelo VLP basado en LEDs RGB [27]. En consecuencia, este sistema VLP podría tener uso potencial en diferentes aplicaciones como la localización en museos, donde se ha reportado aplicaciones IPS con errores funcionales de 14.2 cm [87].

Adicionalmente, se realizó un experimento para medir el rendimiento del sistema VLP considerando luminarias externas a los transmisores VLC. Para ello, se utilizó el sistema de iluminación propio del laboratorio del ITM con el fin de inyectar componentes de luz que actúen como fuente de ruido óptico. Dichas luminarias generan potencias lumínicas cercanas a los 12 W de potencia, lo que podría aportar una alta componente de luz constante.

(a) Densidad espectral de potencia de la señal entregada por el sensor de luz



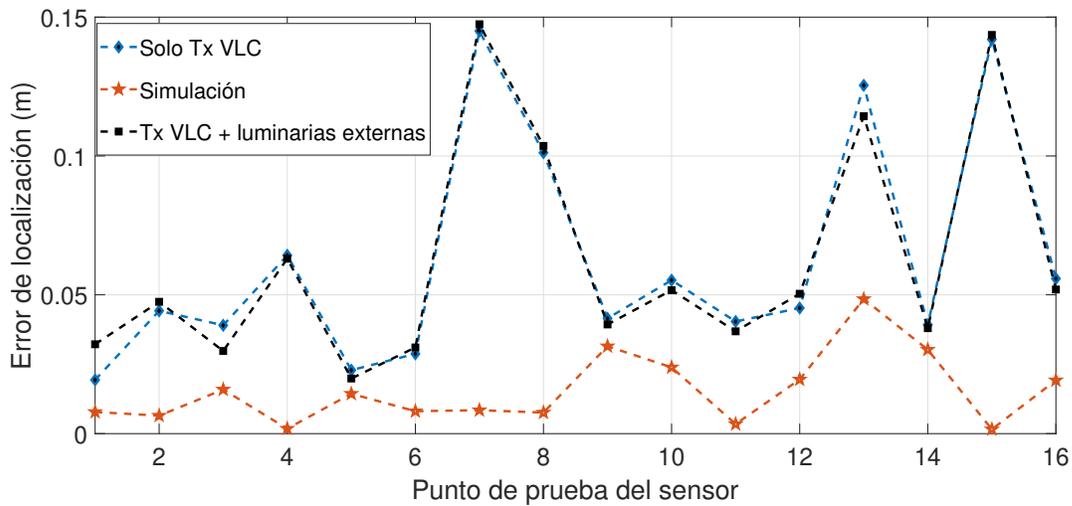
(b) Espectrograma de la señal entregada por el sensor de luz



**Figura 5-16:** Transformada de Fourier y espectrograma de la señal eléctrica generada por el sensor de luz Thorlabs considerando fuentes de luz externas al transmisor VLC.

Se procedió a registrar 45000 muestras con el sensor de luz y el instrumento Analog Discovery 2. Posteriormente se aplicó la transformada rápida de Fourier a dicha señal, como se muestra en la Figura 5-16a. En dicha figura se evidencia que la fuente de luz del laboratorio provee al sistema VLC una componente óptica constante y componentes de frecuencia cercanas a los 45 kHz y 68 kHz. La componente de luz constante también podría ser aportada por la componente de luz solar que ingresó al sistema a través de la puerta del laboratorio, mientras que la componente en frecuencia podría estar relacionada con una filtración regular del driver de potencia que modula las luminarias del laboratorio. Sin embargo, dichas componentes de frecuencia mostraron niveles de potencia que podrían ser comparables con los niveles de ruido.

Adicionalmente, en el espectrograma de la señal entregada por el sensor de luz, se evidenció que la componente de potencia constante que aporta las luminarias es mucho mayor que la potencia que aportan las componentes en frecuencia detectadas, como se muestra en la Figura 5-16b. En consecuencia, dichas componentes de luz externa podrían generar poca distorsión a las amplitudes de las señales portadoras empleadas en el transmisor VLP, ya que las frecuencias de trabajo están entre 5 kHz y 30 kHz. Esto contrasta con la baja variación del rendimiento del error del sistema VLP con y sin luminarias externas, como se muestra en la Figura 5-17.



**Figura 5-17:** Error de localización del sistema VLP simulado y experimental con y sin fuentes de luz externa.

## 5.4. Conclusiones

En conclusión, se logró la demostración experimental del sistema VLP basado en múltiples celdas y luminarias RGB como transmisores de señales portadoras. El sistema VLP propuesto puede ser configurado a diferentes puntos cromáticos, como también, permite explorar el espacio de color CIE 1931. Aunque el experimento fue propuesto para reproducir el punto cromático 7 (p7), el transmisor VLP cuenta con un driver básico que permite manipular la corriente de polarización de cada canal RGB y establecer la cromaticidad de la luz generada. Adicionalmente, fue propuesto un sistema de calibración del transmisor mediante un sensor RGB y electrónica convencional. Dicho sistema es útil para identificar las coordenadas cromáticas de la luz RGB generada por el transmisor en el espacio CIE 1931. Esto podría facilitar la exploración de esquemas de modulación multinivel como CSK para ser aplicado en la localización a nivel de interiores.

Por otra parte, se evidenció que el sistema VLP propuesto podría ser más exigente a nivel de hardware, si se compara con un sistema VLP basado en luminarias blancas. Lo anterior se debe a los múltiples canales que ofrece cada transmisor VLP propuesto. Sin embargo, el presente sistema VLP permite la manipulación de la cromaticidad y la posibilidad de explorar la multiplexación por división de longitud de onda, características que no son posibles de lograr con luminarias blancas en sistemas VLP, como se evidenció en la Tabla 2-1.

Respecto al sistema experimental, es recomendable emplear la estrategia de estimación de la cromaticidad del transmisor VLC mediante el experimento propuesto con el sensor RGB, esto con el fin de sintonizar el punto cromático configurado en el espacio CIE 1931. De no lograr tal sintonía, el rendimiento del sistema VLP podría verse afectado al no corresponder los niveles de potencia lumínica teóricos con los configurados a nivel experimental. Adicionalmente, se debe tener presente las ecuaciones de linealización de la respuesta electro-óptica del LED RGB, como estrategia que ayuda a la generación de potencias lumínicas en función de la corriente de polarización de cada canal del LED RGB.

# 6 Desempeño del sistema VLP

En este Capítulo se ofrece un análisis a los indicadores que permiten evaluar el desempeño de un sistema VLP. En un primer momento se expone los principales indicadores de desempeño que han sido considerados en la literatura científica. Finalmente, se expone un análisis del sistema VLC respecto a la confiabilidad en la comunicación y los grados de libertad que este ofrece.

**Tabla 6-1:** Identificación de indicadores de desempeño para el sistema VLP.

Indicador	Datos para ser evaluado	¿Se analizará en esta propuesta?
Precisión [6, 7, 79]	Error de localización	Sí
Interferencia entre celdas [6]	Frecuencia y longitud de onda	Sí
Complejidad [5, 7, 79]	Componentes del hardware y procesos del algoritmo	Sí
Robustez [2, 5, 6, 79]	Cromaticidad, variación en los niveles de luz emitida por los LEDs, NLOS, ruido óptico	Sí
Escalabilidad	Convergencia tecnológica	Sí
Energía	Características de la arquitectura	Sí
Tiempo de latencia [6, 7, 79]	Tiempo	No
Costo [5, 6, 79]	Hardware y software	No

## 6.1. Indicadores de Desempeño

En los sistemas VLP, es necesario disponer de herramientas que permitan analizar el rendimiento del sistema de localización y su factibilidad como tecnología emergente. La Tabla 6-1 lista un resumen de los indicadores más representativos expuestos en documentos de revisión bibliográfica en sistemas VLP [2, 5–7, 20, 79]. Evidentemente, la evaluación de algunos indicadores requieren de datos provenientes de los resultados por simulación, experimental

o despliegue tecnológico del VLP en un sistema de navegación real. En consecuencia, para este trabajo de investigación, esto afecta notablemente el alcance en la evaluación de algunos de los indicadores de desempeño, ya que los datos utilizados provienen solo de la evaluación por simulación y experimental (prueba de concepto en un entorno de laboratorio) de la arquitectura VLP propuesta. A continuación se hace una breve descripción y análisis de los indicadores tomando como referencia el sistema VLP propuesto en este trabajo de tesis.

### 6.1.1. Precisión

Es el indicador principal en la evaluación del rendimiento de un sistema VLP. Como métrica de evaluación, se emplea el error en la estimación de la posición del dispositivo móvil. El error de localización está relacionado con la distancia Euclidiana entre la posición estimada y la posición real del receptor de luz. Adicionalmente, el error de localización depende de la precisión de la técnica empleada en la identificación de parámetros de la señal recibida por el sensor para el cálculo de las distancias entre el receptor y las luminarias. Para el caso de este sistema VLP, las distancias fueron estimadas empleando la técnica RSS. El análisis de la precisión mediante simulación y demostración experimental, fueron reportados en los Capítulos 4 y 5.

### 6.1.2. Interferencia Entre Celdas

Está relacionado con la superposición entre los patrones de radiación ópticos generados por cada LED transmisor en celdas diferentes. Dicho patrón de radiación óptico es proyectado sobre la superficie del receptor de luz. Dependiendo del tipo de técnica de multiplexación o modulación que se esté utilizando, el grado de interferencia entre celdas podría impactar el rendimiento del sistema VLP. Sin embargo, es necesaria la superposición entre cada patrón de radiación óptico generado por los LEDs para que el algoritmo de trilateración funcione correctamente. Para el sistema VLP basado en LEDs RGB se presentan dos posibles grados de interferencia: el primero se relaciona con la longitud de onda asociada a cada luminaria y el segundo con la señal análoga portadora transmitida por los canales RGB de las luminarias.

En función del tipo de modulación o multiplexación empleado, la interferencia entre celdas podría tener un impacto positivo o negativo en el desempeño del esquema de modulación. Sin embargo, para el sistema VLP propuesto no se emplea esquemas de modulación, de modo que el fenómeno de interferencia generado en tal esquema no es considerado, es decir, como no se transmiten datos binarios modulados, el fenómeno de interferencia entre bits o símbolos no existe. Por otra parte, la gestión de las luminarias RGB se realiza con la multiplexación por división de frecuencia. En este sentido se transmiten señales análogas portadoras con diferentes frecuencias de operación a través de los canales RGB del LED. Cada señal portadora adyacente tiene una separación de 5 kHz, por lo que es poco probable

la interferencia entre señales portadoras debido al espaciamiento de cada frecuencia central, como se demostró con el cálculo de la densidad espectral de potencias de la señal entregada por el sensor óptico (ver Figura 4-5). El ancho de banda disponible en la comunicación por luz visible podría ser impactado si se consideran frecuencias portadoras altas o muy espaciadas. Esto debe ser considerado en el proceso de diseño de los transmisores VLP. Por lo anterior, los drivers diseñados para cada LED RGB mostraron un ancho de banda de 200 kHz, que es suficiente para la aplicación VLP en estudio, puesto que la frecuencia portadora máxima se configuró a 30 kHz.

### 6.1.3. Complejidad

La complejidad de un sistema VLP depende de las componentes exigidas por el hardware y los procesos del algoritmo de localización como parte del software. En primer lugar, el hardware demandado por la arquitectura VLP es una componente crítica para el diseño de sistemas VLP exitosos. La posibilidad de proveer un enlace de comunicación de datos le proporciona más funcionalidades al sistema de localización. Sin embargo, dicha característica requiere de algoritmos especializados en los procesos de transmisión y recepción de datos, por lo que podría agregar mayor complejidad. Por otra parte, las componentes involucradas en el proceso de localización del sistema constituyen un factor relevante en la complejidad. Por lo anterior, para éste trabajo de investigación la complejidad se define en términos de los procesos requeridos por el sistema de localización y el tipo de hardware empleado en arquitecturas VLP basadas en LEDs RGB. Por lo tanto, este sistema VLP propone una arquitectura de baja complejidad, puesto que exige 3 LEDs RGB por celda y un solo fotodiodo como receptor, comparada con la arquitectura presentada en los trabajos [54,65], que emplea 4 luminarias (3 LEDs RGB y 1 LED ultravioleta) por celda y más de dos fotodiodos como receptores. A nivel de procesos de localización, este trabajo propone un esquema de localización de baja complejidad debido a que el método propuesto emplea la propiedad de responsividad del fotodiodo para interpretar las múltiples longitudes de onda incidentes. Adicionalmente, a diferencia de los trabajos [54,65], en esta propuesta no se requiere emplear esquemas de modulación para la transmisión de los identificadores de cada LED RGB.

### 6.1.4. Robustez

La robustez de un sistema VLP se orienta a la capacidad para hacer frente a errores de localización en tiempo de ejecución bajo diferentes condiciones. Para esta propuesta, los resultados de evaluación del rendimiento del sistema de localización indican un sistema VLP robusto debido a la baja variación del error promedio (menor a 1 cm como se evidencia en la Sección 4.3.1) en función de diferentes condiciones, tales como el cambio de la cromaticidad de las luminarias, consideración de componente reflejadas y transmisión de señales portadoras

por canales RGB. Adicionalmente, el sistema experimental fue evaluado considerando luz solar y luminarias externas que aportan niveles de luz constante y que suman ruido óptico al receptor. Otras condiciones que pueden ser evaluadas para complementar el nivel de robustez de un sistema VLP, pero que no fueron evaluadas en esta propuesta debido al alcance del proyecto, se relacionan con la variación de la orientación del receptor óptico o el cambio considerable en la velocidad del usuario que porta el receptor de luz.

### 6.1.5. Escalabilidad

La escalabilidad hace referencia a la capacidad que ofrece la arquitectura del sistema VLP para crecer en hardware-software y ser adaptada en diferentes escenarios de aplicación que consideran áreas de cobertura variable, con una inversión significativamente menor. La escalabilidad podría ser positiva si el sistema VLP es integrado con tecnología existente y posibilita el uso de la infraestructura de luminarias. Adicionalmente, los algoritmos flexibles o adaptables a condiciones exigidas por diferentes aplicaciones podrían ser estratégicos para facilitar el despliegue tecnológico del sistema VLP.

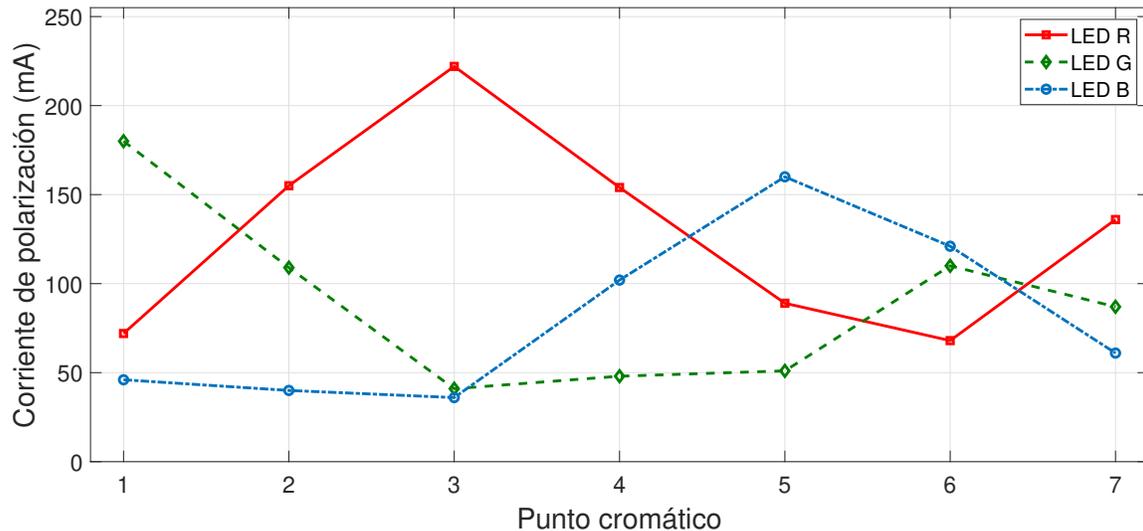
Considerando el proceso de simulación y el experimento del sistema VLP propuesto, la arquitectura VLP basada en LEDs RGB es de baja escalabilidad ya que se evidencia un bajo nivel de convergencia tecnológica con dispositivos móviles. Sin embargo, si se considera la baja complejidad del algoritmo de trilateración y la técnica RSS empleada en la estimación de parámetros de la señal óptica recibida por el detector para el problema de posicionamiento, es prudente recomendar el uso de microcontroladores de bajo desempeño con alto nivel de integración con sistemas de cómputo personal para el diseño del receptor. Adicionalmente, los dispositivos móviles podrían ser utilizados como plataforma de navegación integrada al sistema VLP.

### 6.1.6. Energía

La energía eléctrica demandada por un sistema VLP depende en gran medida del tipo de arquitectura desarrollada. La arquitectura VLP define la tecnología de luminaria (WLED o LED RGB) utilizada y la estructura del receptor óptico. Para este caso, se propone un análisis para el consumo energético de la arquitectura VLP basada en LEDs RGB y dos celdas. Cada celda consta de 3 LEDs RGB con su respectivo driver de corriente. El LED RGB HPC-62738 utilizado genera una potencia óptica máxima de 10 W. Sin embargo, en este proyecto se controló dicha potencia según el punto cromático a transmitir, como se expuso en la Tabla 5-3. Por lo tanto, la fuente de poder eléctrica debe suministrar la corriente de polarización total exigida por cada canal del LED RGB, como se muestra en la Figura 6-1. Tenga en cuenta que cada transmisor es configurado para reproducir el mismo punto cromático seleccionado por el usuario.

Considerando lo anterior, para el sistema VLP propuesto el consumo de energía demandado por el transmisor óptico dependerá de la potencia eléctrica exigida por cada luminaria para reproducir el punto cromático configurado. Por ejemplo, el punto cromático 7 demostrado en el experimento (como se mostró en la Figura 5-15), demandó una potencia eléctrica por luminaria de 3.578 W (corriente total de polarización de 284 mA a 12.6 V). En consecuencia, la potencia eléctrica total consumida por el sistema VLP para las 2 celdas fue de 21.468 W. Considerando lo anterior, es posible hacer una proyección del consumo energético aproximado del sistema VLP, si fuese instalado en un escenario real. Suponer que el Museo de Ciencias Naturales de La Salle del ITM, atiende al público con un promedio de 7 horas por día, lo cual implica que el transmisor del sistema VLP generaría un consumo de energía aproximado de 150.276 W/h.

En síntesis, la arquitectura VLP propuesta presenta una mayor flexibilidad en la configuración del transmisor óptico comparado con otros trabajos VLP que utilizan 4 luminarias (3 LEDs RGB y un LED ultravioleta). Sin embargo, la arquitectura VLP basada en LEDs RGB exige un mayor consumo de energía por transmisor óptico, comparado con sistemas VLP basados en LEDs de luz blanca [47, 67], lo cual se debe principalmente a los múltiples canales de luz.



**Figura 6-1:** Corriente de polarización demandada por cada canal del LED RGB según el punto cromático.

### 6.1.7. Tiempo de Latencia

Es el tiempo requerido por el sistema VLP para hacer la estimación de la posición del receptor óptico. El tiempo de latencia está integrado por la sumatoria de los tiempos requeridos

por cada subproceso, tales como, tiempo de transmisión, tiempo de recepción y tiempo de ejecución de los algoritmos para la estimación de la posición del receptor. El sistema VLP deberá contar con tiempos de latencia que puedan ser sintonizados con los exigidos por el escenario de aplicación. Esto podría permitir que la aplicación de navegación se pueda dar de manera adecuada. Por lo tanto, una baja latencia del sistema VLP impactaría positivamente la aplicación de navegación en tiempo real, sin embargo, esto podría exigir el diseño adecuado de arquitecturas VLP y algoritmos eficientes. Sin embargo, para este proyecto no se consideró hacer un análisis de dicha variable debido a las condiciones en las cuales fue realizada la demostración experimental (espacio de laboratorio y equipos de medición científica). En dicho escenario, si bien es posible cuantificar el tiempo de latencia, no aporta datos relevantes que permitan analizar el comportamiento de VLP en una aplicación real.

### **6.1.8. Costo**

El costo para un sistema VLP no solo se mide por el valor monetario del hardware y software. También, los tiempos invertidos en el proceso de despliegue de la infraestructura, el consumo energético y tiempos de mantenimiento, deben ser analizados. Tenga presente que algunos costos pueden ser reducidos, si se considera reutilizar parte de la infraestructura de iluminación del escenario de trabajo para el diseño del transmisor o diseñar receptores VLC con alto nivel de integración con los teléfonos inteligentes. Por lo anterior, la mayoría de variables dependen del hardware final a diseñar. Por otra parte, el indicador de costo será analizado tomando como referencia la arquitectura VLP para una celda y un usuario. Esta es la base para definir el costo total si se consideran ambientes con grandes áreas que requieran múltiples celdas o múltiples usuarios. Adicionalmente, los consumos energéticos del hardware y los tiempos de mantenimiento del sistema VLP deben ser definidos y analizados en el proceso experimental. En consecuencia, para esta etapa inicial del proyecto, no se cuenta con datos suficientes para dar una valoración al costo.

## **6.2. Confiabilidad del Sistema VLC**

### **6.2.1. Velocidad de bits o símbolos:**

En sistemas VLC la velocidad de transmisión es un indicador que permite medir la capacidad del canal de comunicación. La métrica empleada depende de la robustez de la técnica de modulación, donde el ancho de banda permitido por el canal también es considerado. En consecuencia, se emplea la métrica de bits/s (bits por segundo) si la técnica de modulación codifica un bit en cada impulso de transmisión. Por otra parte, si la técnica de modulación es multinivel, se emplea la métrica de símbolos/s (símbolos por segundo). Tenga en cuenta que para la aplicación de posicionamiento y en función de la técnica de control de acceso empleada, la velocidad de transmisión podría ser de unos pocos bits/s o en algunos casos,

no es necesario la transmisión de datos con VLC, ya que la frecuencia y amplitud de la señal óptica recibida por el fotodiodo son suficientes para la estimación de parámetros en el proceso de localización [33, 88, 89]. En consecuencia, la evaluación de dicha métrica queda condicionada a los requerimientos de diseño exigidos por el escenario de aplicación. De lo anterior también dependerá la evaluación de la probabilidad de error.

### **6.2.2. Probabilidad de Error:**

La probabilidad de error de bit en la recepción de información por VLC es un indicador que permite medir el rendimiento del sistema de recepción considerando la variación de la relación señal a ruido (SNR - signal to noise ratio). En sistemas VLC, es común emplear la métrica de tasa de error de símbolo (SER - symbol error ratio) o tasa de error de bit (BER - bit error ratio) [60, 86]. Considerando los requerimientos de diseño del sistema VLC, la métrica de probabilidad de error podría tener rangos de valores permitidos, que podría ser útil para su aplicación en el diseño de sistemas IPS flexibles.

### **6.2.3. Análisis de la Confiabilidad del Sistema VLC**

El sistema VLP basado en LEDs RGB utiliza la estrategia de múltiples portadoras análogas transmitidas por los canales RGB, donde la identificación de la frecuencia y amplitud en el receptor, son parámetros suficientes para el problema de posicionamiento. En consecuencia, dicha estrategia impacta positivamente diferentes indicadores de desempeño como el tiempo de latencia, interferencia y complejidad, como se demostró anteriormente. Las razones mencionadas permiten concluir que para el sistema VLP en estudio, no se requiere agregar módulos de modulación para codificar los identificadores de las luminarias, que es lo común en trabajos con VLP [46, 47, 49]. Por esta razón, no es necesario evaluar los parámetros de velocidad de bit/símbolo para un SNR determinado y tampoco la probabilidad de error. Sin embargo, algunos experimentos fueron conducidos para estimar el ancho de banda del sistema de comunicación por luz visible, como se propuso en la demostración. Dicho parámetro brinda información básica de las prestaciones del canal VLC para el sistema VLP propuesto y la habilitación de futuras aplicaciones en transmisión de datos en escenarios que requieran bajo régimen binario.

## **6.3. Grados de Libertad del Sistema VLP Basado en LEDs Multicolor**

### **6.3.1. Cromaticidad**

El transmisor óptico basado en LEDs RGB ofrece la posibilidad de explorar el espacio de color definido por el estándar CIE 1931. Los canales RGB del LED pueden ser configurados

para emitir potencias ópticas con puntos cromáticos controlables. Esto podría ser útil para evaluar el rendimiento del sistema VLP en función de la cromaticidad seleccionada en el espacio CIE 1931, con potencial aplicación en escenarios donde el color emitido por las luminarias también son una meta.

### **6.3.2. Temperatura del Color**

Es una característica de la luz blanca que indica qué tan cálida (luz blanca con tonos rojos) o fría (luz blanca con tonos azules) es la luz generada. La mayoría de sistemas VLP emplean luminarias de luz blanca con algún grado de temperatura del color predeterminado. Por tanto, es un reto modificar los parámetros de emisión de un LED blanco para controlar la temperatura del color en la luz generada. En contraste, un LED RGB puede ser configurado para explorar diferentes niveles de temperatura de la luz blanca generada mediante la manipulación de la potencia óptica de cada canal RGB. Esto ofrece más flexibilidad en el diseño de la infraestructura de la iluminación del sistema VLP según requerimientos del escenario de trabajo.

### **6.3.3. Transmisión de Señales Portadoras por Canales Independientes R, G o B**

El transmisor VLC basado en LEDs RGB permite la transmisión de señales analógicas o digitales a través de canales R, G o B de manera independiente. Dicha característica ofrece flexibilidad en el diseño del sistema VLP. Adicionalmente, brinda la posibilidad de explorar la multi-canalización mediante el uso de la técnica de multiplexación por división de longitud de onda WDM, que podría impactar el rendimiento y la interferencia entre canales del sistema VLC. Otra técnica que podría tener potencial de exploración es la modulación multinivel empleando la codificación por color CSK. Dicha técnica impactaría la capacidad de información del sistema VLC brindando la posibilidad de ofrecer sistemas VLP con alta velocidad de transmisión de datos en escenarios de aplicación que lo requieran.

## **6.4. Conclusiones**

Se presentó un método para analizar 8 indicadores de desempeño del sistema VLP mediante la evaluación de variables cuantitativas. Sin embargo, solo 6 indicadores fueron analizados para esta propuesta, debido al nivel de desarrollo tecnológico del sistema VLP propuesto. Por lo tanto, se evidenció que el sistema VLP no presenta niveles de interferencia entre celdas, debido a que cada transmisor emplea una portadora análoga con frecuencia específica y no se requiere el uso de esquemas de modulación digital, lo cual impacta positivamente el nivel de complejidad. Se determinó un nivel bajo para la robustez, puesto que el sistema VLP mostró

baja variabilidad del error de localización. La arquitectura VLP presenta baja integración tecnológica, por lo que el nivel de escalabilidad es bajo. En términos de consumo energético, el sistema VLP mostró un buen rendimiento comparado con otras propuestas basadas en LEDs multicolor. Por otra parte, falta un mayor estudio de la arquitectura VLP propuesta que brinde mayor información para evaluar otros indicadores como el tiempo de latencia y el costo. Por último, para el sistema VLP basado en LEDs RGB no se requiere emplear formatos de modulación digital, por lo que no es necesario evaluar las prestaciones del canal de comunicación por luz visible.

# 7 Conclusiones y Líneas Futuras

## 7.1. Conclusiones

En este proyecto de tesis se desarrolló una arquitectura VLP multi-celda basada en LEDs RGB. El estudio inició con la caracterización del Museo de Ciencias Naturales de La Salle del ITM que fue considerado para la formulación del modelo del sistema VLP y el esquema de multiplexación para el problema de localización. Esto muestra el logro del objetivo específico 1, donde se plantea identificar características de un escenario real para la construcción del modelo VLP. Por otra parte, se propuso un método que permite explorar diferentes grados de libertad y su impacto sobre los indicadores de desempeño. En este sentido, se identificaron 3 grados de libertad donde uno de ellos (cromaticidad) fue evaluado por simulación y validado con un experimento. Se identificaron algunas características del canal VLP como la exploración de los canales RGB y la responsividad para diferentes longitudes de onda de un fotodiodo, que fueron utilizados de manera efectiva en la forma del esquema de multiplexación por división de frecuencia y la técnica de densidad espectral de potencia para la estimación de parámetros útiles en el algoritmo de trilateración para el problema de posicionamiento. Lo anterior da soporte a un porcentaje de la metodología desarrollada para el objetivo específico 2 orientada a la evaluación de un esquema de multiplexación adaptado a las características del canal.

Se propuso un modelo de canal VLC que considera los aportes de LOS y NLOS para diferentes longitudes de onda que permite analizar el comportamiento de las señales ópticas transmitidas por LEDs RGB en aplicaciones de localización a nivel de interiores. Adicionalmente, el rendimiento del sistema VLP multi-celda basado en el modelo de canal propuesto fue evaluado mediante la simulación Monte Carlo, y arrojó un error promedio de localización cercano a 2.2 cm considerando 7 puntos cromáticos y 28 posiciones de prueba del sensor de luz. Esto ratifica la consistencia del modelo planteado y su adaptación a la variación de la cromaticidad del LED RGB, manteniendo la compatibilidad con el estándar de color CIE 1931 para sistemas VLC. Estos resultados dan soporte a la metodología desarrollada para el objetivo específico 2 y 3, que en síntesis proponen el diseño y evaluación de un sistema IPS basado en un esquema de multiplexación adaptado al canal de comunicación por luz visible.

Respecto al objetivo específico 4 relacionado con la validación del sistema VLP propuesto, se sugirió una metodología para validar el modelo y la arquitectura de posicionamiento me-

diante una demostración experimental, donde el despliegue de hardware fue llevado a cabo en un espacio de laboratorio con niveles de iluminación externa controladas. Se demostró el funcionamiento de la arquitectura para el grado de libertad de cromaticidad para un punto cromático y se evidenció un error promedio de localización cercano a los 6 cm. Adicionalmente, se propuso un método para la calibración del color generado por el transmisor VLP mediante un sistema optoelectrónico de bajo costo que utiliza el espacio de color CIE 1931 para sintonizar el punto cromático.

Se presentó una metodología para la identificación y definición de los diferentes indicadores de desempeño del sistema VLP. En la literatura es común el análisis del indicador de precisión en la estimación de la posición del receptor óptico, el nivel de complejidad o el costo. Sin embargo, en este trabajo se propuso un análisis que cubre la mayoría de los indicadores de desempeño que permiten evaluar el rendimiento de un sistema VLP real y que brinda al usuario una herramienta de análisis flexible que puede ser complementada según los requerimientos del escenario de aplicación. No obstante, de los 8 indicadores de desempeño sugeridos, solo 6 fueron analizados, debido al nivel de desarrollo tecnológico (prueba de concepto) en el cual se encuentra el sistema VLP propuesto.

Finalmente, el resultado de evaluación del sistema VLP basado en LEDs RGB mediante simulación y validación experimental mostró un impacto positivo sobre algunos indicadores de desempeño (precisión, interferencia entre celdas, complejidad y robustez). Esto permite sugerir que la arquitectura VLP propuesta puede ser utilizada de manera funcional en diferentes escenarios como los museos que requieran servicios de localización, donde el control de la cromaticidad de la luz podría impactar positivamente la iluminación de las artes o especímenes y brindar a los visitantes nuevas experiencias visuales. Respecto al rendimiento del sistema VLC, la arquitectura VLP propuesta no exige transmisión de datos codificados para el problema de localización, por lo que la evaluación de la confiabilidad en la transmisión VLC no fue requerida. Aún así, en la demostración experimental cada canal RGB del LED ofrece un ancho de banda de 200 kHz que puede ser explorado en aplicaciones que así lo exijan. Con estos resultados, se complementa y da soporte al objetivo 3.

## 7.2. Líneas Futuras

Mediante la ejecución de este proyecto de investigación, se logró identificar 5 líneas de trabajo que ayudarán a fortalecer el sistema VLP multi-celda basado en LEDs RGB, las cuales se identifican como sigue: exploración de esquemas de modulación multinivel y la multicanalización mediante WDM; optimización del algoritmo de localización; exploración de sensores de imagen en la arquitectura VLP multi-celda basada en LEDs RGB; control en tiempo real del punto cromático en el sistema VLP; sistema de navegación en tiempo real en una red VLP multi-celda. Dichas líneas son definidas en adelante.

- Con el transmisor VLC propuesto para el sistema de posicionamiento, es posible controlar los puntos de cromaticidad que habilitan el sistema de comunicación óptico y a su vez permitirá estudiar y analizar esquemas de modulación multinivel como CSK, explorando la multicanalización mediante la multiplexación por división de longitud de onda. Esto podría impactar positivamente el desempeño del sistema VLP, al igual que brinda canales de comunicación para ser utilizados en escenarios que así lo exijan. Parte de la idea mencionada está siendo trabajada en un proyecto de investigación presentado en modalidad de Maestría, donde se busca evaluar el rendimiento de los canales RGB de un LED en arquitecturas LED a LED y energy harvesting.
- Optimizar los algoritmos propuestos para el problema de localización que puedan ser implementados en sistemas electrónicos y microcontroladores convencionales donde los recursos de memoria y niveles de procesamiento son limitados, con miras a desarrollar sistemas VLP prácticos y de bajo costo.
- Realizar el análisis del sistema VLP basado en LEDs RGB considerando que se tiene como receptores sensores de imágenes que posibilite la convergencia e integración tecnológica con dispositivos móviles para lograr mejores niveles de escalabilidad a nivel experimental.
- Analizar el problema de sintonización y corrección del punto cromático y proponer técnicas de control automático que permitan corregir en tiempo real las emisiones lumínicas del LED RGB, con el fin de mantener el error de localización en rangos permitidos.
- Con la información de localización obtenida con el sistema VLP en escenarios de interiores, se tiene el insumo principal para ser utilizado en un sistema de navegación en tiempo real, el cual podrá ser diseñado e implementado en diferentes plataformas digitales que permitan cubrir las exigencias demandadas por el mercado.

# Bibliografía

- [1] X. Guo, N. Ansari, F. Hu, Y. Shao, N. R. Elikplim, and L. Li, “A survey on fusion-based indoor positioning,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 566–594, 2020.
- [2] N. U. L. Hassan, M. Adeel Pasha, A. Naeem, and T. Jadoon, “Indoor Positioning Using Visible LED Lights: A Survey,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 1–30, 2015.
- [3] X. Li, Z. Ghassemlooy, S. Zvanovec, and L. N. Alves, “An equivalent circuit model of a commercial led with an esd protection component for vlc,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 33, no. 15, pp. 777–779, 2021.
- [4] D. Zurc, M. Arias-Correa, J. Serrano-García, E. Valencia-Días, A. E. Taborda-Hernández, and J. A. Rodríguez-Rodríguez, “Autonomous Navigation for Visually Impaired People in Museographic Spaces , Based on Mobile Application Abstract,” vol. 16, no. 19, pp. 389–426, 2019.
- [5] Y. Zhuang, Y. Cao, Y. Wu, S. Member, J. Thompson, and H. Haas, “A Survey of Positioning Systems Using Visible LED Lights,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1963–1988, 2018.
- [6] M. Maheepala, A. Z. Kouzani, and M. A. Joordens, “Light-Based Indoor Positioning Systems: A Review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 8, pp. 3971–3995, 2020.
- [7] T. H. Do and M. Yoo, “An in-depth survey of visible light communication based positioning systems,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, 2016.
- [8] J. Luo, L. Fan, and H. Li, “Indoor Positioning Systems Based on Visible Light Communication: State of the Art,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2871–2893, 2017.
- [9] S. Li, S. Shen, and H. Steendam, “A positioning algorithm for VLP in the presence of orientation uncertainty,” *Signal Processing*, 2019.
- [10] G. De Blasio, A. Quesada-Arencibia, C. R. Garcia, J. C. Rodriguez-Rodriguez, and R. Moreno-Diaz, “A Protocol-Channel-Based Indoor Positioning Performance Study for Bluetooth Low Energy,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33440–33450, 2018.

- 
- [11] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, “A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13–32, 2009.
- [12] O. Popoola, S. Sinanović, W. Popoola, and R. Ramirez-Iniguez, “Optical Boundaries for LED-Based Indoor Positioning System,” *Computation*, vol. 7, no. 1, pp. 1–25, 2019.
- [13] N. Kalikulov, K. Dautov, and R. C. Kizilirmak, “Location Estimation for DCO-OFDM based VLC in Realistic Indoor Channel,” in *2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, pp. 1–4, IEEE, sep 2017.
- [14] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, “A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568–2599, 2019.
- [15] M. Figueiredo, L. N. Alves, and C. Ribeiro, “Lighting the wireless world: The promise and challenges of visible light communication,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 28–37, 2017.
- [16] Oledcomm, “Oledcomm: The LiFi Technology.” <http://www.oledcomm.com/>, 2021. Accedido 21-2-2021.
- [17] Purelifi, “LiFi Technology - pureLiFi.” <https://purelifi.com/lifi-technology/>, 2021. Accedido 26-08-2021.
- [18] Interact, “Plataforma de IoT Interact — Interact.” <https://www.interact-lighting.com/es-co>, 2022. Accedido 21-1-2022.
- [19] AcuityBrands, “Internet of Things Brands — Acuity Brands.” <https://www.acuitybrands.com/brands/internet-of-things>, 2022. Accedido 21-02-2022.
- [20] L. Mainetti, L. Patrono, and I. Sergi, “A survey on indoor positioning systems,” *2014 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2014*, pp. 111–120, 2014.
- [21] Philips, “Carrefour Lille - Philips LED based Indoor positioning.” <https://www.lighting.philips.com/main/cases/cases/food-and-large-retailers/carrefour-lille>, 2021. Accedido 2-4-2021.
- [22] V. Renaudin, O. Yalak, P. Tomé, and B. Merminod, “Indoor Navigation of Emergency Agents,” *European Journal of Navigation Science*, vol. 5, no. 3, 2007.

- 
- [23] I. Lengua, L. Dunai, G.és@, and B. Defez, “Navigation device for blind people based on Time-of-Flight technology,” *DYNA (Colombia)*, vol. 80, no. 179, pp. 33–41, 2013.
- [24] Mapsted, “Indoor Navigation Solutions: Museums & Art Galleries — Mapsted.” <https://mapsted.com/solutions/museums-and-art-galleries>, 2018. Accedido 09-10-2019.
- [25] Y. Zhuang, Z. Syed, J. Georgy, and N. El-Sheimy *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 18, pp. 118–136, 2015.
- [26] Y. Yoshimura, A. Krebs, and C. Ratti, “Noninvasive Bluetooth Monitoring of Visitors’ Length of Stay at the Louvre,” *IEEE Pervasive Computing*, vol. 16, no. 2, pp. 26–34, 2017.
- [27] R. A. Martínez, F. E. López, J. M. Luna, and A. M. Ramírez, “An Indoor Visible Light Positioning System for Multi-Cell Networks,” *Photonics*, pp. 1–13, 2022.
- [28] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, “LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, 2015.
- [29] P. Chavez-Burbano, V. Guerra, J. Rabadan, and R. Perez-Jimenez, “Optical Camera Communication system for three-dimensional indoor localization,” *Optik*, vol. 192, p. 162870, sep 2019.
- [30] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, “Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-the-art,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 9, pp. 56–62, 2011.
- [31] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, “Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, 2015.
- [32] S. U. Rehman, S. Ullah, P. H. J. Chong, S. Yongchareon, and D. Komosny, “Visible light communication: A system perspective—overview and challenges,” *Sensors*, vol. 19, no. 5, 2019.
- [33] H.-s. Kim, D.-h. Kwon, S.-h. Yang, Y.-h. Son, and S.-k. Han, “Channel Assignment Technique for RF Frequency Reuse in CA-VLC-Based Accurate Optical Indoor Localization,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 14, pp. 2544–2555, 2014.
- [34] Y. Chen, H. Zheng, H. Liu, Z. Han, and Z. Ren, “Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using improved hybrid bat algorithm,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 1–13, 2020.
- [35] K. Lee, H. Park, and J. R. Barry, “Indoor channel characteristics for visible light communications,” *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 2, pp. 217–219, 2011.

- [36] F. Miramirkhani and M. Uysal, “Channel Modeling and Characterization for Visible Light Communications,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, 2015.
- [37] JEITA, “JEITA CP 1222 STANDARDS.” [https://www.jeita.or.jp/cgi-bin/standard\\_e/list.cgi?cateid=1subcateid=50](https://www.jeita.or.jp/cgi-bin/standard_e/list.cgi?cateid=1subcateid=50), 2021. *Accedido* 21 – 3 – 2021.
- [38] J. Armstrong, Y. A. Sekercioglu, and A. Neild, “Visible light positioning: a roadmap for international standardization,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 68–73, 2013.
- [39] I. C. Society, “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications,” *IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011)*, pp. 0–407, 2019.
- [40] J. Hao, J. Chen, and R. Wang, “Visible Light Positioning Using A Single LED Luminaire,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 5, pp. 1–13, 2019.
- [41] H. Li, H. Huang, Y. Xu, Z. Wei, S. Yuan, P. Lin, H. Wu, W. Lei, J. Fang, and Z. Chen, “A fast and high-accuracy real-time visible light positioning system based on single led lamp with a beacon,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 6, pp. 1–12, 2020.
- [42] B. Zhang, M. Zhang, Z. Ghassemlooy, D. Han, and P. Yu, “A visible light positioning system with a novel positioning algorithm and two leds,” in *2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*, pp. 1–3, 2019.
- [43] S. De Lausnay, L. De Strycker, J. P. Goemaere, N. Stevens, and B. Nauwelaers, “A Visible Light Positioning system using Frequency Division Multiple Access with square waves,” *2015, 9th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, ICSPCS 2015 - Proceedings*, 2015.
- [44] Z. Zhou, M. Kavehrad, and P. Deng, “Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications,” *Optical Engineering*, vol. 51, no. 8, pp. 1–6, 2012.
- [45] H. X. Zhao and J. T. Wang, “A Novel Three-Dimensional Algorithm Based on Practical Indoor Visible Light Positioning,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1–8, 2019.
- [46] Y. Wu, K. Hsu, Y. Liu, C. Hong, C. Chow, C. Yeh, X. Liao, K. Lin, and Y. Chen, “Using linear interpolation to reduce the training samples for regression based visible light positioning system,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, pp. 1–5, Apr. 2020.
- [47] P. Du, S. Zhang, C. Chen, A. Alphones, and W. D. Zhong, “Demonstration of a low-complexity indoor visible light positioning system using an enhanced TDOA scheme,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 1–10, 2018.

- [48] H. S. Kim, D. R. Kim, S. H. Yang, Y. H. Son, and S. K. Han, “An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 134–144, 2013.
- [49] C. W. Hsu, J. T. Wu, H. Y. Wang, C. W. Chow, C. H. Lee, M. T. Chu, and C. H. Yeh, “Visible Light Positioning and Lighting Based on Identity Positioning and RF Carrier Allocation Technique Using a Solar Cell Receiver,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1–7, 2016.
- [50] X. Zhang, J. Duan, Y. Fu, and A. Shi, “Theoretical accuracy analysis of indoor visible light communication positioning system based on Received Signal Strength Indicator,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 32, no. 21, pp. 4180–4186, 2014.
- [51] D.-C. Lin, C.-W. Chow, C.-W. Peng, T.-Y. Hung, Y.-H. Chang, S.-H. Song, Y.-S. Lin, Y. Liu, and K.-H. Lin, “Positioning unit cell model duplication with residual concatenation neural network (rcnn) and transfer learning for visible light positioning (vlp),” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 20, pp. 6366–6372, 2021.
- [52] Z. Meiqi, L. Fangjie, G. Weipeng, W. Yuxiang, X. Canyu, P. Qi, and L. Xiaowei, “A three-dimensional indoor positioning technique based on visible light communication using chaotic particle swarm optimization algorithm,” *Optik*, vol. 165, pp. 54–73, 2018.
- [53] A. Costanzo and V. Loscri, “Error compensation in indoor positioning systems based on software defined visible light communication,” *Physical Communication*, vol. 34, pp. 235–245, jun 2019.
- [54] M. A. Vieira, M. Vieira, P. Louro, L. Mateus, and P. Vieira, “Indoor positioning system using a WDM device based on a-SiC:H technology,” *Journal of Luminescence*, vol. 191, pp. 135–138, 2017.
- [55] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, “IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, 2012.
- [56] W. Zhang and M. Kavehrad, “A 2-D indoor localization system based on visible light LED,” *2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, PSST 2012*, vol. 4, pp. 80–81, 2012.
- [57] U. Nadeem, N. U. Hassan, M. A. Pasha, and C. Yuen, “Highly accurate 3D wireless indoor positioning system using white LED lights,” vol. 50, no. 11, pp. 3–4, 2014.
- [58] H. Yang, J. W. M. Bergmans, and T. C. W. Schenk, “Illumination Sensing in LED Lighting Systems Based on Frequency-Division Multiplexing,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 11, pp. 4269–4281, 2009.

- [59] Commission internationale de l'Éclairage (CIE), "International commission on illumination, Colorimetry - Part 3: CIE Tristimulus Values (United Kingdom: Commission internationale de l'Éclairage)." [http://www.cie.co.at/index.php/index.php?i\\_ca\\_id=465](http://www.cie.co.at/index.php/index.php?i_ca_id=465), 2019. Accedido 25-4-2019.
- [60] R. A. Martínez, F. E. López, A. F. Betancur, and J. M. Luna, "Design and Implementation of a Multi-Colour Visible Light Communication System Based on a Light-to-Frequency Receiver," *Photonics*, vol. 6, no. 42, pp. 1–17, 2019.
- [61] J. M. Luna-Rivera, R. Perez-Jimenez, V. Guerra-Yañez, C. Suarez-Rodriguez, and F. A. Delgado-Rajo, "Combined CSK and pulse position modulation scheme for indoor visible light communications," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 10, pp. 762–764, 2014.
- [62] J. M. Luna, V. Guerra, J. Rufo, R. Perez, C. Suarez, and J. Rabadan, "Low-complexity colour-shift keying-based visible light communications system," *IET Optoelectronics*, vol. 9, no. 5, pp. 191–198, 2015.
- [63] K. Zhou, C. Gong, and Z. Xu, "Color Planning and Intercell Interference Coordination for Multicolor Visible Light Communication Networks," *Journal of LightWave Technology*, vol. 35, no. 22, pp. 4980–4993, 2017.
- [64] P. Louro, J. Costa, M. A. Vieira, and M. Vieira, "Optical communication applications based on white LEDs," *Journal of Luminescence*, vol. 191, pp. 122–125, 2017.
- [65] T. Rexhausen, C. S. Chen, and F. Pianese, "Indoor Localization Using Multi-Color Fingerprinting," in *2020 IEEE International Conference on E-health Networking, Application & Services (HEALTHCOM)*, pp. 1–6, 2021.
- [66] S. Shen, S. Li, and H. Steendam, "Simultaneous position and orientation estimation for visible light systems with multiple leds and multiple pds," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 8, pp. 1866–1879, 2020.
- [67] O. Isam Younus, N. Chaudhary, Z. Nazari Chaleshtori, Z. Ghassemlooy, L. Nero Alves, and S. Zvanovec, "The impact of blocking and shadowing on the indoor visible light positioning system," in *2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–6, 2021.
- [68] N. Chaudhary, L. N. Alves, and Z. Ghassemlooy, "Impact of transmitter positioning uncertainty on rss-based visible light positioning accuracy," in *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, pp. 1–6, 2020.
- [69] R. A. Martínez, F. E. López, A. F. Betancur, and J. M. Luna, "Characterization of Light-To-Frequency Converter for Visible Light Communication Systems," *electronics*, pp. 1–11, 2018.

- [70] M. D. Soltani, M. A. Arfaoui, I. Tavakkolnia, A. Ghrayeb, M. Safari, C. M. Assi, M. O. Hasna, and H. Haas, “Bidirectional optical spatial modulation for mobile users: Toward a practical design for lifi systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 9, pp. 2069–2086, 2019.
- [71] MuseoCNS, “Museo de Ciencias Naturales de La Salle - CNS ITM.” <https://museo.itm.edu.co/>, 2019. Accedido 20-3-2020.
- [72] MuseoCNS, “Museo de Ciencias Naturales de La Salle. Museo virtual 360.” <https://my.matterport.com/show/?m=wuvFGjWNdtF>, 2019. Accedido 20-3-2020.
- [73] A. N. Chalmers, C. Cuttle, and R. Van Ryn, “An experimental illuminator for museum conservation lighting,” in *ACOFT/AOS 2006 - Australian Conference on Optical Fibre Technology/Australian Optical Society*, pp. 152–152, 2006.
- [74] J. E. Asmus, “More light for art conservation,” *IEEE Circuits and Devices Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 6–15, 1986.
- [75] D. Plets, S. Bastiaens, L. Martens, and W. Joseph, “An Analysis of the Impact of LED Tilt on Visible Light Positioning Accuracy,” *Electronics*, vol. 8, no. 4, p. 15, 2019.
- [76] Thorlabs, “PDA36A(-EC) Si Switchable Gain Detector. Rep. no. 13050-D03,” tech. rep., 2018. Accedido 20-3-2018.
- [77] F. Seguel, N. Krommenacker, P. Charpentier, and I. Soto, “Visible light positioning based on architecture information: method and performance,” *IET Communications*, vol. 13, pp. 848–856, apr 2019.
- [78] N. Huang, C. Gong, J. Luo, and Z. Xu, “Design and demonstration of robust visible light positioning based on received signal strength,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 20, pp. 5695–5707, 2020.
- [79] P. S. Farahsari, A. Farahzadi, J. Rezazadeh, and A. Bagheri, “A Survey on Indoor Positioning Systems for IoT-Based Applications,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 10, pp. 7680–7699, 2022.
- [80] R. A. Martínez-Ciro, D. M. Morales-Morales, F. E. López-Giraldo, and J. D. Rojas-Usuga, “Visible light communication channel with a smartphone screen as a transmitter and color shift keying modulation for access control applications,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1547, no. 1, 2020.
- [81] Y. Liu, H.-Y. Chen, K. Liang, C.-W. Hsu, C.-W. Chow, and C.-H. Yeh, “Visible Light Communication Using Receivers of Camera Image Sensor and Solar Cell,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 1–7, 2016.

- 
- [82] E. B. Adoptante, K. D. Cadag, V. R. Lualhati, M. L. D. Torregoza, and A. C. Abad, “Audio multicast by Visible Light Communication for location information for the visually impaired,” *8th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, HNICEM 2015*, no. December, pp. 1–6, 2016.
- [83] M. Y. Soh, W. Xian Ng, Q. Zou, D. Lee, T. H. Teo, and K. Seng Yeo, “Real-Time Audio Transmission Using Visible Light Communication,” in *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference, Jeju, Korea (South)*, pp. 2223–2226, IEEE, 2018.
- [84] F. Yang, S. Li, H. Zhang, Y. Niu, C. Qian, and Z. Yang, “Visible Light Positioning via Floor Reflections,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97390–97400, 2019.
- [85] R. A. Martínez, F. E. López, and A. F. Betancur, “RGB Sensor Frequency Response for a Visible Light Communication System,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 12, pp. 4688–4692, 2016.
- [86] R. Martinek, L. Danys, and R. Jaros, “Visible Light Communication System Based on Software Defined Radio: Performance Study of Intelligent Transportation and Indoor Applications,” *Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 1–36, 2019.
- [87] P. Spachos and K. N. Plataniotis, “BLE Beacons for Indoor Positioning at an Interactive IoT-Based Smart Museum,” *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3483–3493, 2020.
- [88] S. De Lausnay, L. De Strycker, J. P. Goemaere, B. Nauwelaers, and N. Stevens, “A survey on multiple access Visible Light Positioning,” *2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies, EmergiTech 2016*, pp. 38–42, 2016.
- [89] S. Yamaguchi, V. V. Mai, T. C. Thang, and A. T. Pham, “Design and performance evaluation of VLC indoor positioning system using optical orthogonal codes,” *2014 IEEE 5th International Conference on Communications and Electronics, IEEE ICCE 2014*, pp. 54–59, 2014.