



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS
Y TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

TÍTULO:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE PARA LA
TRANSMISIÓN DE DATOS EN AMBIENTES INDOOR UTILIZANDO
MODULACIÓN POR POLARIZACIÓN DE LA LUZ**

Autor:

JOSÉ JOSÉ NIEVES LÓPEZ

Director:

Ing. JOHRMAN DE JESÚS VIDES NIÑO

PAMPLONA - N/S, COLOMBIA

ABRIL 2018



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS
Y TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

TÍTULO:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE PARA LA
TRANSMISIÓN DE DATOS EN AMBIENTES INDOOR UTILIZANDO
MODULACIÓN POR POLARIZACIÓN DE LA LUZ**

Autor:

JOSÉ JOSÉ NIEVES LÓPEZ

Director:

Ing. JOHRMAN DE JESÚS VIDES NIÑO

JURADO CALIFICADOR:

M.Sc. LUIS ENRIQUE MENDOZA

M.Sc. NYDIA SUSANA SANDOVAL CARRERO

Ing. JOHRMAN DE JESÚS VIDES NIÑO

PAMPLONA - N/S, COLOMBIA

ABRIL 2018

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS
Y TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR POR ÉL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE PARA LA
TRANSMISIÓN DE DATOS EN AMBIENTES INDOOR UTILIZANDO
MODULACIÓN POR POLARIZACIÓN DE LA LUZ**

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: ABRIL 2017

FECHA DE TERMINACIÓN DEL TRABAJO: ABRIL 2018

NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN PARA LA SUSTENTACIÓN:

**JOSÉ JOSÉ NIEVES LÓPEZ
AUTOR**

**Ing. JOHRMAN DE J. VIDES NIÑO.
DIRECTOR**

**M.Sc. HERNANDO J. VELANDIA V
DIRECTOR DEL PROGRAMA**

JURADO CALIFICADOR:

M.Sc. LUIS ENRIQUE MENDOZA

M.Sc. NYDIA S. SANDOVAL C.

Ing. JOHRMAN DE J. VIDES NIÑO

**PAMPLONA – N/S, COLOMBIA
ABRIL 2018**

DEDICATORIA

Esta tesis va dedica de manera muy especial a mi madre Elcy Judith López, quien se ha esforzado y sacrificado día a día para que pueda sacar adelante ésta profesión. A mis queridos hermano que son parte incondicional de mi vida, a mi novia Maureen Casierra que me brindó su apoyo y amor sin esperar nada a cambio; a mis amigos que me acompañaron en el transcurso de la carrera y a mi padre que aunque no se encuentra en este mundo lo tengo presente siempre en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por permitirme avanzar en mi camino profesional, doy gracias a mi familia, a mi novia, a mis amigos, a mis profesores y a todas esas personas que de alguna manera me brindaron su apoyo para que no me diera por vencido.

RESUMEN

La presente investigación plantea simular tres diseños de un sistema de comunicación óptico inalámbrico por luz visible (VLC–*Visible Light Communication*), aprovechando la banda del espectro electromagnético en el rango de 400THz a 800THz, a partir de las técnicas de modulación digital PPM y OOK sobre la polarización de luz, para llevar a cabo una transmisión simplex de datos a través de un bloque generador de estados binario en Simulink, como también por medio de la inserción de una imagen del lado del emisor, el sistema está pensado para ser aplicado en un ambiente *indoor*, con el fin de hallar aquel diseño que estime el mayor rendimiento y menor coste computacional. Además se determinará la intensidad de luz y cobertura en equipos receptores a través de la simulación del modelo de propagación determinista Ray Tracing.

Se estableció las técnicas de codificación RZ, NRZ unipolar y Manchester Diferencial para una modulación OOK y PPM, con la intención de realizar el proceso de conversión de la señal digital en tramas alteradas, la dificultad que se presentó tuvo que ver con las codificaciones en la modulación PPM, que al ser empleado las tramas eran enviadas a periodos no constantes, provocando alteraciones bruscas en el tiempo, lo que reduce el rendimiento al tardar enormemente a comparación de las otras técnicas al emitir el dato. Dando como resultado la selección del modulador OOK Manchester diferencial como el más óptimo debido a su auto sincronización, menor procesamiento con respecto al PPM, mayor cantidad de símbolos por segundos en la simulación a un tiempo parcialmente constante.

CONTENIDO

Capítulo 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento Del Problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
Capítulo 2	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Ondas Electromagnéticas	5
2.1.1. Radiación Electromagnética	5
2.1.2. Campo Electromagnético	6
2.1.3. Espectro Electromagnético	6
2.1.3.1. Luz	7
2.1.3.1.1. Fotón	8
2.1.4. Espectro de Radiofrecuencia	8
2.1.5. Espectro Radioeléctrico	9
2.1.6. Propiedades de la Luz	10
2.1.6.1. Iluminación	10
2.1.6.2. Energía Radiante	10
2.1.6.3. Energía Lumínica	10
2.1.6.4. Luminancia	11
2.1.6.5. Flujo Luminoso	11
2.1.6.6. Flujo Radiante	12
2.1.6.7. Iluminancia	12
2.1.6.8. Intensidad Luminosa	13
2.1.6.9. Irradiancia	14
2.1.6.10. Color	14
2.1.7. Características de las Ondas	15
2.1.7.1. Reflexión	15
2.1.7.2. Refracción	16
2.1.8. Polarización Electromagnética	16
2.1.8.1. Interferencia	16
2.1.8.2. Atenuación	16
2.1.8.3. Absorción	16
2.1.8.4. Difracción	17
2.1.8.5. Ruido	17
2.1.8.6. Relación Señal a Ruido SNR	17
2.2. Comunicaciones no guiadas	18
2.2.1. Comunicaciones radiofrecuencia	18
2.2.1.1. WPAN: Red de área personal inalámbrica	18
2.2.1.2. WLAN: Red de área local inalámbrica	18
2.2.2. Comunicaciones Ópticas	19

2.2.2.1.	Comunicación óptica por el espacio libre FSO	19
2.3.	Dispositivos esenciales de un sistema de iluminación	20
2.3.1.	LED: Diodo Emisor de Luz.....	20
2.3.2.	Fotodiodo	21
2.3.2.1.	Responsividad	22
2.4.	Protocolos de Red	23
2.4.1.	Modelo OSI	23
2.4.1.1.	Nivel Físico	23
2.4.1.2.	Nivel de Enlace de Datos.....	23
2.4.1.3.	Nivel de Red	23
2.4.1.4.	Nivel de Transporte.....	24
2.4.1.5.	Nivel de Sesión	24
2.4.1.6.	Nivel de presentación	24
2.4.1.7.	Nivel de aplicación	24
2.4.2.	Modelo TCP/IP.....	25
2.4.2.1.	Capa de Aplicación	25
2.4.2.2.	Capa de Transporte	25
2.4.2.3.	Capa de Internet	26
2.4.2.4.	Capa de Acceso al Medio	26
2.5.	Características de un sistema de comunicación	27
2.5.1.	Ancho de Banda	27
2.5.2.	Modos de Transmisión de Datos	27
2.5.2.1.	Modo simplex.....	27
2.5.2.2.	Modo Half-Duplex	27
2.5.2.3.	Modo Full-Duplex.....	27
2.5.3.	Técnicas de Transmisión	28
2.5.3.1.	Transmisión Asíncrona	28
2.5.3.2.	Transmisión Síncrona	28
2.5.4.	Tipos de sistemas de Comunicación	29
2.5.4.1.	SISO: Una Entrada, una Salida	29
2.5.4.2.	MISO: Múltiples entradas, múltiples salidas	29
2.5.4.3.	SIMO: Una entrada, múltiples salidas.....	29
2.5.4.4.	MIMO: Múltiples entradas, múltiples salidas.....	29
2.5.5.	Características de Propagación de la Señal.....	29
2.5.5.1.	LOS: Propagación de la señal con línea de vista	29
2.5.5.2.	NLOS: Sin línea de vista.....	30
2.5.6.	Modulaciones.....	30
2.5.6.1.	Modulación OOK (<i>On-Off Keying</i>)	30
2.5.6.2.	Modulador PPM	31
2.6.	VLC: Comunicación por luz visible	33
2.6.1.	Diferencias entre VLC, IR Y RF	34
2.6.2.	Tecnología Li-Fi	35
2.6.2.1.	Aplicaciones.....	35
2.7.	Normatividad	37
2.7.1.	IEEE 802.15.....	38

2.7.2.	IEEE 802.15.7.....	38
2.7.2.1.	Modelo PHY.....	39
2.7.2.2.	Modelo PHY II.....	40
2.7.2.3.	Modelo PHY III.....	41
Capítulo 3 43		
3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE		
43		
3.1.	Etapa de Transmisión	43
3.2.	Consideraciones del Canal de Transmisión.....	44
3.3.	Etapa de Recepción	48
Capítulo 4 49		
SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE.....		
49		
4.1.	Simulación Etapa de Transmisión.....	49
4.1.1	Modulación OOK-NRZ.....	49
4.1.2	Simulación OOK RZ.....	61
4.1.3	Simulación OOK Manchester Diferencial.....	62
4.1.4	Simulación PPM Manchester Diferencial.....	63
4.1.5	Resultados Obtenidos	63
4.2	Simulación de la Etapa de Recepción.....	65
4.3	Simulación de la Etapa de Transmisora y Receptora de una imagen ingresada por el usuario.....	69
4.3.1	Resultados Obtenidos al Insertar la Imagen	79
4.4	Esquema de Dispersión del Color para un Sistema de Comunicación por Polarización de la Luz.	81
4.5	SIMULACIÓN DEL CANAL DE PROPAGACION	82
4.6	Diseño De La Interfaz De Usuario GUI	93
4.7	Diseño de la etapa de luminosidad	95
4.8	Diseño de la etapa SNR (relación señal a ruido)	99
Capítulo 5 103		
ANÁLISIS ECONÓMICO.....		
103		
Capítulo 6 104		
Marco Legal 104		
Capítulo 7 105		
INFLUENCIA AMBIENTAL DEL TRABAJO		
105		
Capítulo 8 106		
Resultados 106		
8.1.	Etapa Transmisora	106
8.2.	Valoración de las técnicas de modulación.....	106
8.3.	Valoración de la Etapa Receptora.....	107
8.4.	Etapa de Dispersión	107
8.5.	Valoración de la Etapa de Modelaje.....	108
Capítulo 9 109		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
109		
9.1.	CONCLUSIONES.....	109
9.2.	RECOMENDACIONES	112
9.3.	BIBLIOGRAFIA	113

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1.	Planteamiento Del Problema.....	2
1.2.	Justificación.....	3
1.3.	Objetivos	4

La idea de transmitir información a través de la luz no es nueva, ya que desde 1979 [F. R. Gfeller, 1979] se desarrollaron las primeras creaciones en el ámbito de las comunicaciones ópticas no guiadas con el propósito de plantear nuevos sistemas de comunicaciones en bandas que no trabajen sobre el hoy saturado espectro radioeléctrico, la gran utilidad de implementar sistemas de comunicaciones sobre un espectro visible es su doble funcionalidad, iluminar ambientes y muy altas frecuencias de portadoras que permiten un mayor ancho banda para servicios de comunicación a distancias cortas. Aunque actualmente en el mercado de las telecomunicaciones los sistemas de radiofrecuencia son quienes rigen las ventas, las comunicaciones ópticas no guiadas tienen propiedades que les proporcionan postularse como una tecnología complementaria [Boucouvalas, 2005].

Trabajar con la modulación por polarización de la luz es la esencia del diseño y el reto que se quiere lograr, ya que los métodos existentes se basan en modulación por intensidad, lo que hace que los dispositivos receptores necesiten una mayor carga y esfuerzo computacional innecesario debido a la alta frecuencia de pulso para evitar el parpadeo, dicho de otra forma la modulación por polarización utiliza

pulsos bajos lo que permite esfuerzo ligero de los equipos, al transportar el mensaje en el espectro visible al ojo humano. Esta selección de modulación va de la mano de la simulación del modelo de propagación determinístico en interiores Ray Tracing, para predecir y mostrar la mejor área de cobertura, la intensidad de la luz emitida a diferentes ángulos, nivel de interferencia de la señal, relación señal a ruido, distancias entre receptor /transmisor y potencias de transmisión de la luz visible aplicada en interiores. Todo esto con la intención de que se posibilite nuevas alternativas, para mitigar la crisis de saturación del espectro radioeléctrico.

1.1. Planteamiento Del Problema

El espectro radioeléctrico actualmente se encuentra saturado [F. R. Gfeller, 1979] debido a la constante demanda de servicios de comunicaciones inalámbricas que cada vez más exigen mayor ancho de banda, por lo que ha inducido a investigaciones que propongan nuevas técnicas de modulación, corrección y detección de errores para aumentar la capacidad de un canal de transmisión, pero estas técnicas cada vez más avanzadas requieren mayor potencia computacional [Boucouvalas, 2005] limitando los dispositivos que puedan ser usados dejando de lado los equipos o gadget considerados *wearables* que usualmente por su tamaño no pueden gozar de una alta capacidad computacional. Además por características intrínsecas de las señales de RF (Radio Frecuencia) suelen transmitirse sobre obstáculos o materiales usuales, que visto de un modo es una ventaja, pero una gran desventaja para la seguridad de una red que al poder penetrar muros y demás obstáculos no se tiene control sobre quien realmente está recibiendo los datos así estén cifrados poniendo en riesgo la privacidad de la información.

En los sistemas VLC, se pueden suplir algunas de las desventajas de las señales RF, al trabajar sobre luz visible no está ocupando la banda ya saturada de Radiofrecuencia sino que utiliza como señales portadoras aquellas que van desde

400THz a 800THz ofreciendo más ancho de banda para transmisión de datos además por la alta frecuencia de trabajo no podría propagarse a través de obstáculos y de igual manera su propagación puede estar más controlada con la acción de cerrar una puerta o cortina evitando que nuestros datos lleguen a un posible maléfico receptor.

Por otro lado, la mayoría de los sistemas actuales de comunicación por luz visible utilizan la modulación por intensidad de la luz lo que produce una serie de parpadeos que llegan a ser incómodos a los usuarios sino se aumenta la frecuencia de los pulsos, pero esto trae un nuevo problema, el cual es un aumento significativo en la carga computacional de los diferentes dispositivos receptores como también efectos negativos en la vida útil de los equipos debido a la descarga temprana de potencia.

1.2. Justificación

La tecnología por Radiofrecuencia presenta una serie de desventajas y restricciones en diferentes ambientes como por ejemplo: aviones de transporte, áreas de resonancia magnéticas en hospitales y comunicaciones subacuáticas, además existe una congestión debido a los múltiples servicios de comunicación inalámbrica ofrecidos en esta porción del espectro ya sea: telefonía móvil, WiFi, Bluetooth, emisiones radiales, radioenlaces, televisión satelital, o cualquier otra comunicación sin cables. Sumado a esto existen algoritmos capaces de capturar los paquetes enviados de un punto A-Punto B, debido a que las ondas RF trabajan a frecuencias con longitudes de onda relativamente grandes en comparación con el haz de luz.

La propuesta de este trabajo es diseñar una nueva alternativa que asista la comunicación inalámbrica actual, mediante el uso de la considerable y deshabitada porción espectral perteneciente a la luz visible, dicho sistema será capaz de enviar datos unidireccionales, a distancias cortas, en ambientes indoor;

lo que garantiza de cierta manera una mejor defensa de los activos ya que los haz de luz no traspasan paredes. Finalmente se hará uso de técnicas de modulación tradicionales como PPM y OOK por polarización de la luz, en vez de la modulación por intensidad, todo esto con la intención de disminuir los niveles de frecuencia de oscilación de la señal para evitar el alto consumo de carga computacional de los equipos que reciben la señal. Esto va acompañado de diferentes simulaciones a partir de la selección del modelo de propagación determinístico Ray Tracing para conocer los niveles de potencia, áreas de cobertura de la señal, nivel de interferencia e intensidad de la luz a diferentes ángulos, para dar movilidad a los usuarios.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de comunicación por luz visible para transmitir datos en ambientes indoor utilizando técnicas de modulación por la polarización de la luz.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un transmisor que filtre una polarización de la luz utilizando el principio de funcionamiento de las pantallas de cristal líquido para modular en PPM y OOK.
- Diseñar un equipo receptor capaz de detectar los cambios de estados binarios de la modulación por polarización de la luz con el fin de demodular los datos enviados.
- Plantear un esquema de corrección de errores basado en la dispersión del color por polarización de la luz para la adición de movilidad a equipos receptores portables.
- Simular modelos de propagación determinísticos para predecir el área de cobertura, nivel de interferencia, relación señal a ruido, distancias entre receptor/transmisor y potencias de transmisión de la luz visible aplicada en interiores.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1.	Ondas Electromagnéticas	5
2.2.	Comunicaciones no guiadas	18
2.3.	Dispositivos esenciales de un sistema de iluminación	20
2.4.	Protocolos de Red	23
2.5.	Características de un sistema de comunicación	27
2.5.3.	Técnicas de Transmisión	28
2.6.	VLC: Comunicación por luz visible	33
2.7.	Normatividad	37
3.1.	Etapa de Transmisión	43
3.2.	Consideraciones del Canal de Transmisión	44
3.3.	Etapa de Recepción	48

2.1. Ondas Electromagnéticas

2.1.1. Radiación Electromagnética

La radiación es una forma de energía en movimiento, que está presente en el entorno de manera natural y artificial. La radiación electromagnética es un tipo de campo electromagnético variable que se irradia a través del espacio llevando energía, y que puede propagarse en el vacío (ver **figura 1**).

(BRITANNICA Encyclopædia, 2013)

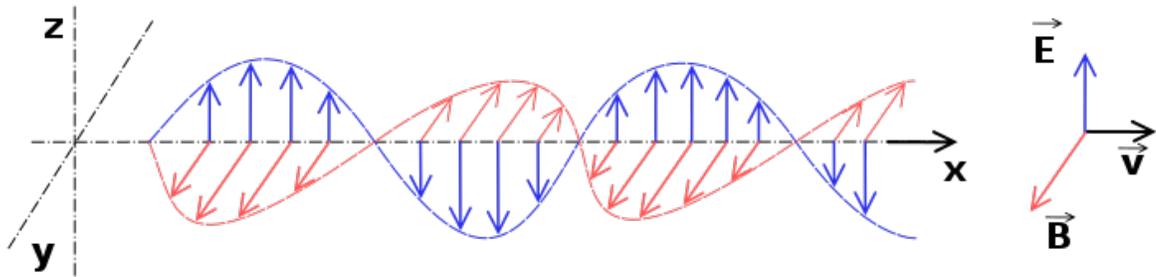


Figura 1. Radiación Electromagnética.

2.1.2. Campo Electromagnético

Un campo electromagnético es un campo físico, que se crea a partir de elementos cargados eléctricamente, y que afecta a partículas con carga eléctrica, dicho campo está compuesto por una parte eléctrica y una parte magnética. Su función es transportar energía, es decir emiten radiación de dos tipos (ionizantes y no-ionizantes).

2.1.3. Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es el intervalo de todas las radiaciones electromagnéticas existentes, y está constituido por las ondas de radio, microonda, radiación infrarroja, luz visible, luz ultravioleta, rayos gamma, etc. (Blanca), sus rangos de longitud de onda se muestran a continuación en la **Figura 2**.

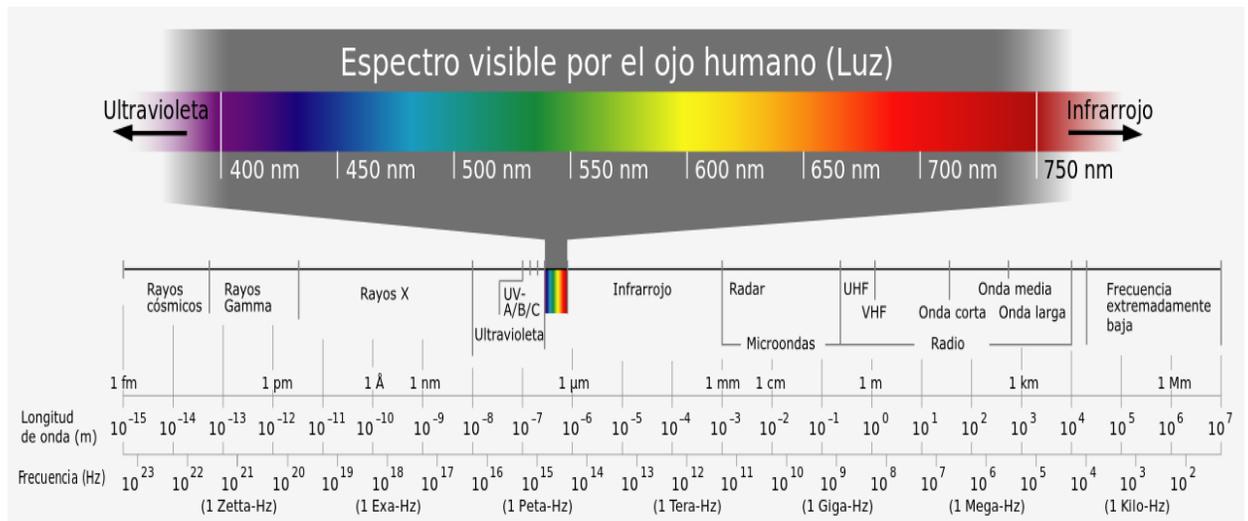


Figura 2. Espectro Electromagnético.

2.1.3.1. Luz

La luz es una forma de radiación electromagnética que está compuesta por la superposición de luces de diferentes colores (rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta) este fenómeno se debe a que cada destello cuenta con longitudes de onda y frecuencia diferentes, asimismo su rango de frecuencia está alrededor de 10kHz - 300GHz y está compuesto por la luz infrarroja, luz visible, y luz ultravioleta. Su longitud de onda se calcula así:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ [m/s]}}{f \text{ [Hz]}}$$

\longrightarrow Velocidad de la luz
 \longrightarrow Frecuencia

Las ondas de la luz se caracterizan por su corta distancia y por lo regular se expresan en nanómetros. (Frenzel, 2003). Asimismo la luz es la región del espectro cuyas longitudes de ondas son perceptibles por el ojo humano, su intervalo es de 390nm – 750nm y es la porción de interés en la que se enfoca este trabajo. (WALDMAN, 2002)

2.1.3.1.1. Fotón

Es la partícula elemental encargada de portar todas las formas de radiación electromagnética, cuenta con una masa fija de cero, y a su vez viaja en el vacío con una velocidad constante oscilando en múltiples orientaciones. Posee la propiedad de las ondas al cambiar de dirección o refractarse al atravesar un cristal y al mismo tiempo actúa como una partícula encargado de transferir energía al interactuar con la materia, de esta manera está representada:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

Dónde:

ν Frecuencia de la onda.

h Constante de Planck.

c Velocidad de la luz.

λ Longitud de onda

La energía producida es aproximadamente $E = 4 \times 10^{-19}$ Julios. (ROCHA, 1988).

2.1.4. Espectro de Radiofrecuencia

Es una porción del espectro electromagnético por lo general su abreviación es RF, este intervalo es la porción más significativa para las comunicaciones inalámbricas ubicada entre los 3 KHz – 300 GHz. Dichas ondas son transmitidas aplicando una corriente alterna de un generador a una antena y se dividen así: “Ver **tabla 1**”.

Nombre de frecuencia	Abreviatura	Rango de Frecuencias	Longitud de onda
Muy Baja Frecuencia	VLF	3 kHz – 30 kHz	100 m – 10 km
Baja Frecuencia	LF	30 kHz – 300 kHz	10 km – 1 km
Media Frecuencia	MF	300 kHz– 3.000 kHz	1 – 100 m
Alta Frecuencia	HF	3 MHz – 30 MHz	100 – 10 m
Muy Alta Frecuencia	VHF	30 MHz – 300 MHz	10 – 1 m
Ultra Alta Frecuencia	UHF	300 MHz – 3.000 MHz	1 – 100 mm
Súper Alta Frecuencia	SHF	3 GHz – 30 GHz	100 – 10 mm
Frecuencia Extremadamente Alta	EHF	30 GHz – 300 GHz	10 – 1 mm

Tabla 1. Clasificación de las ondas de radiofrecuencia (FURLANETTO, OH, & BRIGGS, 2006)

2.1.5. Espectro Radioeléctrico

Es la porción del espectro de radiofrecuencia por el cual se transmiten las frecuencias de ondas de radio, capaces de proporcionar telecomunicaciones ya sea radio, Internet, telefonía móvil, televisión digital, etc. Los gobiernos de cada país son los entes encargados de su administración, siendo en Colombia la ANE (Agencia Nacional del Espectro) el ente responsable. Se dividen en tres bandas UHF, VHF, HF, las cuales pertenecen al espectro de radiofrecuencia, ver tabla 1. (JÁCOME & DURAN).

2.1.6. Propiedades de la Luz

2.1.6.1. Iluminación

Es la acción de alumbrar o emitir luz y claridad a través de un cuerpo natural o dispositivo artificial que es instalado en un recurso físico interior o exterior para brindar efectos luminosos

La iluminación óptima para el ojo humano, está en un rango de luminancia de 100 Cd/ m², si es mayor puede causar deslumbramiento, la deficiencia de iluminación en el trabajo puede provocar fatiga visual y daños en el sistema nervioso de los seres humanos. (COSTA MUÑOZ, 2010).

2.1.6.2. Energía Radiante

Es la energía que poseen las ondas electromagnéticas para propagarse en el vacío y que es transmitida a través de fotones, es dependiente de la intensidad de la luz y el color. Asimismo su potencia lumínica está dada por:

$$P_{lum} = \frac{dE_{lum}}{dt} = \int_0^{\infty} n_{fot}(\nu)h\nu d\nu$$

Dónde:

$n_{fot}(\nu)$ Número de fotones a una frecuencia (ν) por unidad de tiempo.

$h = 6.63 \times 10^{-34}$ J/s Constante de Planck. (SOLBES & TARÍN, 1998)

2.1.6.3. Energía Lumínica

Es la porción percibida de la energía transportada por la luz y que se manifiesta sobre la materia. Se simboliza como Q_v [lm*s] y matemáticamente está dado por:

$$Q_v = F \cdot t$$

Dónde:

F flujo luminoso.

t tiempo. (QUINTERO RESTREPO, 2015)

2.1.6.4. Luminancia

Es el resultado de luminosidad que produce una superficie en el ojo originado por una fuente de luz, describiendo la luminancia en un tono más físico es la densidad angular de flujo luminoso que incide a una superficie siguiendo una dirección. Asimismo se puede especificar como la densidad superficial de intensidad luminosa que sigue un mismo sentido o el brillo percibido. Explicada en la siguiente expresión matemática:

$$L_V = \frac{d^2 F}{dS d\Omega \cos \theta}$$

Dónde:

L_V Luminancia, [candela * metro cuadrado (cd/m²)].

F Flujo luminoso [lumen (lm)].

dS Diferencial de superficie [metros cuadrados (m²)].

$d\Omega$ Diferencial ángulo sólido [estereorradianes (sr)].

θ Ángulo entre la normal de la superficie y la dirección. (BELÉNDEZ A. , 2009)

2.1.6.5. Flujo Luminoso

El flujo luminoso calcula la potencia luminosa emitida capaz de percibir el ojo humano, determinado así:

$$F = 683,002 \int_{\lambda_{\text{visible}}} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Su unidad de medida es el lumen o cantidad de luz visible en un ángulo determinado [lm=cd * sr = lx * m²]

Dónde:

sr= Estereorradián, unidad que mide el ángulo sólido.

lx= Mide el nivel de iluminación (lux = 1/683 [W/m²]).

$\Phi(\lambda)$ Potencia radiante espectral del punto de luz.

$V(\lambda)$ Función de sensibilidad luminosa.

En resumen el flujo luminoso es la suma de las potencias en todas las longitudes de ondas visibles por el ojo humano (HARVEY, 2003).

2.1.6.6. Flujo Radiante

Es la cantidad de potencia de una radiación electromagnética en unidad de tiempo que es emitida, transmitida, reflejada o recibida por una fuente. Determinado así:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Dónde:

dQ_e derivada de la energía radiante emitida, reflejada transmitida o recibida.

dt Es la derivada del tiempo.

La unidad del flujo radiante es el Watt y relaciona la energía por unidad de tiempo (1W=1julio / segundo). (HOWELL, MENGUC, & SIEGEL, 2010).

2.1.6.7. Iluminancia

Es la cantidad de flujo luminoso que incide en una superficie por unidad de área, está definido así:

$$E_v = \frac{dF}{dS}$$

Dónde:

E_v Iluminancia [lux].

F Flujo luminoso incidente [lum].

dS Diferencial de área de incidencia [m^2].

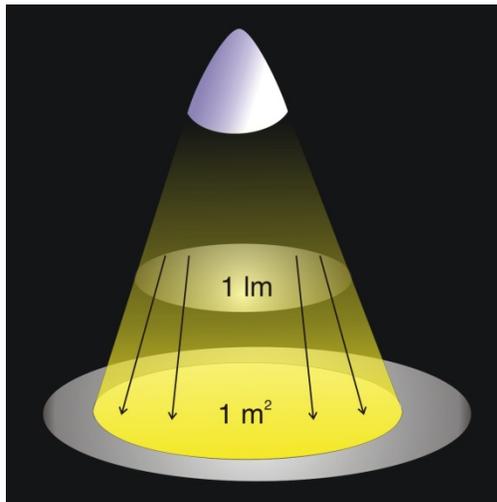


Figura 3. Fenómeno de iluminancia

En la **Figura 3** se puede ver la incidencia de la luz en una superficie, lo que es posible de medir gracias a la iluminancia. La iluminancia también se puede expresar como: $E_v = \text{brillo} / \text{área}$ (MUÑOZ A. V., 2013).

2.1.6.8. Intensidad Luminosa

Es la cantidad de flujo luminoso emitida por una fuente por unidad de ángulo sólido medido en candela ($\text{Cd} = 1/683 \text{W/sr}$), este fenómeno define como se distribuye el flujo luminoso en el espacio. Su fórmula viene dada por:

$$I_v = \frac{dF}{d\Omega}$$

Dónde:

F Flujo luminoso [lm].

$d\Omega$ Diferencial ángulo sólido [sr] (HARPER, 2003).

2.1.6.9. Irradiancia

Está definida como el valor de la potencia incidente por unidad de superficie en una radiación electromagnética en un punto, su expresión matemática es:

(MUÑOZ A. V., 2013)

$$I = \frac{P_{inc}}{A_s} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Dónde:

P_{inc} Potencia incidente.

A_s Área de la superficie en que incide la onda.

También se puede expresar como la potencia promedio de la onda así:

$$SAV = \frac{E_0 * H_0}{2} \text{ [W/m]}$$

2.1.6.10. Color

Es la apreciación ocasionada por una tonalidad de luz en los órganos oculares del cuerpo, esta se forma en el cerebro a partir de señales nerviosas emitidas por los foto receptores (conos y bastones) ubicados en la retina (tejido sensible a la luz, capaz de convertir los rayos lumínicos en señales eléctricas) del ojo, asimismo analiza y reconoce las múltiples longitudes de ondas de la porción de la luz visible del espectro electromagnético.

Cualquier objeto iluminado absorbe una fracción de la radiación incidente y refleja las sobrantes, siendo estas últimas percibidas por el ojo y representadas en el cerebro como diferentes colores de acuerdo a la longitud de onda respectiva siempre y cuando la iluminación sea optimo, de lo contrario se ve a blanco (suma de todos los colores) y negro (ausencia de la luz producto de los colores cian, magenta y amarillo). (ZELANSKI & FISHER, 2001)

El color cuenta con una propiedad llamada luminosidad o claridad que vendría siendo la percepción lineal que tiene el receptor en referencia a los múltiples colores donde un color blanco es 100 % luminoso y uno oscuro es 0 % luminoso,

matemáticamente se puede medir mediante la fórmula otorgada por la CIE (Comisión Internacional de la Iluminación, facultad internacional encargada de velar por la luz, iluminación, color y espacios de color.) así (SÈVE, 2009):

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16, \quad \text{donde } f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & \text{si } t > (\frac{6}{29})^3, \\ \frac{1}{3}(\frac{29}{6})^2 t + \frac{4}{29} & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Para todo:

L [cd.m⁻²] Claridad o luminosidad toma valores de 0 - 100.

Yn Luminancia final.

Y Luminancia inicial.

2.1.7. Características de las Ondas

2.1.7.1. Reflexión

Es el rebote o el cambio de dirección que sufren los rayos de luz cuando entran en contacto con la superficie de un medio distinto y que se divide en un rayo incidente y un rayo reflejado ver **figura 4**.

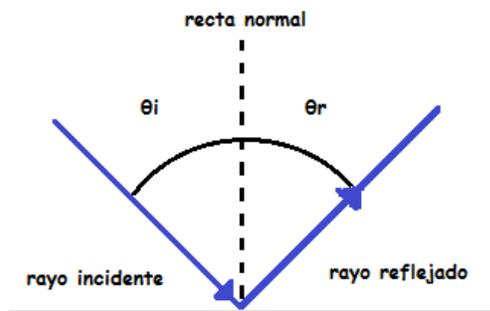


Figura 4. Reflexión de la luz.

Donde:

θi ángulo de incidencia.

θr ángulo reflejado.

Para todo $\Theta_i = \Theta_r$, la velocidad de la luz, la frecuencia y la longitud de onda no cambian.

2.1.7.2. Refracción

Es el cambio de dirección que producen los rayos de luz al cambiar de un medio a otro alterando su velocidad de propagación haciéndola más lenta de acuerdo a la densidad del material.

2.1.8. Polarización Electromagnética

Es la propiedad de las ondas electromagnéticas, donde el campo eléctrico vibra en un solo plano u orientación en el espacio. (HZN & COEMANS)

2.1.8.1. Interferencia

Es el fenómeno que presentan las ondas cuando se superponen entre sí, puede ser destructiva (si forma un ángulo de 180° o π) ocasionando una reducción de amplitud o constructiva (ángulo de 0°) provocando una onda de mayor amplitud o flujo luminoso.

2.1.8.2. Atenuación

Es la pérdida de intensidad de potencia que ocurre cuando las ondas electromagnéticas son irradiadas por la fuente, lo que conlleva al repartimiento o pérdida de energía en frentes de ondas mayores al viajar por un medio de transmisión. (GÓMEZ CAPERA, 2002)

2.1.8.3. Absorción

Es la disminución exponencial de la intensidad de una onda cuando interactúa con el espesor del medio por el que se propaga o atraviesa, esto se debe al rozamiento con la materia; provocando que la energía se convierta en calor y de esta manera se reduzca la cantidad transportada. Matemáticamente expresada así:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

Donde:

I_0 intensidad inicial de la onda [$W \cdot m^{-2}$].

α Es el coeficiente de absorción determinado por el tipo de medio [m⁻¹].

x Espesor o punto de la recta [m]. (PLAZA, 2005.)

2.1.8.4. Difracción

Es la desviación de las ondas electromagnéticas al chocar con un o impedimento como un obstáculo o rendijas. (PESA, 1999)

2.1.8.5. Ruido

Son las señales o perturbaciones eléctricas no deseadas que interfieren y se combinan en el mensaje a transmitir enmascarando la señal. Igualmente este fenómeno es causado por elementos electrónicos como: amplificadores, resistores, artefactos eléctricos e interferencias externas, provocando choques y agitación en los electrones lo que lo hace imposible de eliminar por completo, aunque es posible reducir su nivel para mejorar los requisitos de la comunicación.

Existen múltiples tipos de ruido, entre los más representativos están el de disparo que es un ruido no correlacionado (independiente de la señal) aditivo localizado en los transistores y diodos debido a la aparición de electrones y huecos en la salida del equipo, este tipo de perturbación suele superponerse a cualquier otro tipo de ruido. Por último está el ruido térmico ocasionado por la fluctuación de la corriente en el conductor.

2.1.8.6. Relación Señal a Ruido SNR

Es la relación en decibeles entre la cantidad de potencia transmitida y la potencia de ruido que la interrumpe, sirve para conocer la calidad o pureza de la señal resultante.

$$SNR = 10 \log (Potencia\ señal / Potencia\ ruido) [dB]$$

2.2. Comunicaciones no guiadas

Es un tipo de comunicación donde no existe un medio de propagación físico, el intercambio de datos entre el emisor y el receptor es sin cables haciendo uso del espacio libre para brindar movilidad y flexibilidad al usuario, haciendo uso de la modulación de la señal, servicios como el Internet y telefonía móvil han tenido mayor crecimiento en los últimos años lo que ha llevado a los usuarios a disponer de este tipo de ondas radioeléctricas. (CALVO, 2001)

2.2.1. Comunicaciones radiofrecuencia

2.2.1.1. WPAN: Red de área personal inalámbrica

Es una red encargada de comunicar y dar cobertura a dispositivos personales como ordenadores, módems, impresoras, terminales móviles y equipos portátiles a distancias relativamente cortas brindando menos consumo de energía debido a la baja infraestructura y velocidades de datos de hasta 1Mbps, su arquitectura se basa en maestro esclavo peer to peer 2 es decir existe un dispositivo central que es indispensable para que la red pueda funcionar, son ejemplos de esta tecnología: Bluetooth, ZigBee, RFID .

El alcance de este tipo de redes es por lo máximo de 10 metros. Su propósito es comunicar cualquier dispositivo personal (ordenador, terminal móvil, PDA, etc.) con sus periféricos, permitiendo una comunicación directa a corta distancia.

2.2.1.2. WLAN: Red de área local inalámbrica

Es un sistema de comunicación no guiada encargada de transmitir y recibir datos a través de las ondas de radiofrecuencia, se encuentra regida bajo la norma IEEE 802.11. Generalmente cubre distancias de 10 a 100 de metros con un índice de transmisión de datos de hasta 11Mbps, emplea la banda de 902 MHz, 2.4 GHz y 5 GHz proporcionando conectividad entre iguales (peer to peer), normalmente hace uso de Access Point (Puntos de Acceso) o LAN cableadas para permitir el crecimiento de la red posibilitando la conexión de nuevos dispositivos

inalámbricos, su uso frecuente es distribuido en escenarios residenciales, corporativos, industriales, rurales, educativos, comerciales, transporte, etc.

Los principales beneficios de la tecnología WLAN es ofrecer movilidad a los usuarios que estén ubicados en cualquier punto del recurso físico, adicionalmente brinda flexibilidad, es decir permite el acceso a la red donde el cable no le es permitido llegar por razones de infraestructura y costo, su principal desventaja tiene que ver con la seguridad debido a que sus paquetes pueden ser interceptados por terceros. (MENDEZ & VICTOR, 2016)

2.2.2. Comunicaciones Ópticas

Es un sistema de comunicación que utiliza la luz para portar la información a un receptor ya sea mediante un medio no guiado (inalámbrico - luz visible, laser e infrarroja) a diferencia de sus primas, las comunicaciones ópticas guiadas que requieren un medio de transmisión por el cual se confine su energía electromagnética (fibra óptica, por ejemplo).

2.2.2.1. Comunicación óptica por el espacio libre FSO

La comunicaciones FSO (Free Space Optical) es un sistema de comunicación óptico no guiado que hace uso de la propagación de la luz (visible o infrarroja) para transmitir datos a través de la atmosfera. Al igual que las redes de fibra óptica, esta tecnología utiliza en su etapa de transmisión diodos *leds* o diodos láser como fuente de transmisión, trabajando en longitudes de onda de 750 nm – 1550 nm, alcanzando tasas de datos de 100 Mbps hasta 2.5 Gbps y es utilizado comúnmente para comunicaciones a larga distancias (2.3 Km). El sistema FSO en su parte receptora consta de un lente que centra y detecta los haces de luz. (WILLEBRAND & GHUMAN, 2002)

2.3. Dispositivos esenciales de un sistema de iluminación

2.3.1. LED: Diodo Emisor de Luz

Los *leds* son dispositivos con la capacidad de emitir luz están compuestos por un material semiconductor de silicio, su diseño consta de dos terminales p y n que al aplicarles un voltaje conveniente, permite que los electrones se recombinen con los huecos en la región de la unión p-n del equipo, emitiendo energía en forma de fotones. Esta característica es llamada como electroluminiscencia.

Los *leds* son por lo general de tamaño menor de 1mm y se complementan con otros componentes ópticos para distribuir su patrón de radiación. En la actualidad los *ledes* ofrecen mayor provecho sobre las fuentes de luz usuales como la incandescente o fluorescente, sobresaliendo un bajo consumo de energía, alta eficiencia luminosa, vida útil mayor, robustez física superior, múltiples colores y menor tamaño; entre sus aplicaciones en las áreas se destacan en el campo de la electrónica, la medicina, la bioingeniería, las telecomunicaciones, etc. Su uso también está presente en dispositivos móviles, vehículos, equipos de audio y video e iluminación en general.

A continuación en la **Tabla 2** se muestran las configuraciones de colores de los *ledes* con sus respectivas longitudes de onda y tensión:

	Color	Longitud de Onda [nm]	Diferencia de potencial [ΔV]
	Radiación infrarroja	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$
	Rojo	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$
	Naranja	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$
	Amarillo	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$
	Verde	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$
	Azul	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$
	Violeta	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$
	Púrpura	Combinación de distintos tipos	$2.48 < \Delta V < 3.7$
	Ultravioleta	$\lambda < 400$	$3 < \Delta V < 4.1$
	Rosa	Combinación de distintos tipos	$\Delta V \sim 3.3$
	Blanco	Espectro amplio	$2.8 < \Delta V < 4.2$

Tabla 2. Configuración de colores y parámetros de los *leds*. (TOBÓN LLANO, 2006.)

2.3.2. Fotodiodo

Es un dispositivo semiconductor capaz de percibir la incidencia de luz visible e infrarroja y convertirla en corriente eléctrica mediante la unión PN que la conforma a partir de su polarización inversa y de esta manera direccionarla a través del circuito, su construcción consta de un lente circular donde se concentran las haces de luz.

2.3.2.1. Responsividad

Establece la ganancia de entrada y salida de un sistema detector, asimismo se encarga de medir cuanta salida eléctrica existe en relación a la entrada óptica y es calculada así: (HAWKINS, 1991)

$$R = \eta \frac{q}{hf} \approx \eta \frac{\lambda_{(\mu m)}}{1.23985(\mu m \times W/A)}$$

Donde,

R Responsividad [A / W].

n Eficiencia cuántica (la eficiencia de conversión de fotones a electrones).

q Carga del electrón.

f Frecuencia de la señal óptica.

h Constante de Planck.

2.4. Protocolos de Red

2.4.1. Modelo OSI

Es un patrón de recomendaciones basado en la arquitectura en capas (proceso de división de una labor), fue creado por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en 1980, asimismo dicho estándar se divide en 7 capas que especifican el proceso de la información al trasladarse entre equipos en una red o Internet, indicando el tipo de protocolo necesario para que exista una relación entre los niveles. De igual manera las capas que conforman esta norma son:

2.4.1.1. Nivel Físico

Es la responsable de la topología de red, conexiones globales, especificaciones eléctricas para preservar el enlace entre sistemas, abarcando el medio físico como la manera en que se envían los datos. En un modo más específico esta capa describe la velocidad en que viajan los datos, distancias de cobertura, tipos de conectores, niveles de voltaje, etc. Este nivel hace parte de la investigación del diseño del sistema VLC.

2.4.1.2. Nivel de Enlace de Datos

Es la capa encargada de la correcta circulación de los datos a través de una conexión de igual manera se encarga de brindar el direccionamiento físico, permite la detección de errores, acceder al medio, entrega organizada de las tramas y el control del flujo. Este nivel es de gran importancia por su ubicación y por el papel que cumple.

2.4.1.3. Nivel de Red

Es la encargada de otorgar conectividad e identificar el enrutamiento que existe entre las redes participantes. Esta capa hace uso de dispositivos llamados *router* responsables de que los datos lleguen al destino especificado por el origen, a su vez realiza el direccionamiento lógico o ubicación del *host*.

2.4.1.4. Nivel de Transporte

Es la encargada de proporcionar el transporte de los datos empaquetados desde un origen a un destino de una manera confiable, hace uso de la *PDU* (unidad de datos de protocolos) para el intercambio de información ente iguales.

2.4.1.5. Nivel de Sesión

Esta capa es la que se encarga de establecer, prolongar y controlar la conexión establecida entre dos ordenadores que están compartiendo información, de igual forma regula una sesión creada entre dos dispositivos restableciendo la comunicación en caso de que se presente alguna interrupción.

2.4.1.6. Nivel de presentación

Esta capa es la que se encarga de establecer, prolongar y controlar la conexión establecida entre dos ordenadores que están compartiendo información, de igual forma regula una sesión creada entre dos dispositivos restableciendo la comunicación en caso de que se presente alguna interrupción.

2.4.1.7. Nivel de aplicación

Es la capa encargada de interactuar con el usuario a través de sus múltiples aplicaciones indispensables para los servicios que requiere el solicitante, de igual manera es la responsable de determinar los protocolos utilizados por las aplicaciones para conmutar datos, ya sea FTP para ficheros o SMTP para correo.

A continuación se presenta una gráfica que representa los diferentes niveles que hacen parte del modelo OSI (ver **figura 5**).



Figura 5. Estructura del modelo OSI.

2.4.2. Modelo TCP/IP

Es un protocolo de red jerárquico que permite la conexión entre extremos, al igual que el modelo OSI está estructurado en capas y su función es otorgar conectividad a través de especificaciones de transmisión de datos como el direccionamiento, encaminamiento, transporte, etc. Hay que tener en cuenta que cada capa cumple una función especial donde existe una correspondencia con su nivel superior e inferior, donde sus funciones son diferentes según sea el tipo de red. Asimismo sus niveles en relación con el modelo OSI se dividen así:

2.4.2.1. Capa de Aplicación

Se encarga de brindar servicios de codificación, control, representación y conexión remota como correo y transferencia de archivos, los protocolos más conocidos son: FTP, HTTP, SMTP, DNS Y Telnet, esta capa es semejante con los niveles de sesión, presentación y transporte del modelo OSI.

2.4.2.2. Capa de Transporte

Este nivel se compone de los protocolos TCP y UDP (protocolo de datagramas de usuario). Donde TCP proporciona la transmisión de los datos entre extremos con la función de detectar y corregir errores, por el contrario UDP disminuye la información extra adicionada en la cabecera de los datagramas con el propósito

de obtener mayor velocidad pero reduciendo su fiabilidad en él envió de la información, se diferencia de TCP en que no es orientado a la conexión; esta capa se asemeja a la capa de transporte del modelo OSI.

2.4.2.3. Capa de Internet

Este nivel se encarga de manejar las rutas y definir los datagramas, está basado en el protocolo IP como también en el ICMP, donde el primero se encuentra dividido en dos versiones, la primera es IPv4 la más utilizada y saturada en la actualidad, la segunda es IPV6 que cuenta con un rango mucho mayor. Este protocolo se caracteriza por no estar orientado a la conexión (no hay intercambio de sesión entre dispositivos que se conectan entre si) y no comprueba errores en la transmisión. Asimismo se encuentra el protocolo ICMP que se encarga de enviar información en forma de datagramas que proporcionan el control de flujo, detección de destinos, direccionamiento de rutas y pruebas de conectividad; esta capa se asemeja a la capa de red del modelo OSI.

2.4.2.4. Capa de Acceso al Medio

Es el nivel encargado del acceso físico a la red, aquí se especifica cómo se encapsula un datagrama IP en una trama enviada, de igual manera en este nivel trabaja el protocolo ARP (protocolo de resolución de dirección) encargado de corresponder direcciones IP con direcciones físicas Ethernet; esta capa se asemeja a la capa física y de enlace del modelo OSI, a continuación se muestra las estructuras del modelo TCP/IP y el modelo OSI (ver **figura 6**). (ATELIN & DORDOIGNE, 2006)

MODELOS	
TCP/IP	OSI
Aplicación	Aplicación
	Presentacion
	Sesion
Transporte	Transporte
Internet	Red
Acceso a la red	Enlace de datos
	Fisica

Figura 6. Comparación de las capas de los modelos OSI y TCP/IP.

2.5. Características de un sistema de comunicación

2.5.1. Ancho de Banda

Es el tamaño del rango de frecuencias [Hz] del que dispone una señal periódica en el tiempo o conjunto de frecuencias disponibles donde la potencia alcanza su mayor transferencia de energía, que es mantenida en los -3 dB. (FOROUZAN, 2007)

2.5.2. Modos de Transmisión de Datos

Son características de transmisión que permiten una conexión y dirección de los datos en un canal de comunicación y se refiere al número de bits que se logran transmitir simultáneamente. Éste se divide en tres modos: ***simplex***, ***half-duplex*** y ***full-duplex***.

2.5.2.1. Modo simplex

Es un tipo de conexión de datos donde estos últimos circulan en una dirección, desde la fuente al destino, evitando el envío de respuestas del receptor al transmisor, es el tipo de modo a utilizar en este trabajo.

2.5.2.2. Modo Half-Duplex

La comunicación se realiza ambas direcciones; aunque la transmisión solo sucede en una dirección a la vez compartiendo una misma frecuencia. De tal modo el transmisor y el receptor comparten una sola frecuencia.

2.5.2.3. Modo Full-Duplex

Se encarga de transmitir en dos direcciones simultáneamente a través del canal compartido mediante una frecuencia de envío y una de recepción. (VARGAS LINDAO, 2011)

2.5.3. Técnicas de Transmisión

Son tipos de conexiones empleadas para garantizar la correcta interpretación de los datos transmitidos, haciendo uso del control del tiempo, asimismo su papel es permitir un sincronismo en los datos para que los bits viajen en una secuencia lógica.

2.5.3.1. Transmisión Asíncrona

En esta técnica los bits transmitidos son sincronizados en cada carácter o palabra enviada, a partir de un bit de inicio que indica el comienzo de la trama como también sincronización entre los terminales y un bit de finalización el cual garantiza la separación entre caracteres y fin de la trama, además de un bit de paridad que comprueba que hay normalidad en la comunicación, cuando dicho bit es "1" el emisor le avisa al receptor que enviara un carácter, entonces se antepone un bit de arranque "0 – *start*"; asimismo el receptor estará atento a la llegada de los datos, al momento que obtiene cada carácter, éste enviará un bit "1- *stop*" indicando la llegada de la porción de la trama. En esta transmisión se hace uso de velocidades de modulación de hasta 1200 baudios¹.

2.5.3.2. Transmisión Síncrona

En esta técnica existe una sincronización entre el emisor y el receptor a través de un reloj en común, donde se mantiene la velocidad de los datos aun cuando no se están enviando bits esto de la mano de parámetros complementarios para certificar que no ocurran errores en la transmisión; de igual manera los bits se envían continuamente sin una ruptura entre ellos, es por esto que se hace uso de métodos de sincronización al nivel de los caracteres que consisten en el envío de un grupo de bits de sincronismo (SYN) y finalizando con otro grupo de bits que indican el final de bloque (ETB), estableciendo el tiempo de cada bit y trama. De igual manera los bits de sincronismo tienen la función de sincronizar los relojes

¹ Baudio: Hace referencia al número de símbolos por estados en un recurso de transmisión digital, donde los símbolo indican 1 o más bits, según sea el tipo de modulación.

existentes tanto en el emisor como en el receptor, de tal forma que estos controlan la duración de cada bit y carácter. Esta técnica otorga alto rendimiento y velocidades mayores de 1200 baudios de modulación pero se utilizan equipos costosos debido a su tecnología compleja. (HERRERA, 2003)

2.5.4. Tipos de sistemas de Comunicación

2.5.4.1. SISO: Una Entrada, una Salida

El desarrollo de este trabajo se realizará a partir de éste sistema espacial de comunicaciones que se caracteriza por el uso de enlaces de radio que hacen uso de una sola antena transmisora y una sola antena receptora.

2.5.4.2. MISO: Múltiples entradas, múltiples salidas

Este sistema emplea dos o más antenas de emisión pero sólo una antena recepción.

2.5.4.3. SIMO: Una entrada, múltiples salidas

Este sistema hace uso de una antena de emisión y dos o más recepción.

2.5.4.4. MIMO: Múltiples entradas, múltiples salidas

Es un sistema de comunicación que emplea dos o más antenas tanto en el lado transmisor como en el receptor. Lo que permite un mejor desempeño del enlace inalámbrico ya que hace la señal más fuerte, confiable y rápida; alcanzando mayor cobertura. (ANGUÍS, 2008.)

2.5.5. Características de Propagación de la Señal

2.5.5.1. LOS: Propagación de la señal con línea de vista

Hace referencia a un canal limpio en el que no se presentan interrupciones que impiden la visibilidad entre la antena del emisor y el receptor, permitiendo que las líneas de radiación que viajan en línea recta lleguen sin problema por así decirlo al destino, este tipo de recomendación es necesaria en un sistema ya que ayudan a reducir la degradación de la señal, pues entre más obstáculos existan sea el caso

de muros, metales o superficies rugosas será evidente la participación de distintos fenómenos de propagación ya sea el caso de difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., los métodos usados para prevenir este tipo de incidentes es instalar a una altura considerable la fuente para mantener la calidad del enlace como también asegurar el nivel de potencia. (BORGAZZI, ROVIRA, & STENBORG, 2002).

2.5.5.2. NLOS: Sin línea de vista

Se refiere al enlace en donde hace falta la visibilidad directa entre la fuente y el destino, debido a obstrucciones presentes en la zona de Fresnel, ya sea el caso de árboles, muros, edificios, líneas eléctricas en el caso *outdoor* en *indoor* serían los distintos objetos físicos que hacen parte de espacios cerrados, estos fenómenos reflejan y absorben el mensaje, degradando el nivel de intensidad del mismo lo que influye en el buen estado de los datos en el extremo receptor. Es por esto que se hace uso de múltiples trayectos que causan que la señal rebote, es el caso de los repetidores o el apoyo en el filo de navaja. (GUVENC & CHONG, 2009)

2.5.6. Modulaciones

Se refiere al grupo de técnicas utilizadas para llevar una señal sinusoidal de un lugar a otro sobre una onda portadora, lo que implica un mejor aprovechamiento del canal de comunicación facilitando el envío simultáneo de información como también brindar un mejor soporte frente a interferencia, de igual forma cuando se modula, se altera cualquier característica de la señal transportadora.

2.5.6.1. Modulación OOK (*On-Off Keying*)

Es el tipo de modulación digital más elemental para la comunicación por luz visible su definición se basa en el encendido y apagado del dispositivo emisor de luz, donde cada transición corresponde a un estado binario, donde apagar el led no implica que este no este encendido por completo, simplemente se reduce el brillo aunque su diseño es trivial su consecuencia implica sensibilidad al ruido. Apagar

el LED no necesariamente significa que no se enciende, pero solo necesita reducir su brillo. A continuación en la **figura 7** se muestra una representación gráfica de esta técnica.

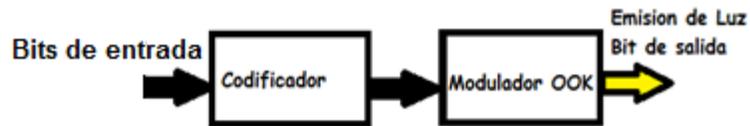


Figura 7. Diagrama en bloque del modulador OOK.

En la **figura 7** representa las etapas de un modulador OOK, donde la primera etapas se encarga de codificar la señal de entrada para luego ser modulado por la etapa OOK. (DEL RISCO SÁNCHEZ)

2.5.6.2. Modulador PPM

La modulación PPM (Modulación por Posición de Pulso) es una modulación digital que se basa en alterar la posición de la señal, dejando los parámetros de amplitud y anchura de la señal fijos.

Uno de los principales problemas de esta modulación radica en el sincronismo ya que se debe alinear el reloj con el comienzo de cada símbolo. La solución más utilizada es implementarlo de manera diferencial donde la posición de cada pulso es escogida en relación al anterior, lo que permite al receptor calcular la diferencia temporal de los pulsos entrantes. De esta manera si ocurre un error, solo afecta un par de pulsos y no a la trama entera. En la **figura 8** se muestra el diagrama en bloque de esta modulación.

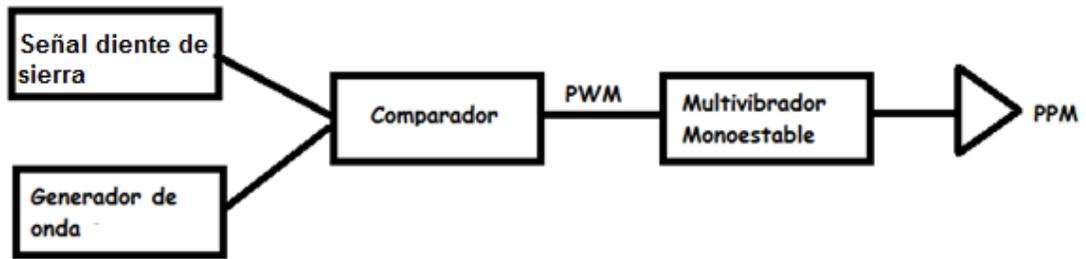


Figura 8. Diagrama en bloque del modulador PPM.

En la **figura 8** se muestran una serie de bloques trabajando entre sí, donde se combina la señal de entrada con una señal diente de sierra y que al pasar por el comparador permite establecer dos niveles de tensión para trabajar, seguidamente ingresa a un circuito monoestable que es el encargado de generar los pulsos PPM (HAMKINS, 2007).

2.6. VLC: Comunicación por luz visible

Es un tipo de comunicación de datos emergente que se ha venido estudiando en los últimos años, utiliza la luz visible para transmitir información e iluminar un entorno a través de dispositivos emisores de luz como lámparas fluorescentes o dispositivos led, aprovechando el rango de frecuencia de la luz visible que va alrededor de (400 a 800 THz) en términos de frecuencia o (375 a 750 nm) en términos de longitud de onda aproximadamente.

La tecnología VLC es una alternativa para el saturado espectro RF (Radio Frecuencia) debido a su amplia porción de frecuencia de trabajo con las que cuenta y a sus posibles futuras aplicaciones en el ámbito exterior ya sea en comunicación entre vehículos de transporte o cualquier dispositivo que requiera el envío de un mensaje, de igual manera esta tecnología es aplicable en comunicaciones indoor es el caso principal del desarrollo de este proyecto permitiendo la transferencia de archivos o acceso a internet en recintos cerrados como oficinas, dormitorios, redes de sensores corporales, recursos militares, domótica, posicionamiento, centros comerciales, minas, etc.

La fase de estandarización del modelo VLC está bajo la norma de redes inalámbricas de área personal de la IEEE 802.15 en el grupo de trabajo 7 de diciembre del año 2011 donde se culminó un estándar de capa física y de enlace a corto alcance donde su mayor ventaja es el alcance de velocidades de hasta 96Mbps. (SAGOTRA & AGGARWAL, 2013)

2.6.1. Diferencias entre VLC, IR Y RF

Características	RF(Radio Frecuencia)	IR(Radiación Infrarrojo)	VLC(Comunicación por Luz Visible)
Ancho de Banda.	Regulado 3kHz ~3GHz Dividido en diferentes bandas.	334 THz ~ 375 THZ	380 ~ 780 THz.
EMC²(Compatibilidad electromagnética).	No.	Sí.	Sí.
Movilidad.	Buena.	Limitada	Limitada.
Rango de alcance.	Corto. Medio. Largo.	Corto. Largo (punto a punto).	Corto.
Riesgos.	Un leve aumento en la temperatura corporal.	Si se incumplen las normas de iluminación puede causar daños oculares.	Si se cumplen las normas de iluminación no hay riesgos.
Infraestructura y Conexión.	<i>Access point.</i>	<i>Access point, sensores.</i>	Iluminación, <i>Access point.</i>
Características	1.Atraviesa paredes. 2.El nivel de intensidad se ve afectado por interferencias. 3.Los datos pueden ser interceptados cuando viajan por el espacio libre.	No atraviesa paredes.	1.No atraviesa paredes. 2.El nivel de intensidad se ve afectado por interferencias. 3.En el caso indoor, los datos no pueden ser interceptados por terceros, que no tengan ningún tipo de acceso al recurso físico.
Áreas restringidas	Sí.	No.	Por el momento no.
Solapamiento en canales.	Sí.	No.	No.
Tasa de bits.	Media-Alta (Mbps, Gbps).	4 Mbps FIR 16Mbps VFIR 100Mbps UFIR	Experimentalmente 100Mbps–1Gbps Pretende superar estas barreras, según crezca la tecnología.
1. LOS. 2. NLOS.	1.Sí. 2. Sí.	1. Sí. 2. No.	1. Sí. 2. No.
Cobertura.	Amplia.	Estrecha.	Estrecha.
Regulación.	Sí.	No.	No.
Dispositivo emisor inalámbrico.	Antenas	Diodos IR, diodos laser.	Diodos led, Pled, RGB, Oled, lámparas fluorescentes compactas.
Servicios.	Comunicación.	Comunicación.	Iluminación y comunicación.

Tabla 3. Características de los sistemas de comunicación VLC, RF e IR. (MORALES NIETO, 2013.)

² EMC (compatibilidad electromagnética): Es una norma encargada del estudio de los mecanismos para disminuir y prevenir los efectos de acoplamiento entre un equipo el entorno electromagnético que lo rodea, un equipo es electromagnéticamente compatible cuando funciona en un ambiente electromagnético de forma satisfactoria y sin producir perturbaciones.

2.6.2. Tecnología Li-Fi

Es un sistema de comunicación inalámbrico de bajo coste que permite la transferencia de archivos y la navegación a internet a través de la luz visible emitida por dispositivos *leds*, siendo ésta la versión óptica de Wi-Fi perteneciente a la tecnología VLC. El funcionamiento consta de un arreglo de *leds* que se encienden o se apagan a una velocidad de parpadeo alta, imperceptible por el ojo humano y a su vez capaz de crear tramas digitales de 1 y 0 transmisores de información modulada en forma de haces de luz que son recepcionados por un fotodiodo capaz de convertir la señal lumínica en impulsos eléctricos descifrados y ordenados por una etapa demoduladora, las características de trabajo de Li-Fi son las mismas de VLC, donde sobresalen seguridad en ambientes indoor debido a que la luz no puede traspasar paredes, distancias de hasta 10m, altas tasas de transmisión de datos debido a la gran porción de ancho de banda, iluminación más comunicación e independencia de las radiaciones RF.

Asimismo en el año 2011 fue creado el consorcio Li-Fi que busca explotar la banda de la luz visible con el fin de alcanzar altas tasas de bits superiores a 10Gbps. (SAINI, 2012.)

2.6.2.1. Aplicaciones

Gracias a la infraestructura lumínica presente en cualquier entorno y recurso físico es productivo aprovecharla para incorporar diseños de iluminación basados en *leds* que posibiliten el acceso a la información a partir de la luz emitidas por estas fuentes, ya sea el caso del ingreso a navegación, descarga y transferencia de archivos multimedia, almacenamiento en la nube, etc. Algunas posibles aplicaciones que se espera lograr con la tecnología Li-Fi son:

- **Acompañamiento con las señales RF** en las principales demandas presentes de mayor crecimiento en la actualidad, es el caso de la telefonía móvil y el acceso a internet por vías inalámbricas.

- **Resguardo en entornos peligrosos** ya que brinda la oportunidad de no ser censurada en vehículos de transporte aéreo al no interferir con las señales electromagnéticas tradicionales presentes en el equipo de navegación; asimismo en minas, hospitales y plantas petroquímicas.
- **Creación de Iluminación inteligente** a partir de las redes de iluminación privada y pública existente y repartida en los entornos *outdoor* e *indoor* ya sea de hogares, centros comerciales, parques, oficinas, carreteras, vías públicas, etc. Para establecer *Access point* Li-Fi.
- **Conexión inalámbrica móvil** para interconectar diferentes dispositivos a altas velocidades de la mano de la seguridad es el caso de equipos portátiles como computadores, tabletas, consolas, televisores, teléfonos inteligentes, dispositivos *weareables*, etc.
- **Servicio de localización** de alta precisión aprovechando las emisiones de luz.
- **Transporte vehicular** a partir de las luces *leds* disponibles y que se han venido instalando en los vehículos sería posible la comunicación entre ellos y entre letreros de tránsito y semáforos, para conocer el estado de las vías, recomendaciones, detalles del destino al que se quiere llegar e información que se crea importante anunciar a los conductores para gestionar el tráfico vehicular.
- **Juguetes infantiles** aprovechando la incorporación de luces *leds* en los juegos de niños se puede proporcionar una experiencia innovadora entre juguetes, permitiendo una comunicación entre estos. (GUEVARA PENAGOS, 2014.)

2.7. Normatividad

En el mundo existen diferentes organismos que se dedican a la investigación de la tecnología por luz visible con la intención de crear normas internacionales que regulen y permitan la correcta comunicación por esta banda, es el caso del Comité Técnico Internacional de la Comisión de Electrotécnica TC 34 el cual ha diseñado especificaciones dispositivos led como lámparas y equipos complementario aunque por ahora no ha establecido detalles para VLC en lo referente a la dualidad entre la iluminación y la comunicación inalámbrica mediante la luz visible asimismo En el año 2008 se creó el proyecto OMEGA (*HOME Gigabit Access*), integrado por la Unión Europea y diferentes organismos académico e industriales de Europa teniendo como finalidad la creación de estándares de alta velocidad “1 Gbps” en redes domésticas inalámbricas en las bandas de infrarrojo y luz visible

EL Consorcio de las Comunicaciones por Luz Visible (**VLCC**) propuso la creación de dos estándares para VLC, en el año 2007 los cuales fueron: *Visible Optical Communications System Standard* y *Visible Light ID System Standard*, los cuales fueron aceptados por la Asociación Japonesa de Electrónica y Tecnología de la Información (JEITA, *Japan Electronics and Information Technology Industries Association*) que llevaron el nombre de **JEITA CP-1221** el cual establece los rangos de emisión de luz visible que sería de 380-750 nm para la transmisión de datos de identificación a partir de subportadoras mediante las emisiones *leds* y **JEITA CP-1222** que sugiere aplicar el esquema de modulación 4-PPM con la intención de borrar el *flicker*, adicionalmente propone el código de detección de errores en la transmisión de verificación por redundancia (*CRC Cyclic Redundancy Checks*), finalmente limita la frecuencia de trabajo de las ondas subportadoras a 28.8 kHz para darle multiplexación de los datos a transmitir, este estándar sufrió algunas modificaciones que se vieron planteadas en el JEITA CP-1223 en el año 2013.

Como se puede ver existen diferentes ideas y propuesta de normalización que han sido brevemente definida anteriormente algunas de muchas existente, sin embargo es el estándar 802.15 de la IEEE el primordial referente en la normalización de la tecnología VLC en áreas personales WPAN el cual creó en el año 2008 la norma IEEE 802.15.7. Dedicada al diseño en capas físicas y de enlace de las comunicaciones por luz visible. (RUFO TORRES, 2016.)

2.7.1. IEEE 802.15

Es un grupo de trabajo dedicado a la investigación de redes personales inalámbricas WPAN o de corta distancia entre dispositivos portátiles como teléfonos, ordenadores, etc. Para permitir la interoperabilidad con otro tipo de redes, este grupo está dividido en diferentes subgrupos donde se encuentra el de gran interés para las comunicaciones por luz visible, el cual es 802.15.7.

2.7.2. IEEE 802.15.7

Es un conjunto de protocolos utilizados para permitir las comunicaciones inalámbricas a través de la luz visible, ya sea mediante la topología punto a punto o estrella, está centrada en el desarrollo de las capas de acceso (MAC) y la física (PHY), proporcionando movilidad y compatibilidad con la infraestructura lumínica, asimismo estima altas tasas de datos para la transmisión de multimedia que van de (11.67 kbps – 96 Mbps) de la mano del tipo de modulación.

Esta norma define la capa MAC como la encargada de suministrar procesos de direccionamiento y control de acceso al medio entre dispositivos, proporcionando servicios de comunicación *unicast*, *multicast* y difusión amplia, a su vez la capa física está dividida en tres modelos que cumplen cierta característica diferente en relación al entorno, tipo de transmisión y a la velocidad, las cuales son: PHY I, PHY II y PHY III, encargadas de la corrección de errores, sincronización, transmisión y recepción de los datos, etc.

2.7.2.1. Modelo PHY

Es un modelo físico empleado normalmente en entornos *outdoor* a velocidades bajas (11.67 – 266.6 kbps) con una frecuencia de reloj de (200 – 400 kHz) operando bajo un sistema de comunicación SISO que hace referencia a una sola fuente de iluminación emisora de los datos y una sola fuente de recepción, a través de la modulación OOK (*On-Off Keying*) o VPPM (*Variable Pulse Position Modulation*), su diseño y funcionamiento está estructurado así:

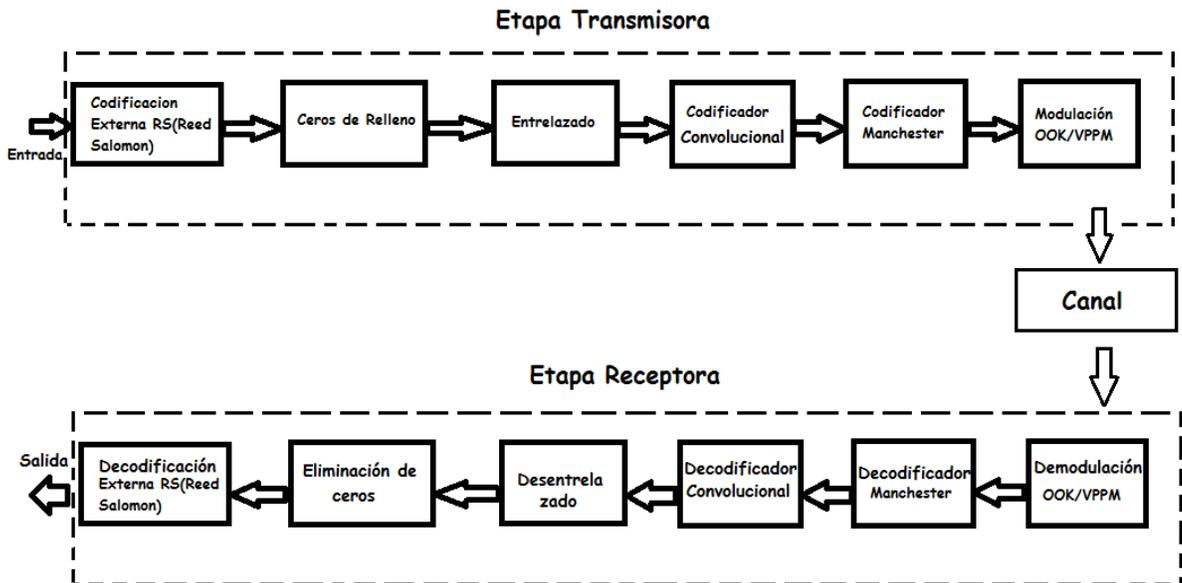


Figura 9. Diagrama en bloque del funcionamiento del modelo PHY I.

En la **figura 9** se muestran las etapas transmisoras y receptoras del modelo PHY I donde la señal ingresa al codificador (RS) encargado de convertir la señal eléctrica analógica en digital y a su vez corregir los posibles errores presentes a través del procesamiento de las tramas a partir de la redundancia, posteriormente es rellenado con ceros para complementar las tramas que son organizadas mediante la etapa de entrelazado; que es la encargada de brindar un tipo de protección ante los problemas de ráfaga es decir, cuando un bit se repite, esta evita que alguno se pierda, luego ingresa a un codificador encargado de recorrer la y trama bit por bit detectando posibles errores a través del uso de un patrón lógico booleanos, seguidamente se le aplica una codificación Manchester la cual

establece dos niveles posibles para las variaciones de voltaje, teniendo a la salida una trama de 2 a 6 bits. Finalmente recorre el modulador donde se le aplica un codificador RLL (Longitud de ejecución limitada) que se encarga de recuperar el reloj y disminuir el fenómeno del parpadeo visual, seguidamente la señal es transmitida por el canal inalámbrico SISO como emisión lumínica. En la etapa de recepción la información es recuperada a través del demodulador que desmonta la señal de la frecuencia portadora, y posteriormente se realiza el proceso inverso a la etapa transmisora.

2.7.2.2. Modelo PHY II

La capa PHY II es empleada para los sistemas de comunicación SISO en ambientes indoor para aplicaciones que requieren velocidades medias (1.25 – 96 Mbps) con frecuencias del reloj que van de (375 – 120 MHz) su diseño es similar al modelo PHY I.

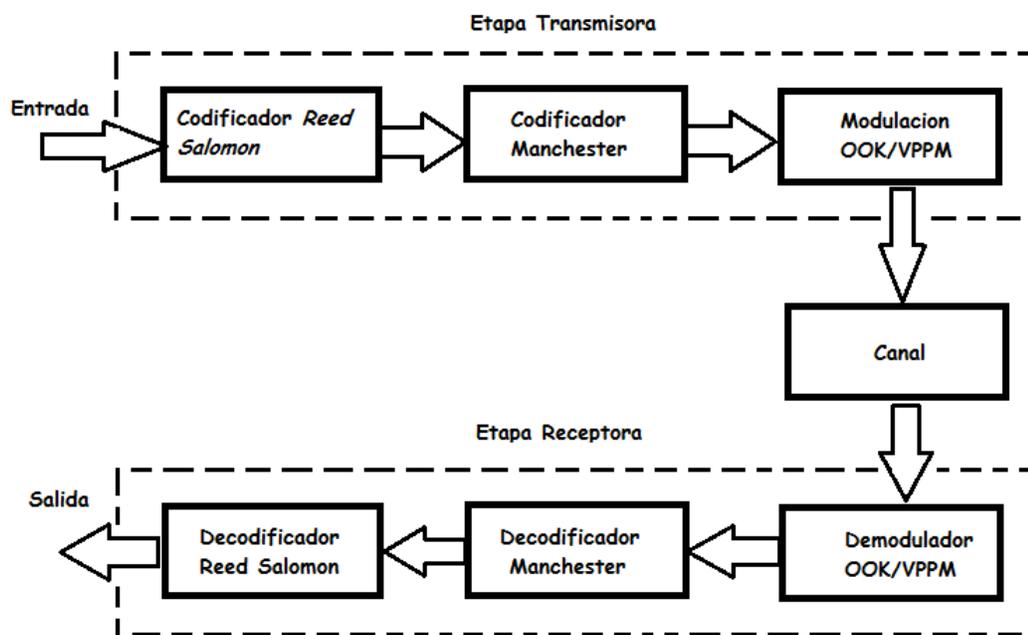


Figura 10. Diagrama en bloques de las etapas transmisora y receptora del modelo PHY II

Al igual que en el modelo PHY I los bloques cumplen las mismas funciones, donde los bits ingresan a la parte transmisora y son codificados por el (RS) siguiendo el mismo proceso hasta ser demodulado por la etapa receptora hasta llegar a la salida.

2.7.2.3. Modelo PHY III

La capa PHY III es empleada para los sistemas de comunicación MIMO, es decir múltiples entradas y múltiples salidas, por lo tanto, capaz de soportar múltiples fuentes ópticas utilizando la modulación por desplazamiento del color a diferentes longitudes de onda, con una velocidad alta de (12 – 96 Mbps) para ambientes outdoor con frecuencias de reloj que van de (12 – 24 MHz).

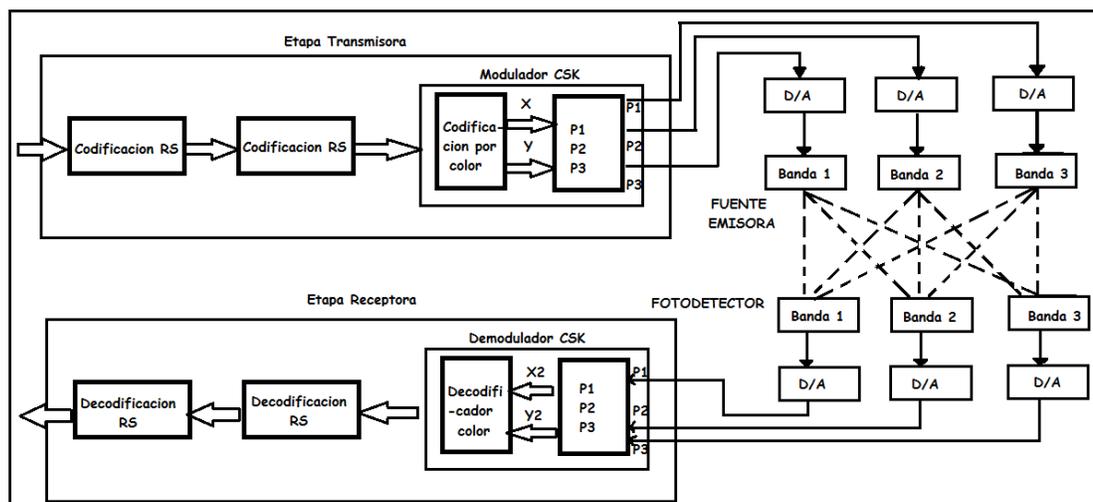


Figura 11. Diagrama en bloque del modelo PHY III.

Asimismo que en los modelos anteriores, la señal que ingresa es codificada por los bloques RS que convierten la trama de gran longitud en pequeñas tramas aleatorias, continuamente ingresa a la etapa moduladora por color CSK que divide los 7 grupos de colores en diferentes códigos repartidos en “X-Y”

Donde se seleccionan tres colores ubicados en las coordenadas anteriores, para crear un triángulo de estados, que es modulado y examinados mediante la expresión matemática $\log(M)$, donde M es igual a la proporción de la modulación. Con una posición en el espacio representado triangularmente y denominado

constelación la cual es convertida en magnitudes específicos de RGB (*Red, Green, Blue*) donde se normalizan los niveles de intensidad de los diodos emisores de luz para ser emitida la información a través de la luz. Asimismo en la etapa receptora, se ubican tres fotodiodos a longitudes de onda diferentes los cuales captan las distintas intensidades emitidas para hacer el proceso contrario a la etapa de emisión y descifrar la información.

Capítulo 3

CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE

3.1.	Etapa de Transmisión	43
3.2.	Consideraciones del Canal de Transmisión	44
3.3.	Etapa de Recepción	48

3.1. Etapa de Transmisión

A continuación se presenta el proceso algorítmico a realizar en el entorno Simulink, a partir del diagrama de flujo mostrado en la **figura 12**, donde se especifica por bloques los pasos a realizar para llevar a cabo la simulación. En primer lugar se debe crear la onda lumínica en el rango visible que se encargará de transmitir la información, dicha perturbación se superpone para simbolizar diferentes direcciones, seguidamente se ingresa el dato a transmitir y se codificará utilizando tres tipos de diseños con varianza en las codificaciones de línea (RZ, NRZ y Manchester Diferencial) para determinar cual de estos presenta mayor rendimiento a la hora de realizar una transmisión simplex utilizando la modulación en la polarización de luz, como alternativa a los sistemas VLC.



Figura 12. Diseño de la etapa de Transmisión

3.2. Consideraciones del Canal de Transmisión

Al momento de realizar el diseño del sistema de comunicación por luz visible se debe tener en cuenta que en medio del transmisor y el receptor debe existir línea de vista es decir, el ángulo de visión de la fuente óptica y el campo de vista del destino no puede ser obstruido.

A continuación en las **figuras 13-17** se indica el proceso a seguir para detectar el potencia recibida del lado del fotodiodo, donde teniendo en cuentas las dimensiones del entorno interior, se especifican las características del led y fotodiodo de trabajo para utilizarlos en el sistema, de igual manera se tienen en cuenta modelos o expresiones matemáticas definidas para la luz, las cuales indican la ganancia del canal, la intensidad de radiación emitida por la fuente lumínica con respecto a la superficie, como también la concentración de la energía.

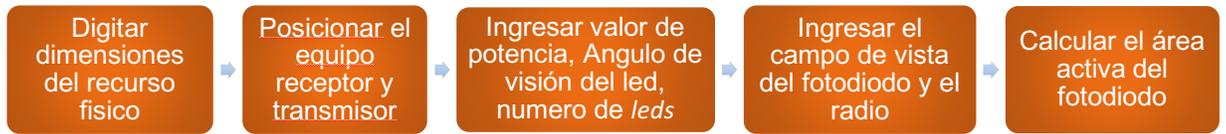


Figura 13. Consideraciones del canal etapa de inicio



Figura 14. Consideraciones del canal etapa media.

Magnitud	Ecuación
Irradiancia (phi)	$\phi = \frac{(\text{Phi} * \pi)}{180}$
Angulo de Incidencia (Angin)	$\text{angin} = \frac{(\text{Angin} * \pi)}{180}$
Orden de Emision Lambertiana (m)	$m = \frac{-\log(2)}{\log * \cos(\phi/2)}$
Intensidad de Radiacion Lambertiana(ro)	$r_o = \frac{(m+1) * \cos(\phi)^m}{2 * \pi}$

Figura 15. Formulas consideradas en el diseño del canal LOS.



Figura 16. Consideraciones del canal etapa final.

Magnitud	Ecuación
Ganancia del Canal ($H(0)_{LOS}$)	$H(0)_{LOS} = \frac{A_r \times r_o \times \cos(Angin)}{180}; 0 \leq Angin \leq WFOV$ $0; Angin > WFOV$
Potencia TX (P_{tx})	$P_{tx} = P_{LED} \times r_o$
Potencia Rx (P_{rxLOS})	$P_{rxLOS} = \sum_{l=1}^{LEDS} P_{tx} \times H(0)_{LOS}$

Figura 17. Fórmulas de potencia consideradas en el diseño del canal LOS.

En el segundo caso se tienen en cuenta perturbaciones presentes en el sistema *indoor* para calcular el nivel de potencia difusa y recibida del lado del destino, mediante la adición de la reflexión difusa originada a partir de las reflectividades provocadas por las paredes, techo y el piso del recinto “ver **figura 18-21**”.



Figura 18. Consideraciones del canal con adición de reflectividad.

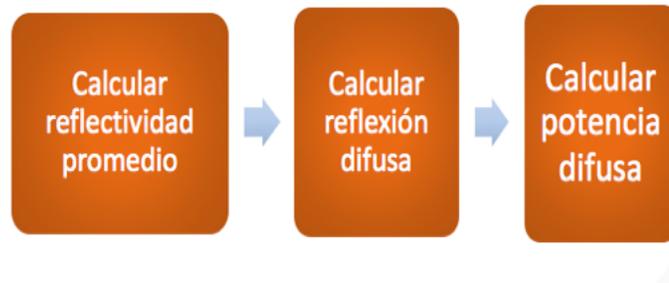


Figura 19. Consideraciones del canal con adición de reflectividad.

Magnitud	Ecuación
Areas Piso, Techo y Paredes	$\begin{aligned} \text{Piso} &= \text{LargoHab} * \text{AnchoHab} \\ \text{Pared1} &= \text{LargoHab} * \text{AlturaTx} * 2 \\ \text{Pared2} &= \text{LargoHab} * \text{AlturaTx} * 2 \\ \text{Techo} &= \text{LargoHab} * \text{AnchoHab} \end{aligned}$
Area de la Habitación	$\text{AreaHab} = (\text{AreaPiso} + \text{AreaTecho} + \text{AreaPared1} + \text{AreaPared2})$
Reflectividad Promedio (rho)	$\rho = \frac{1}{\text{AreaHab}} * (\text{AreaPiso} * \mu_{\text{Piso}} * \text{AreaPared1} * \mu_{\text{Pared1}} + \text{AreaPared2} * \mu_{\text{Pared2}} + \text{AreaTecho} * \mu_{\text{Techo}})$
Reflexion Difusa (I)	$I = \frac{\rho * P_r * LOS}{\text{AreaHab}}$ $I_{\text{prime}} = \frac{I}{(1 - \rho)}$
Potencia Difusa (pdiff)	$P_{\text{diff}} = A_r * I_{\text{prime}}$

Figura 20. Formulas considerando la reflectividad del recinto.

3.3. Etapa de Recepción

A continuación se muestra el diseño de la etapa de recepción representada a través de un diagrama de flujo, donde se indica el proceso de demodulación, el cual consta de un filtro por polarización que está constituido por un comparador que indica el estado binario a partir del tipo de polarización recibida “ver figura 21-22”.



Figura 21. Diseño de la etapa de recepción.



Figura 22. Diseño de la etapa de recepción.

SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE

4.1.	Simulación Etapa de Transmisión.....	49
------	--------------------------------------	----

4.1. Simulación Etapa de Transmisión

4.1.1 Modulación OOK-NRZ

Para llevar a cabo la simulación del sistema de comunicación por luz visible en su etapa transmisora, se hizo uso de la herramienta de software matemático MATLAB (Laboratorio de Matrices), un programa capaz de soportar múltiples algoritmos matemáticos para modelar diseños, en este caso se aplicó la extensión Simulink; una plataforma de programación visual que permite predecir el comportamiento de un sistema modelado.

Antes de elaborar la simulación en Simulink, es importante explicar gráficamente lo que se va a realizar, para tener una idea clara del modelado. El comportamiento de la etapa de transmisión básicamente se puede representar a partir de la siguiente gráfica:

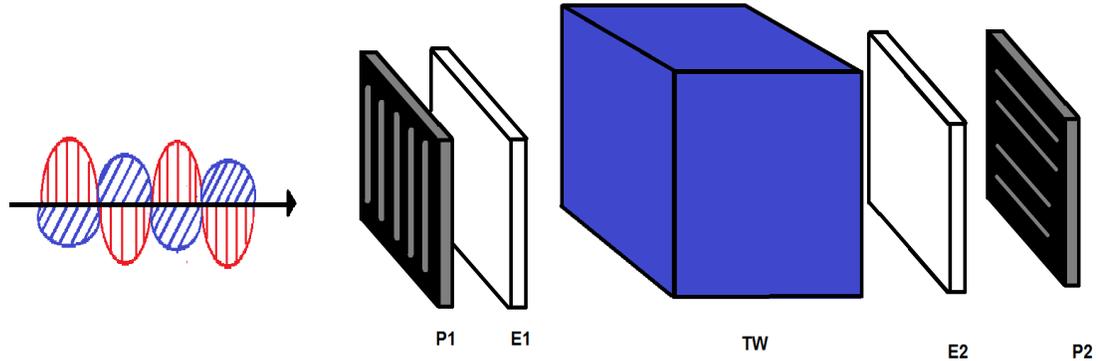


Figura 23. Luz no polarizada incidente en el sistema.

En la **figura 23** se puede notar un haz de luz superpuesto con múltiples polarizaciones “en la representación solo se muestran dos”, que está incidiendo a un sistema modulador de luz, compuesto por: un polarizador vertical P1, encargado de filtrar las direcciones verticales que salen de la fuente de luz y que intentan ingresar al sistema, discriminando las direcciones en otros sentidos; un par de bloques E1 y E2 llamados electrodos, los cuales al aplicarles un voltaje son los encargados de hacer girar las moléculas en forma de bastones, que se encuentran en el bloque azul TW (*TWISTED NEMATIC*).

TW es el líquido polarizante que es utilizado en el diseño de pantallas LCD y en las calculadoras portátiles, dicho líquido está compuesto por partículas que giran en cualquier sentido al aplicarles un voltaje, lo que va a permitir la rotación del rayo de luz que incide por el bloque P1, haciéndolo pasar de forma horizontal por el bloque P2 o analizador, llegando así al destino.

En la **figura 24** se representa el comportamiento de la onda al pasar por el filtro polarizante, que al aplicarle un voltaje en este caso de 0 V, polarizó las moléculas de TW de forma vertical, lo que no afecta la onda lumínica polarizada, permitiéndole entrar sin ninguna alteración giratoria dentro del líquido, pero que al

intentar pasar por el bloque P2, no le será posible ya que este último es un filtro horizontal, esto trae como consecuencia, ausencia de luz en el receptor lo que significa que se está recibiendo un cero como dato final.

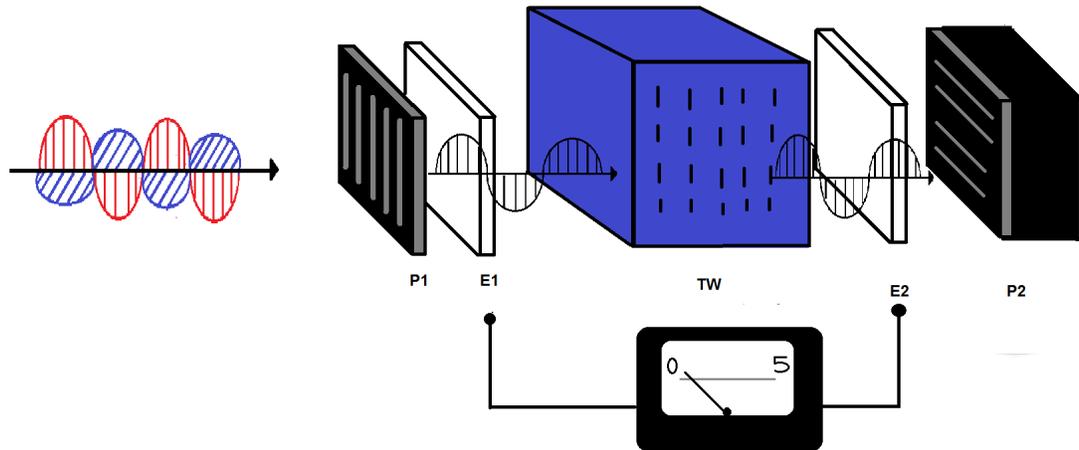


Figura 24. Luz polarizada verticalmente

En la **figura 25** se puede notar la incidencia del haz de luz por el filtro P1 que al aplicarle un voltaje de 5v, permite que las moléculas de TW se polaricen de manera horizontal, lo que trae como consecuencia una alteración rotatoria de vertical a horizontal en el haz de luz, habilitando el paso por el filtro analizador P2, propiciando luminosidad y un dato correspondiente a “1” en el receptor.

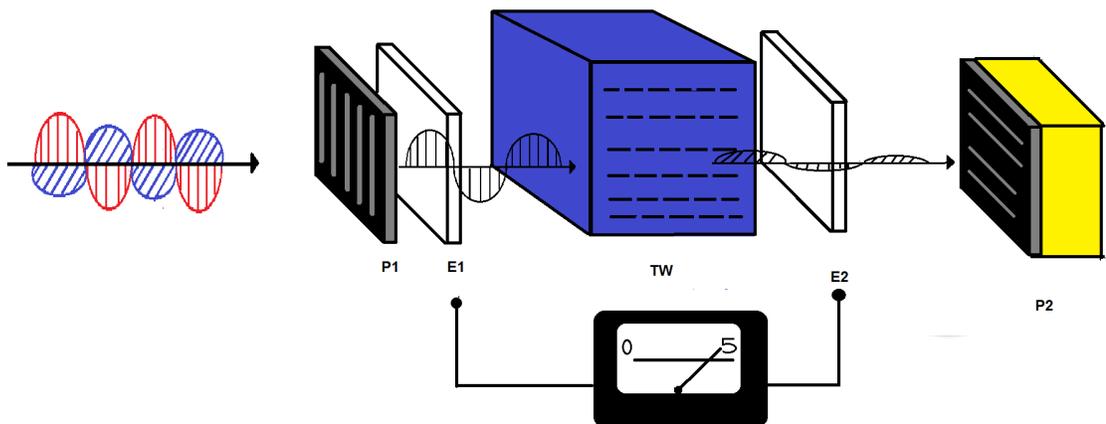


Figura 25. Luz polarizada incidente en el receptor.

Es a partir de esta alteración rotacional constante que se puede emitir datos de un punto transmisor a uno receptor, siendo el líquido TW la encargada de modular la información actuando como un *switch que* condiciona la señal. Explicado este funcionamiento, se procede a llevarlo a MATLAB para simularlo mediante la herramienta Simulink.

En la **figura 26** se presenta el diseño de la etapa transmisora elaborada para soportar la modulación OOK (*On-Off Keying*) o de encendido y apagado, la cual es una modulación digital que varía la amplitud de la señal portadora.

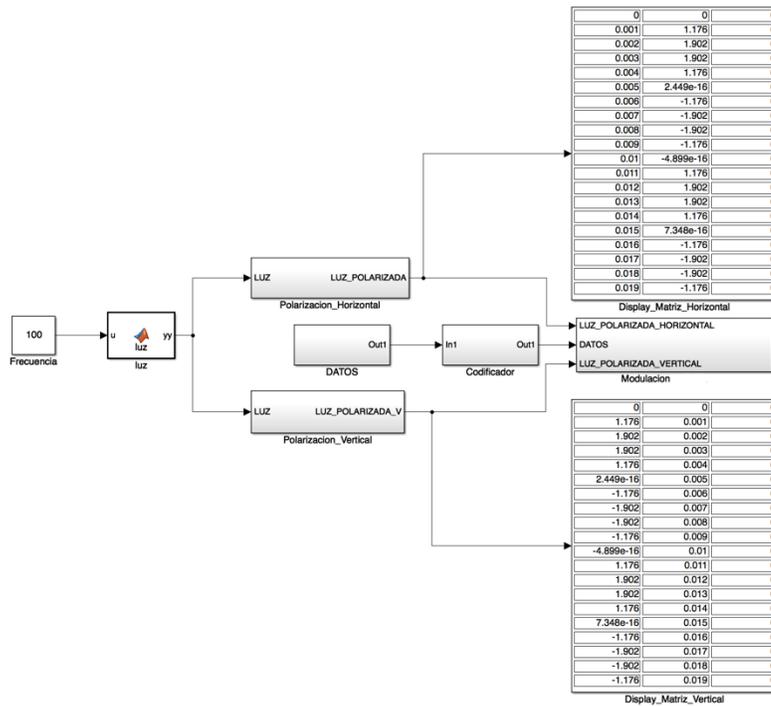


Figura 26. Etapa transmisora del sistema de comunicación por luz visible con OOK.

A continuación se explica lo realizado en cada bloque del diseño:

En el primer bloque se ingresa un valor constante correspondiente a la frecuencia de trabajo de la señal sinusoidal de la luz.

En el segundo bloque llamado **Luz**, se diseña la propagación del rayo luminoso que va ingresar al filtro, es decir el haz de luz con múltiples polarizaciones superpuestas. Para esto se tiene en cuenta la frecuencia ingresada en el bloque anterior y se crea una ecuación de onda de la forma:

$$\mathbf{Luz} = \mathbf{A} * \sin(2 * \pi * \mathbf{f} * \mathbf{t}).$$

Dónde: **A** es la amplitud, **t** el tiempo en segundos y **f** la frecuencia en Hertz. Luego se crea una matriz que se encargará de guardar los datos de la señal en cada posición en el tiempo. Es de esta manera que se obtiene Una señal Seno polarizada horizontalmente ver **figura 27**.

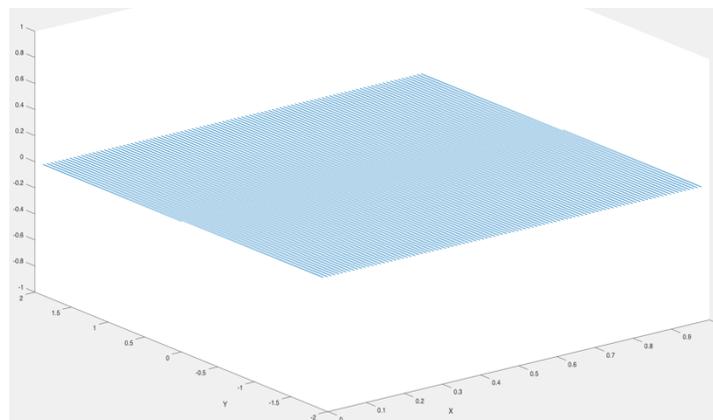


Figura 27. Señal polarizada de forma horizontal.

Seguidamente se mantiene la señal y se superpone con una de iguales dimensiones pero polarizada verticalmente ver **figura 28**.

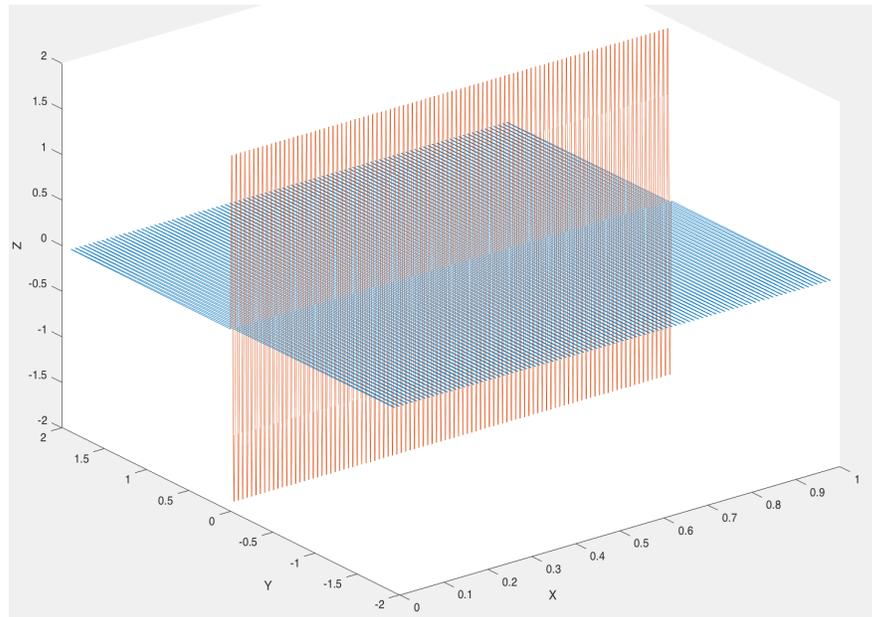


Figura 28. Señal superpuesta horizontal y verticalmente.

Finalmente se adicionan dos señales polarizadas diagonalmente, ver **figura 29**.

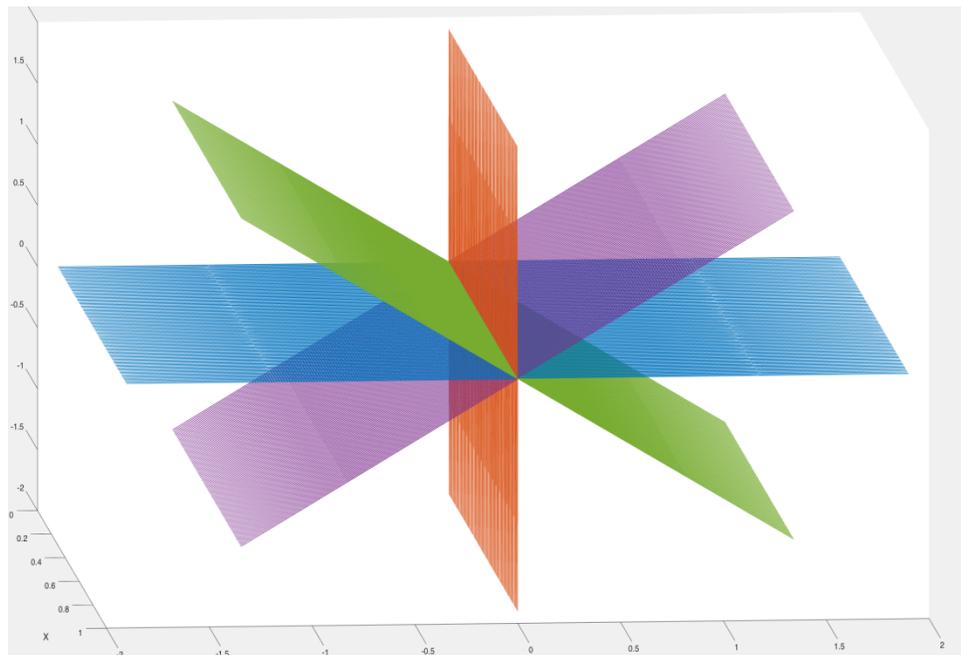


Figura 29. Haz de luz con múltiples polarizaciones.

La **Figura 29** representa el haz de luz que sale de cualquier fuente de emisión lumínico en un entorno, donde cada polarización superpuesta guarda información

en matrices al transcurrir un tiempo dado. Seguido a esto se presenta la etapa de polarización de la luz horizontal y sus respectivos valores en el tiempo mostrados en el bloque *display* “ver **figura 30**”, donde se hace un filtrado por columnas y se guarda la información en una nueva variable de salida que emitirá la señal polarizada de forma horizontal visto anteriormente en la **figura 27**.

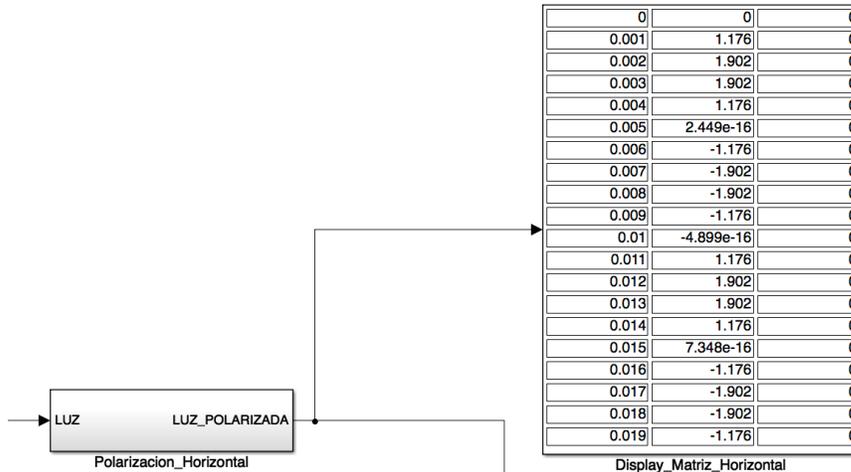


Figura 30. Subsistema creado manualmente en MATLAB acorde a la polarización horizontal.

En la **figura 31** se presenta el bloque donde se ingresan las normas que permiten la filtración horizontal el cual se encuentra ubicado dentro del subsistema de la **figura 30**.

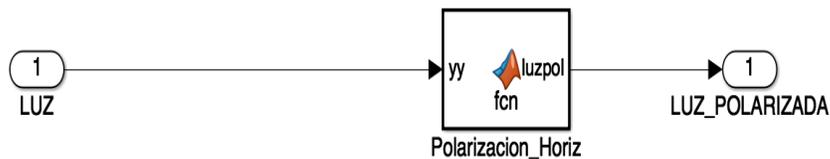


Figura 32. Filtro horizontal.

Paralelamente se crea un bloque similar al anterior que a diferencia de este último realizará un filtrado vertical ver **figura 34**, para llevar a cabo este proceso se intercambian las posiciones de las columnas 1 y 2 de la señal, esto con la intención de crear la señal portadora del mensaje ver **figura 33**.

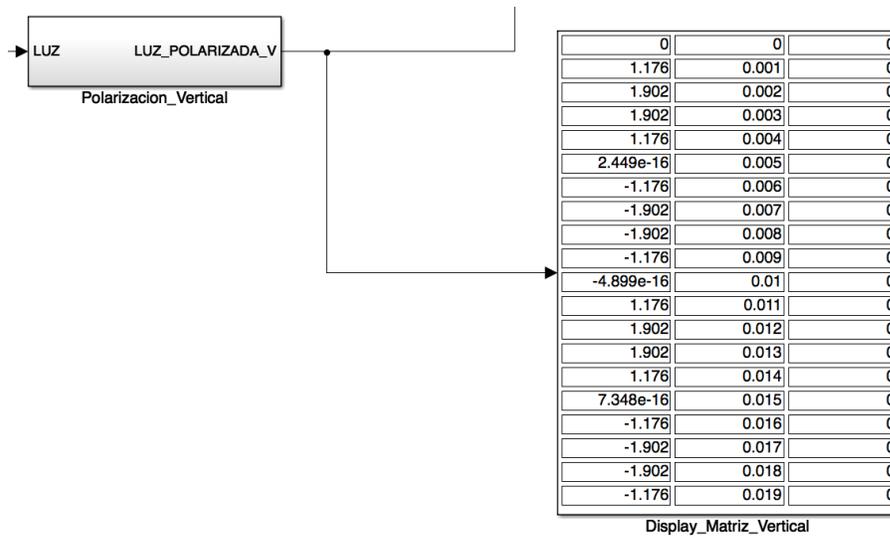


Figura 33. Polarización Vertical.

La señal saliente del intercambio de las columnas trae como resultado la polarización vertical ver **figura 34**.

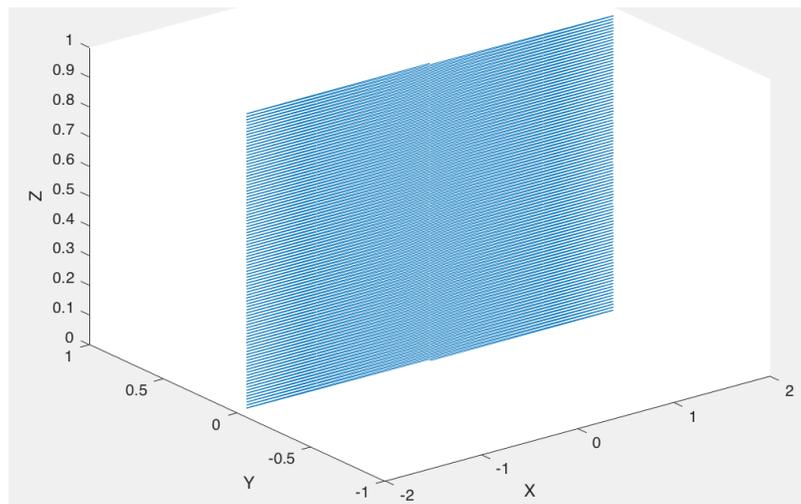


Figura 34. Filtrado polarizado verticalmente.

Habiendo realizado la etapa portadora encardada de llevar la información, se procede a crear los datos a transmitir “ver **figura 35**” para esto, se hace uso de del *Random Integer* que se encarga de generar una secuencia binaria aleatoria ver **figura 36**.



Figura 35. Subsistemas correspondientes al dato y al codificador NRZ.

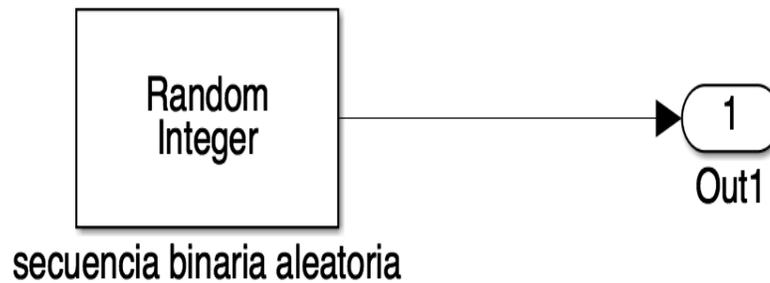


Figura 36. Bloque encargados de generar el dato.

Al ingresar al subsistema del codificador “**figura 35**” se encuentra el bloque ZOH(*Zero Order- Hold*) encargado de generar transiciones NRZ de acuerdo al pulso incidente “ver **figura 37**”.

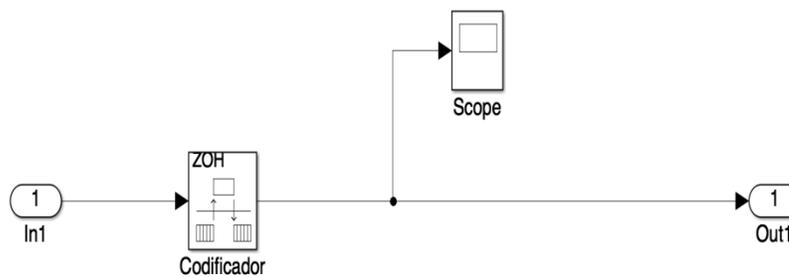


Figura 37. Codificador NRZ.

Teniendo la señal codificada, se procede a entrar en el subsistema modulante “ver **figura 38**”, donde ingresan la portadora (filtraciones verticales y horizontales) y el dato.



Figura 38. Subsistema modulante.

Al entrar en el subsistema modulante se abre el bloque modulador “ver **figura 39**”, el cual consta de un *switch* que conmuta de acuerdo al valor del dato, es decir si el bit de entrada es 1 el interruptor permite el paso de la polarización vertical, de lo contrario permite el paso de la polarización horizontal.

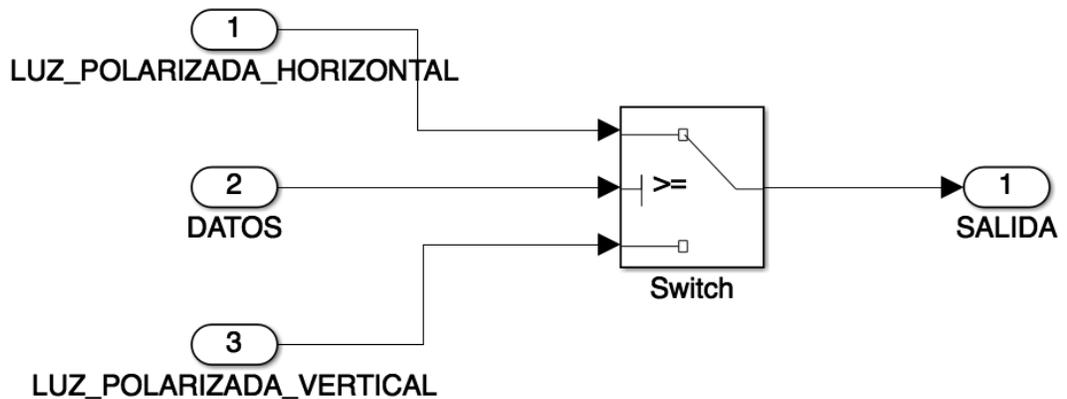


Figura 39. Etapa Moduladora por Polarización de la Luz.

En la **figura 40** se muestra la etapa completa del subsistema de modulación de la señal lumínica.

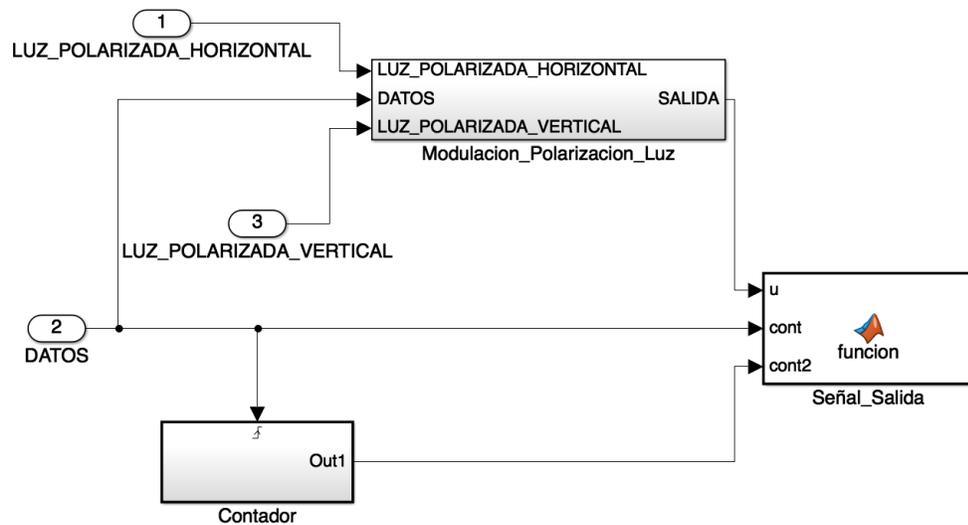


Figura 40. Subsistemas de la modulación y dato modulado.

Dentro del subsistema contador se encuentra el bloque *Trigger* encargado de almacenar en memoria el evento a ejecutar, asimismo se muestra un circuito de incremento, compuesto por la sumatoria de una constante y un bloque de retardo que son sumados para finalmente permitir el aumento de la señal saliente “ver figura 41”.

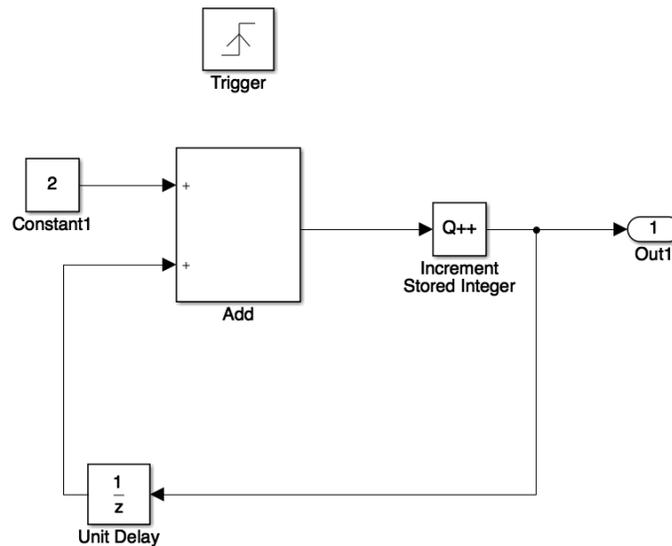


Figura 41. Bloque de incremento de la señal en el tiempo.

Seguidamente en el subsistema final, ingresa el dato codificado que va a servir como condicionante para permitir la representación gráfica de la modulación y a su vez un segundo contador el cual realiza el trabajo de incrementar en el tiempo la señal modulada, es decir permite que la conmutación sea constante en un tiempo dado, para que se pueda representar el comportamiento de la onda más completo. A continuación se muestra la señal modulada obtenida en el bloque final, en esta el eje x: longitud de la onda en 0, el eje y: longitud de la onda en 1 y el eje z: la amplitud de la onda.

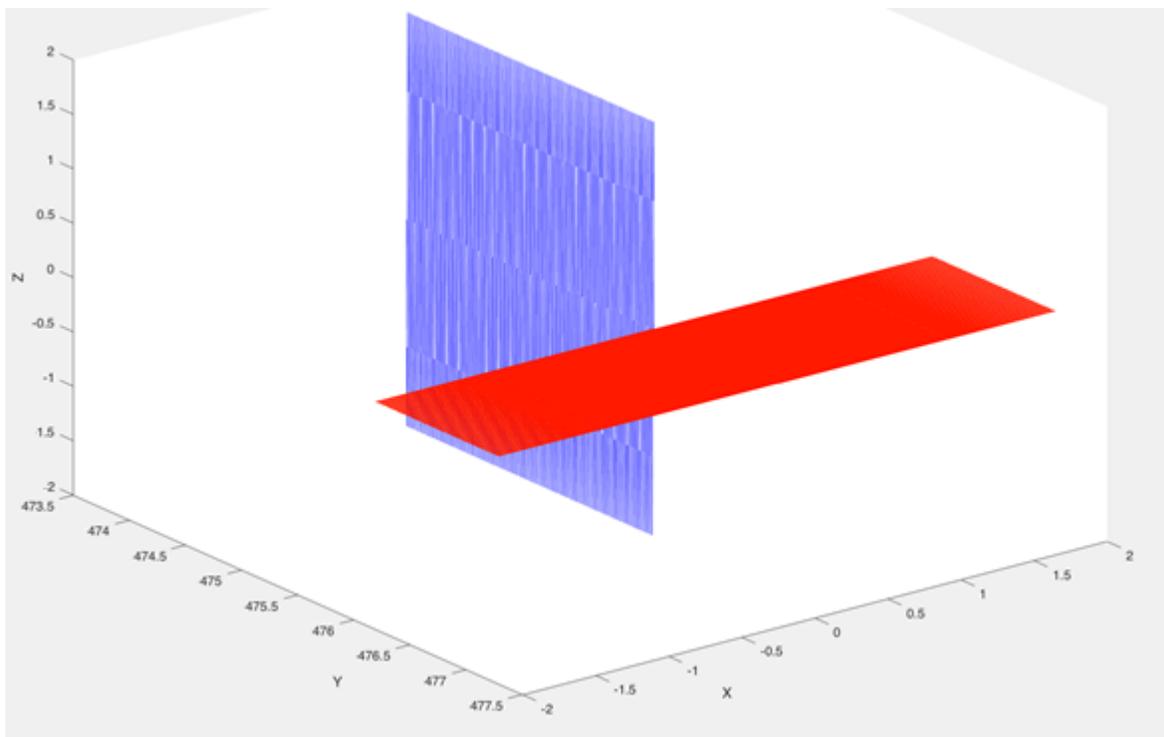


Figura 42. Primeros dos datos modulados.

En la **figura 42** se nota la representación del primer par de datos salientes del modulador, al transcurrir un tiempo más alto la señal tiende a representar una mayor muestra de datos modulados ver “**figura 43**”.

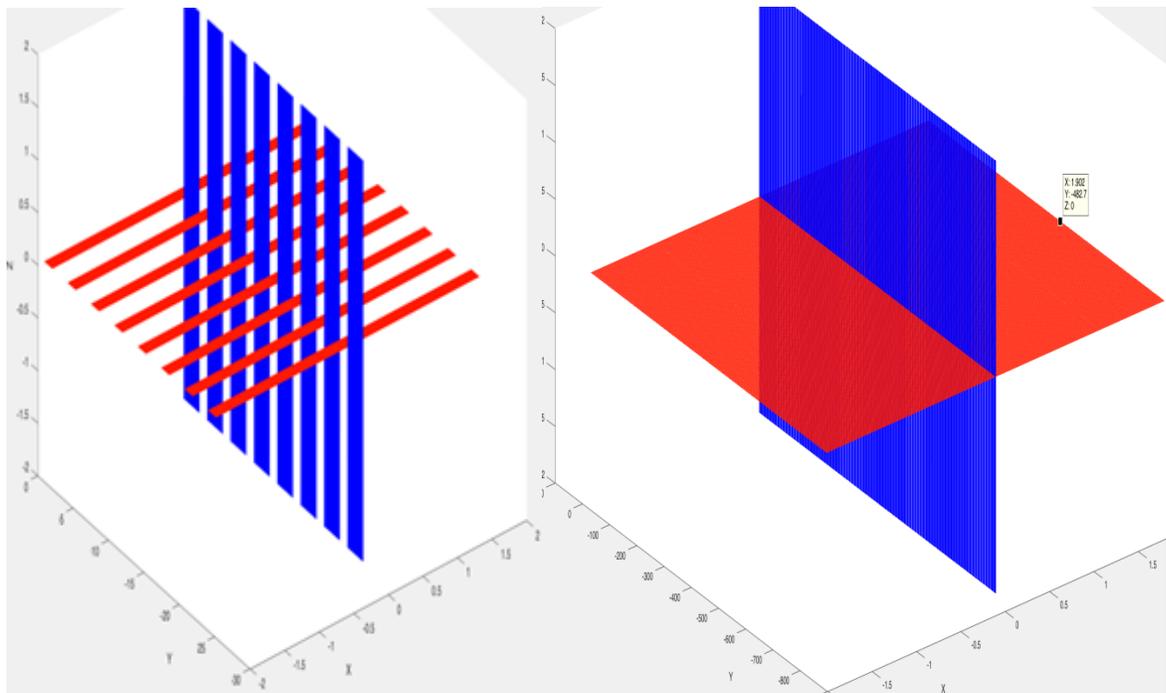


Figura 43. Señal modulada OOK-NRZ.

4.1.2 Simulación OOK RZ

A continuación se presenta el segundo diseño de la etapa transmisora de un sistema de comunicación por luz visible aplicando una codificación RZ.

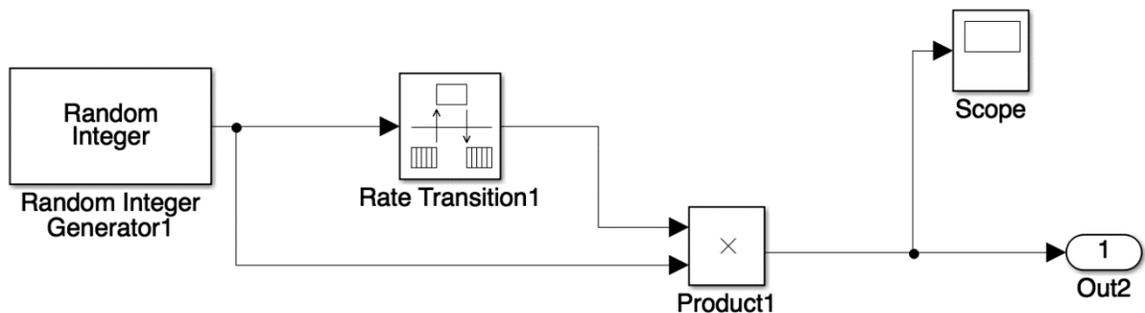


Figura 44. Codificador RZ.

La **figura 44** representa el codificador RZ el cual consta de un dato generado por un *Random Integer Generator* encargado de crear señales binarias aleatorias al aplicarle un tiempo de muestreo, seguidamente se encuentra un *Rate Transition*

que genera un cambios en la velocidad de la señal, es decir produce transiciones, finalmente se multiplica por el pulso lo que permite la creación de alteraciones que retornan a cero.

4.1.3 Simulación OOK Manchester Diferencial

A continuación se hace el diseño de la etapa transmisora a partir de un codificador Manchester Diferencial, la estructura del sistema completo es idéntico a los vistos anteriormente exceptuando el bloque donde se origina el mensaje, el cual está compuesto de la siguiente estructura: un bloque *Random Integer*, donde se crea la señal aleatoria, seguidamente en el bloque *Scrambler* se codifica y sincroniza la señal donde un multivibrador JK realiza un seguimiento comparando la entrada sincronizada con la negada o reloj, para luego ser relacionada con el mensaje de entrada original a través de la compuerta XOR donde la señal se confronta con un bloque *Fcn* que realiza los cambios binarios bruscos, es decir a la mitad, para generar finalmente la señal codificada Manchester Diferencial “ver figura 45”.

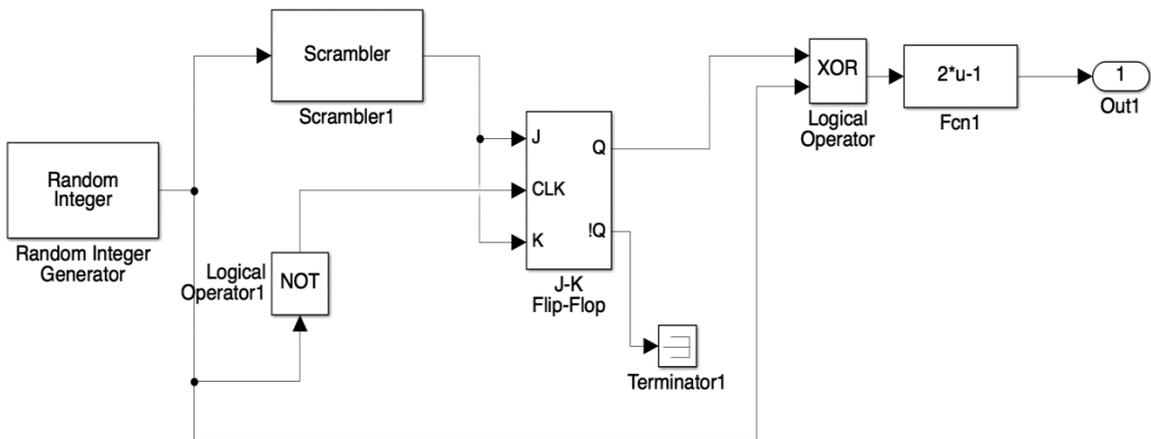


Figura 45. Diseño de un sistema transmisor VLC por codificación Manchester Diferencial.

4.1.4 Simulación PPM Manchester Diferencial

En esta etapa se realizó la simulación de la fase transmisora a partir de la modulación PPM con un codificador Manchester Diferencial, la cual se ve representada en la **figura 46**.

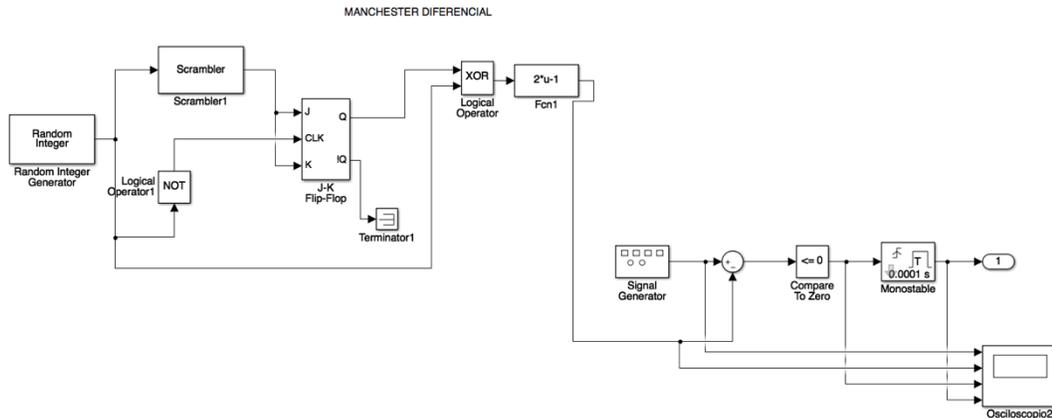


Figura 46. Simulación modulación PPM Manchester Diferencial.

4.1.5 Resultados Obtenidos

Teniendo en cuenta las simulaciones descritas anteriormente con los moduladores OOK y PPM, a continuación se presenta en la **tabla 4** los resultados obtenidos que llevaron a la selección del mejor diseño

Modulación		Tasa de Bit = $\frac{\text{Total de Bit}}{\text{Tiempo} \cdot 10^3}$ [Kbps]			Tiempo de Compilación "Procesamiento" en Matlab		
	Codificación	1 Segundo	2 Segundos	4 Segundos	1 Segundo	2 Segundos	4 Segundos
OOK	NRZ	$\frac{6}{1 \cdot 10^3} = 0.006$	$\frac{9}{2 \cdot 10^3} = 0.0045$	$\frac{21}{4 \cdot 10^3} = 0.0052$	00:02.47 Aproximadamente.	00:06.36 Aproximadamente.	00:07.12 Aproximadamente.

	RZ	$\frac{26}{1 \cdot 10^3} = 0.026$	$\frac{50}{2 \cdot 10^3} = 0.025$	$\frac{110}{4 \cdot 10^3} = 0.0275$	00:09.06 Aproximadamente.	00:13.26 Aproximadamente.	00:24.31 Aproximadamente.
	Manchester Dif.	$\frac{32}{1 \cdot 10^3} = 0.032$	$\frac{79}{2 \cdot 10^3} = 0.0395$	$\frac{154}{4 \cdot 10^3} = 0.0385$	00:22.82 Aproximadamente.	00:52.07 Aproximadamente.	03:39.47 Aproximadamente.
PPM	NRZ	$\frac{5}{1 \cdot 10^3} = 0.005$	$\frac{9}{2 \cdot 10^3} = 0.0045$	$\frac{20}{4 \cdot 10^3} = 0.005$	00:05.71 Aproximadamente.	00:06.36 Aproximadamente.	00:06.84 Aproximadamente.
	RZ	$\frac{50}{1 \cdot 10^3} = 0.050$	$\frac{51}{2 \cdot 10^3} = 0.0255$	$\frac{57}{4 \cdot 10^3} = 0.0142$	00:08.66 Aproximadamente.	00:11.37 Aproximadamente.	00:20.86 Aproximadamente.
	Manchester Dif.	$\frac{44}{1 \cdot 10^3} = 0.044$	$\frac{74}{2 \cdot 10^3} = 0.037$	$\frac{148}{4 \cdot 10^3} = 0.0365$	04:15.98 Aproximadamente.	14:12.91 Aproximadamente.	51:23.25 Aproximadamente.

Tabla 4. Resultados de la simulación para la modulación OOK y PPM

En la **tabla 4** se muestran las dos modulaciones utilizadas, OOK y PPM empleando las codificaciones NRZ unipolar, RZ y Manchester Diferencial, donde se puede ver la tasa de datos para cada una, en diferentes tiempos dados. A la hora de seleccionar el mejor sistema, el autor se basó en diferentes parámetros, como lo es la sincronización del diseño simulado, en un sistemas real con un solo hilo, es por eso que las codificaciones RZ y Manchester en OOK, ya que cuando se envían tramas largas de un bit similar, dichas codificaciones tienden a auto sincronizarse mediante transiciones en el tiempo suaves, del mismo modo hay que tomar en cuenta que la velocidad de transmisión es aceptable, sin dejar de lado que el procesamiento no excede un tiempo prudente.

4.2 Simulación de la Etapa de Recepción

A continuación se presenta la simulación de la etapa encargada de detectar los estados binarios enviados por el transmisor, con la creación de este bloque “demodulador” se garantizan la correcta recepción de los datos en el dispositivo receptor. Para llevar a cabo dicho proceso se extraen tres salidas del bloque final de modulación correspondientes a la portadora, el dato contador y el incremento “ver **figura 47**”, las cuales acceden al bloque demodulador encargado de recuperar la señal enviada “ver **figura 48**”.

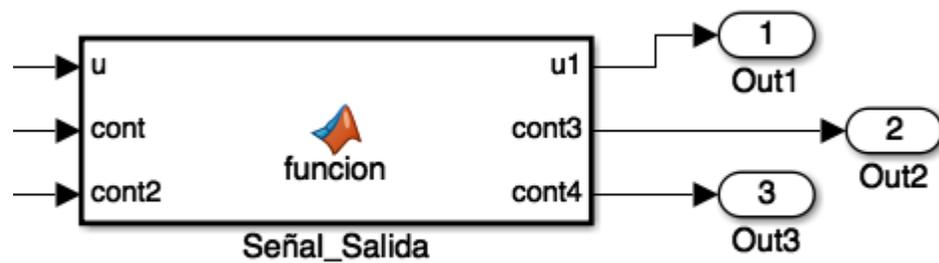


Figura 47. Salidas de la etapa transmisora.

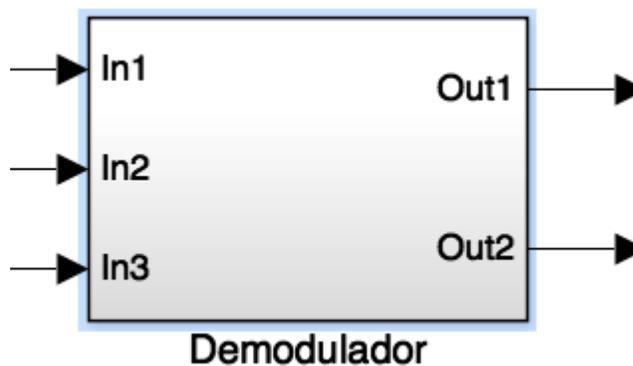


Figura 48. Subsistema de Demodulación.

La etapa de demodulación está constituida por un interruptor que condiciona la señal en dos estados y por un contador que decodifica las polarizaciones “ver figura 49”.

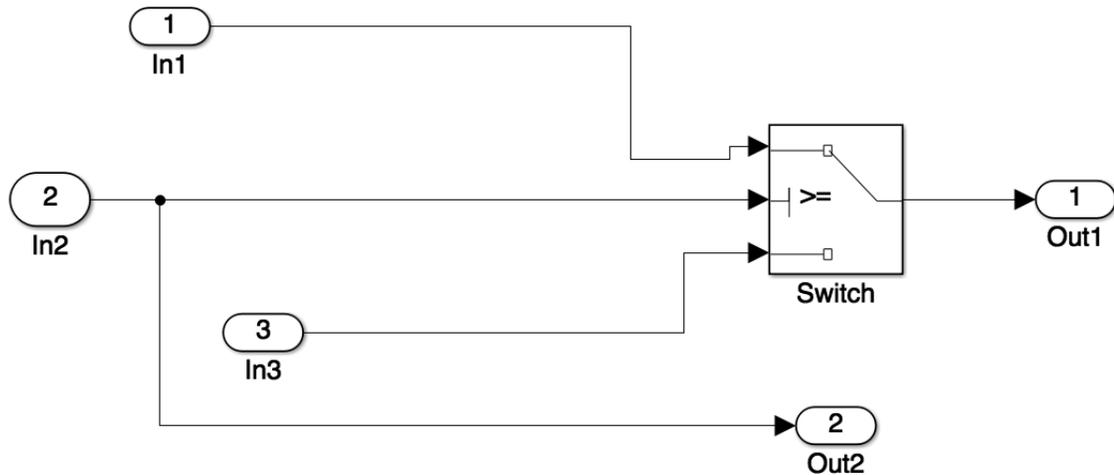


Figura 49. Etapa de demodulación.

Finalmente un tipo de polarización de la luz ingresa al subsistema de salida en simultánea con la señal de incremento “ver figura 50”, donde se amplifica el mensaje enviado para mejorar su recepción “ver figura 51”.



Figura 50. Subsistema de salida.

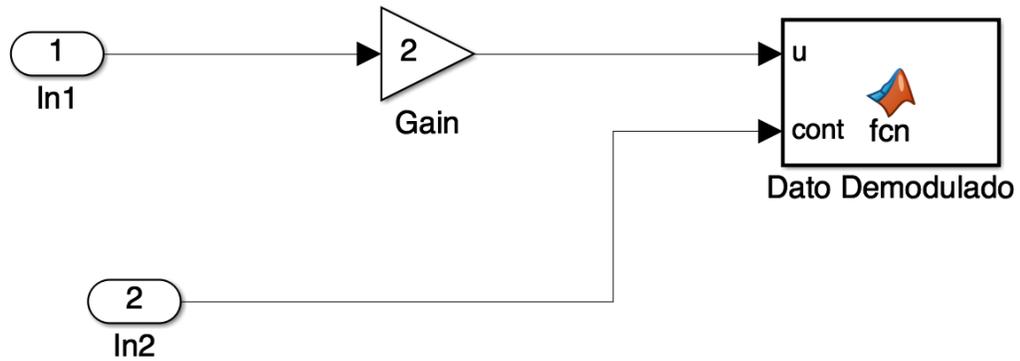


Figura 51. Bloque final de demodulación.

A continuación se presenta el diseño final del sistema de comunicación por luz visible con las etapas transmisoras y receptoras “ver figura 52”.

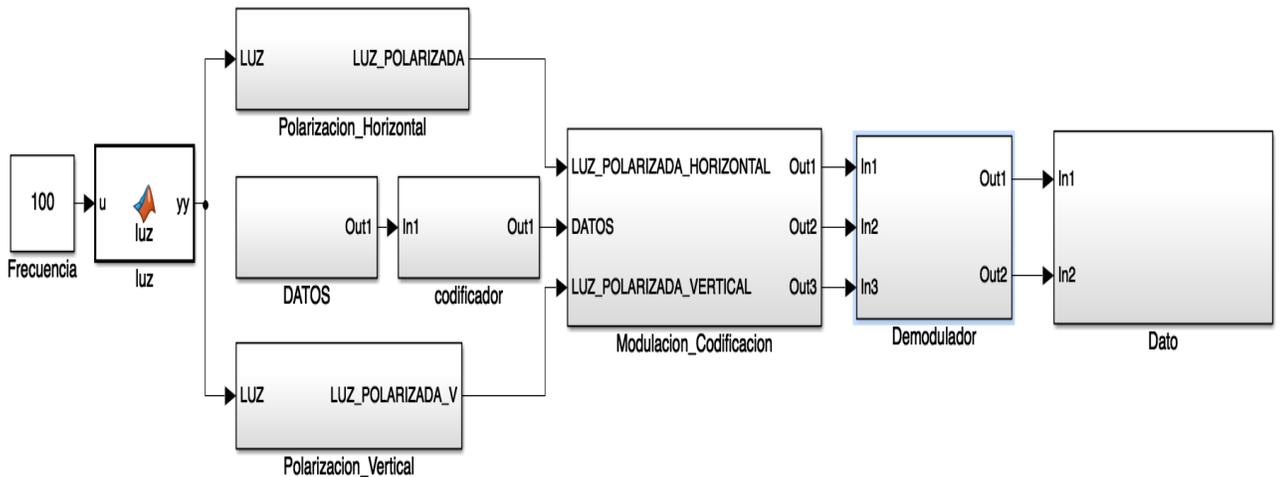


Figura 52. Sistema de comunicación por luz visible.

El diseño del sistema de comunicación por luz visible modulado por la polarización de la luz con las técnicas OOK y PPM es capaz de transmitir un mensaje en un sistema de comunicación SISO mediante un modo de transmisión *Simplex*, donde los datos dirigidos a un receptor ubicado en cualquier punto con línea de vista al dispositivo iluminante en el ambiente *indoor* son captados por éste gracias a la demodulación realizada previamente y representado a través de pulsos en la figura 53 y figura 54.

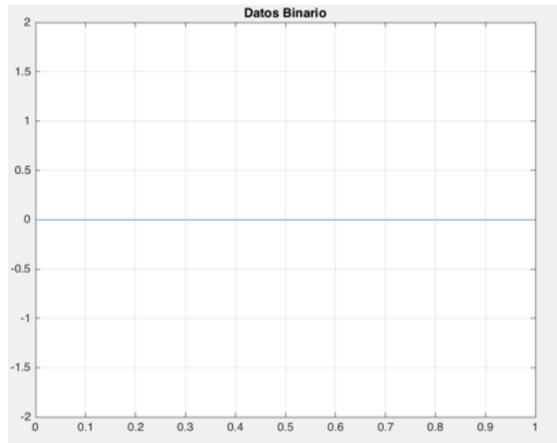


Figura 53. Señal recibida "estado binario cero".

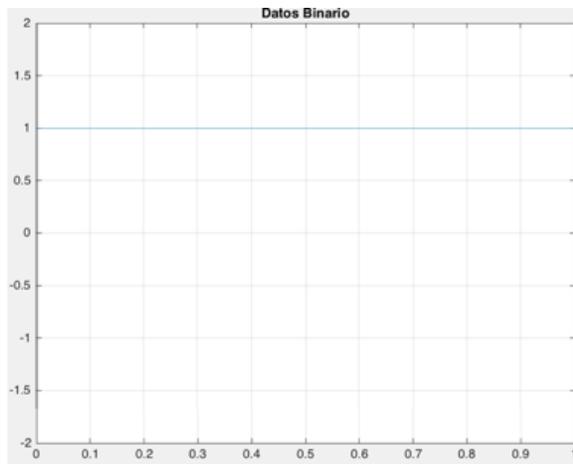


Figura 54. Señal recibida "estado binario uno".

4.3 Simulación de la Etapa de Transmisora y Receptora de una imagen ingresada por el usuario

Teniendo en cuenta el funcionamiento presentado anteriormente se optó por emitir una señal generada por una imagen ingresada por el usuario ver **figura 56**, la cual se ve representada en su diagrama en bloques mediante la figura 55.

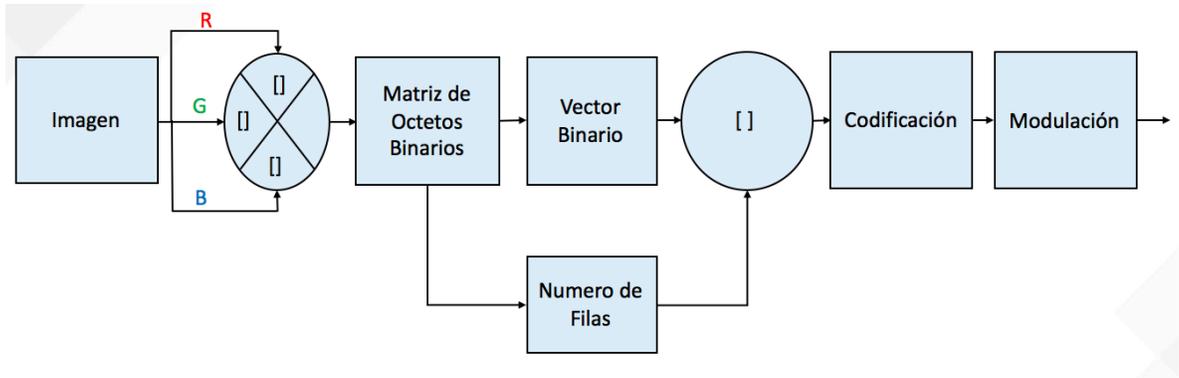


Figura 55. Dato de entrada.

En la **figura 55** se muestran el comportamiento lógico del procedimiento a realizar para emitir una imagen, donde se hace el procedimiento de separación en las 3 intensidades de color, para luego ser convertido en octetos binarios para su posterior codificación y modulación.

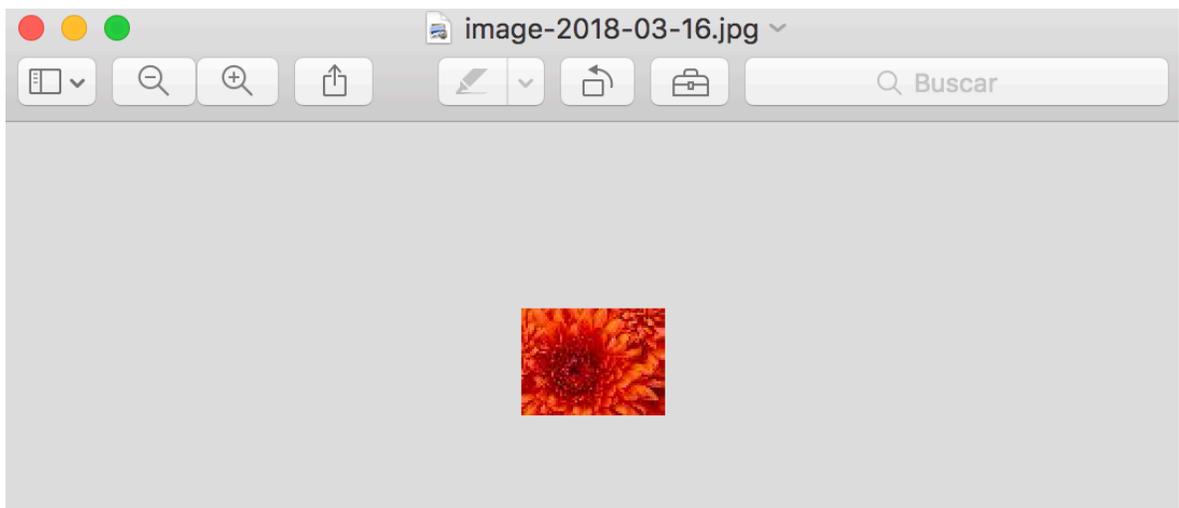


Figura 56. Dato de entrada.

En la **figura 57** se puede visualizar los bloques utilizados para leer el dato que se quiere transmitir, del lado izquierdo se encuentra el bloque *image from file* donde se monta la imagen y se separa en los componentes de colores principales de la luz RGB que la constituyen, del lado derecho se encuentra el bloque video *viewer* donde se visualiza la imagen y se pueden ver sus dimensiones 50x67 (filas, columnas).



Figura 56. Bloque lector de la imagen.

En la **figura 58** se presenta la imagen en el nivel rojo, donde se puede ver del lado derecho el valor de los pixeles en las primeras posiciones.

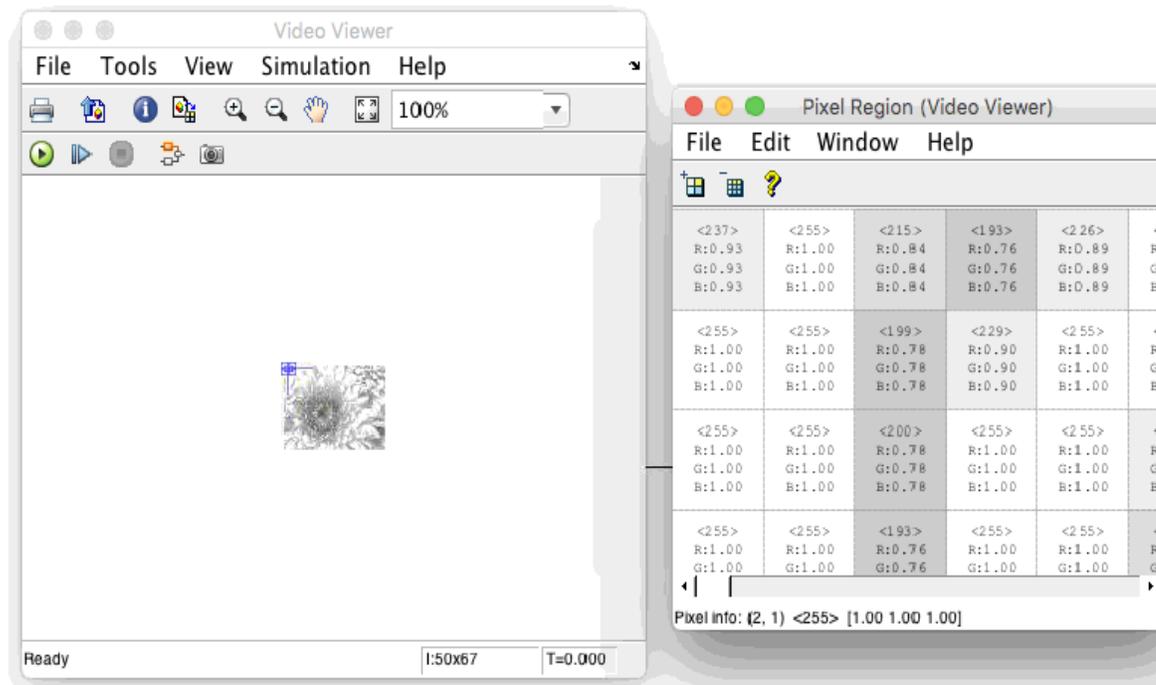


Figura 58. Composición de color en la intensidad rojo (R).

Al momento de transmitir el dato a través de la luz, lo que se llevará a cabo es la conversión de los valores de los pixeles (0-255) a octetos binarios, simulando el caso de las máscaras de red de una dirección IP, donde el valor menor cero equivale a (00000001) y el valor mayor 255 equivale a (11111111), en el lado derecho de la figura 57 se pueden notar los pixeles que componen dicha imagen, donde se representaron los 3 primeros datos mediante la modulación por polarización de la luz, en la **figura 59** se ven representados los niveles en decimal y binarios.

Valor en RGB	237	255	215
Valor Binario	11101101	11111111	11010111

Figura 59. Valor de los 3 primeros pixeles de la imagen.

En la **figura 60** se muestra los valores de las primeras tres posiciones, donde los símbolos azules verticales representan los unos y los símbolos horizontales rojos representan los ceros.

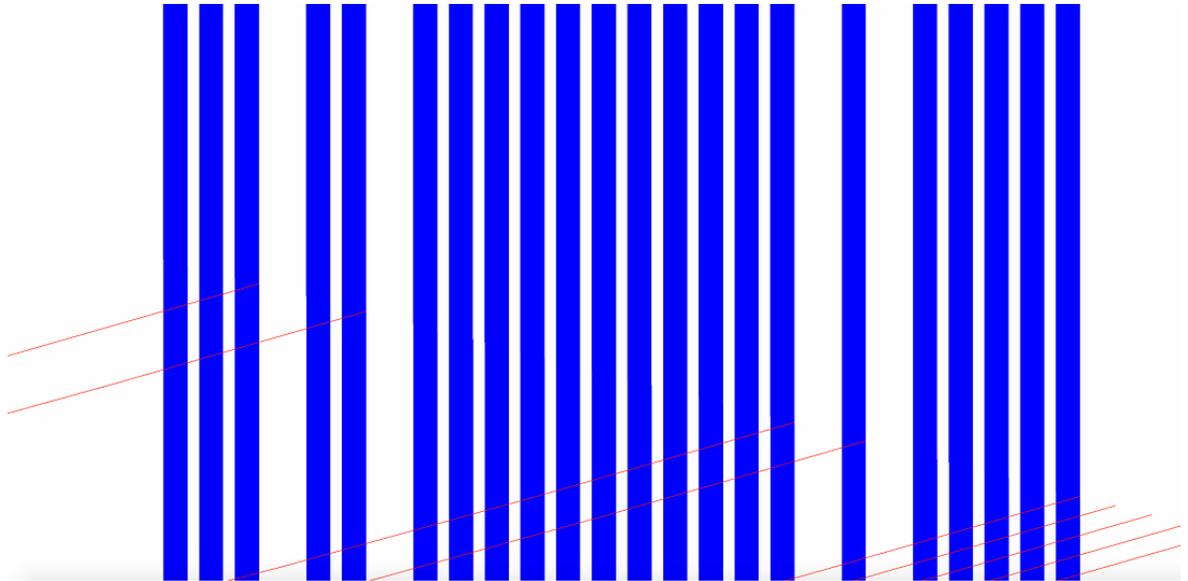


Figura 60. Estados binarios de las 3 primeras posiciones de la imagen.

A continuación en la **figura 61** se muestra el bloque generador de la señal vista en la **figura 60**, en este bloque se adicionan las intensidades G y B, y se adicionan los bloques *video viewer* para mostrar el comportamiento de los datos, los cuales al ser concatenados, se incorporan en una matriz de octetos binarios para luego ser enviados uno por uno a través de un vector binario, ver **figuras 61-65**.

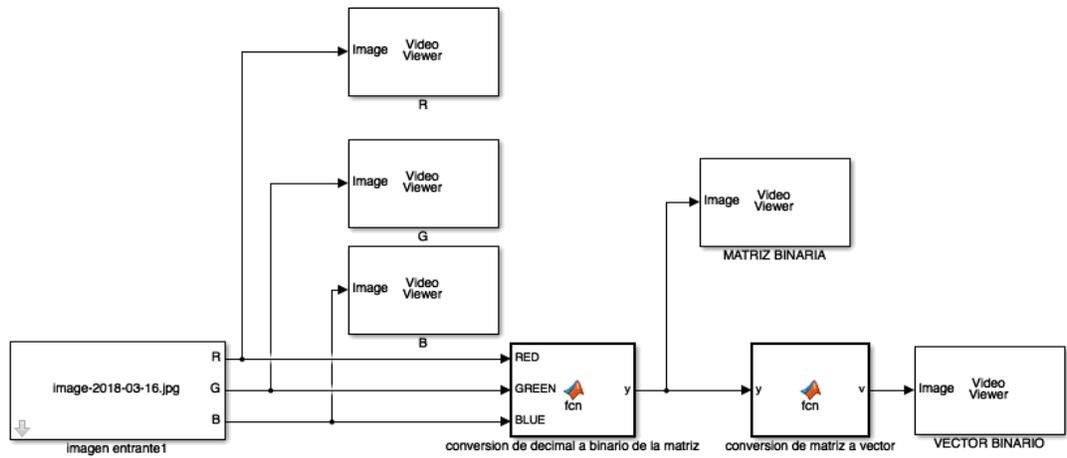


Figura 61. Bloque transmisor RGB.

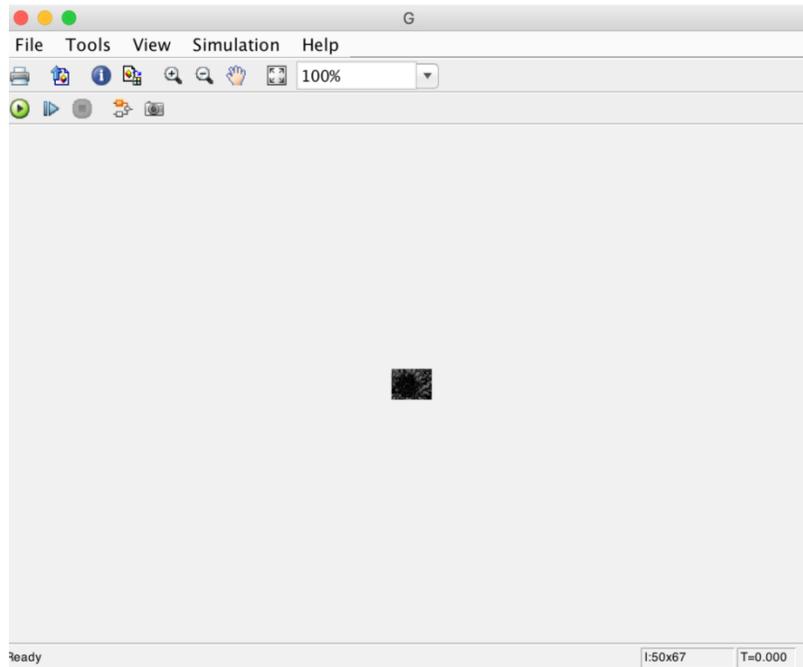


Figura 62. Imagen en intensidad verde (G).

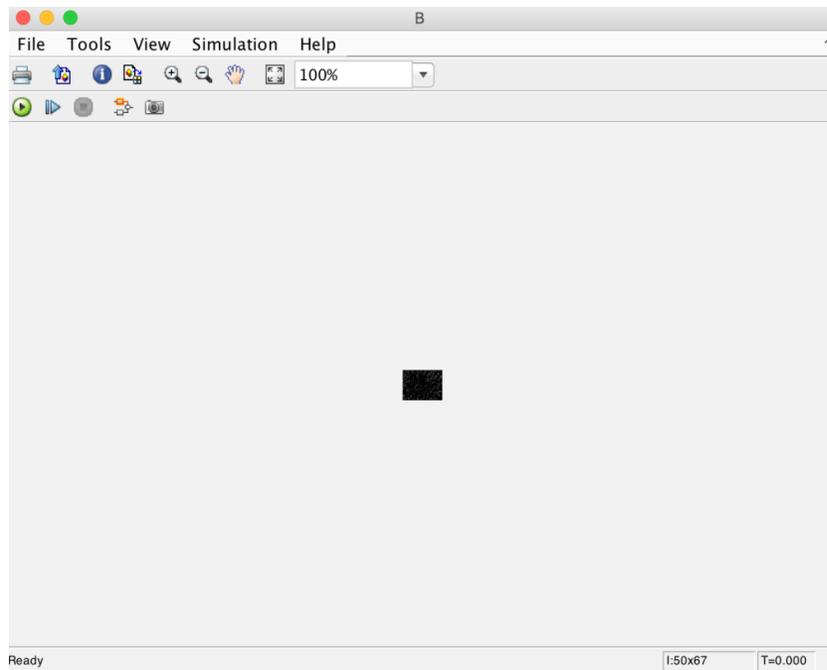


Figura 63. Imagen en intensidad azul (B).

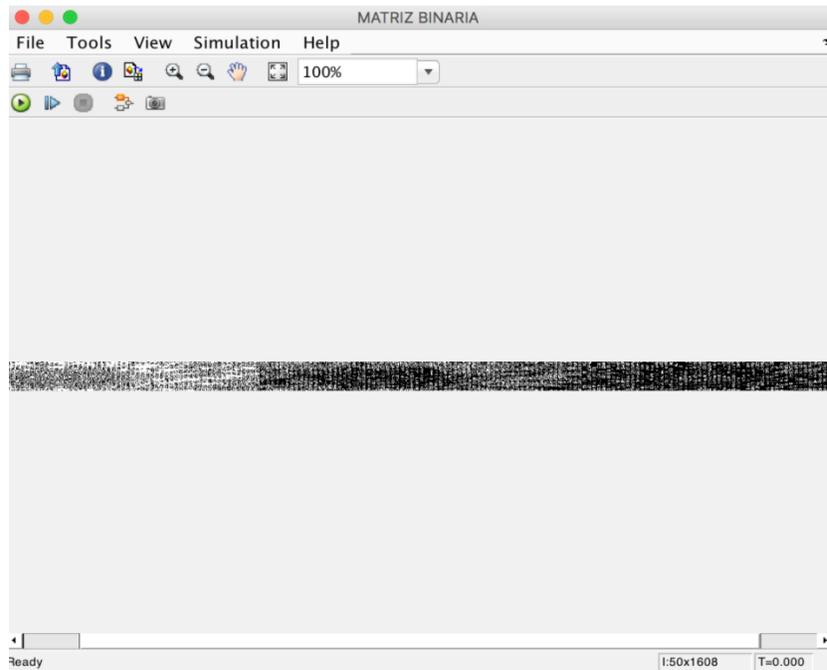


Figura 64. Matriz concatenada de octetos binarios RGB con dimensiones de 50x1608.

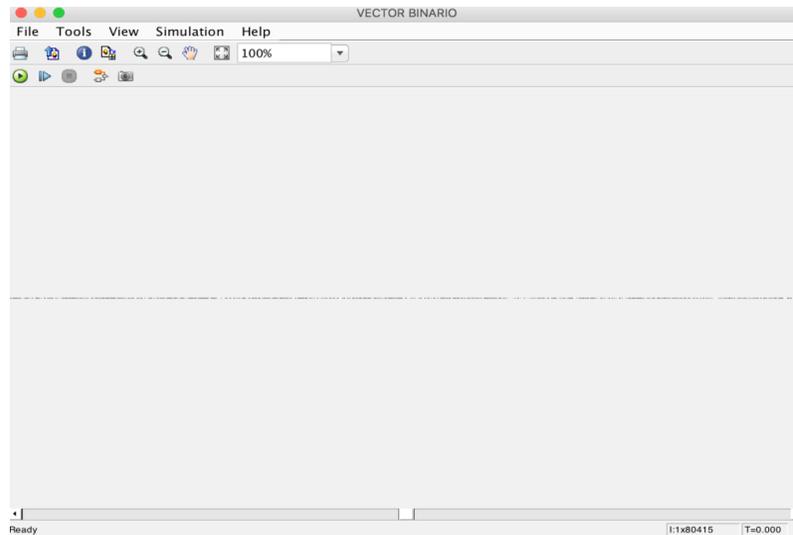


Figura 65. Vector binario RGB de dimensiones de 1x80415

En la **figura 66** se muestra el sistema final de modulación por polarización de la luz, donde se adicionan los diferentes codificadores las respectivas modulaciones el haz de luz a una frecuencia de 750 THz que corresponde al color azul, que al doparse con diferentes sustancias produce el color blanco, en la parte inicial izquierda se encuentra el transmisor y en la parte final derecha se ve representado el bloque receptor de sistema, asimismo en la **figura 67** se representa la etapa del sub-bloque modulante.

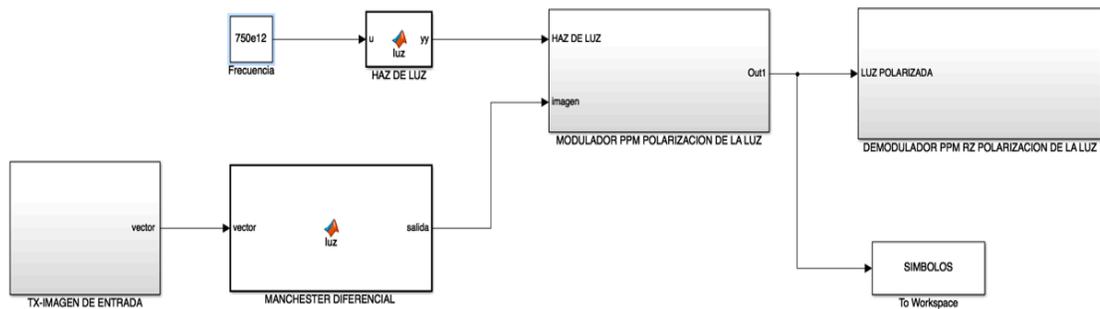


Figura 66. Sistema de comunicación por luz visible TX-RX.

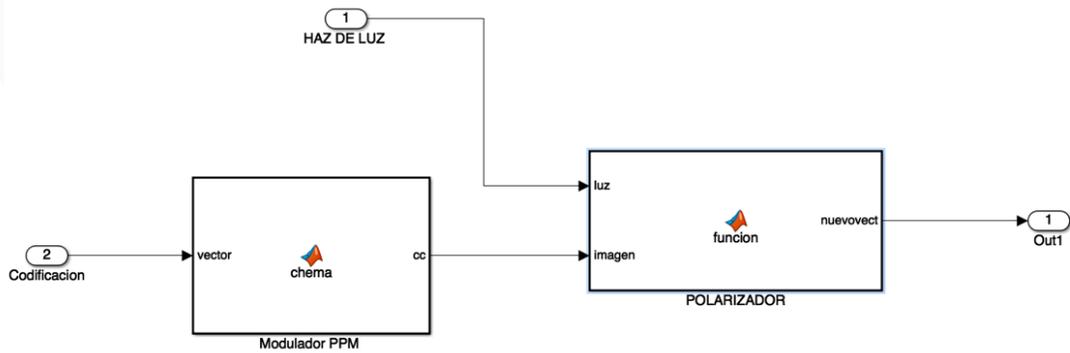


Figura 67. Etapa Modulante del Sistema de comunicación por luz visible.

A continuación en la **figura 68** se muestra el bloque del demodulador el cual recibe el vector binario, lo convierte en una matriz de octetos binarios y finalmente se transforma a una matriz decimal concatenada mediante el bloque del lado izquierdo llamado *to workspace*, donde se puede visualizar en la **figura 71**.

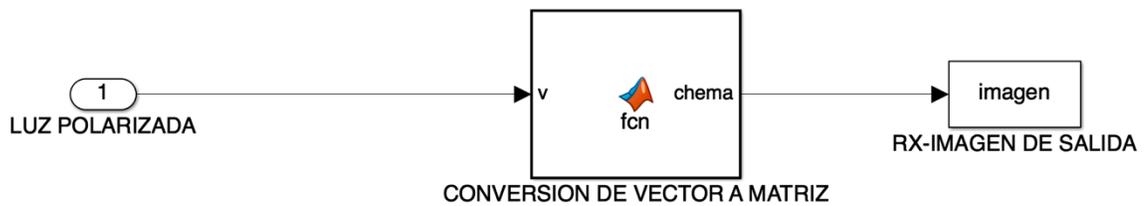


Figura 68. Etapa de demodulación del sistema de comunicación por luz visible.

En la **figura 69** se muestra todas las polarizaciones correspondientes a la imagen emitida, que al realizar un *zoom* se pueden ver representadas las primeras 100 posiciones en la **figura 70**.

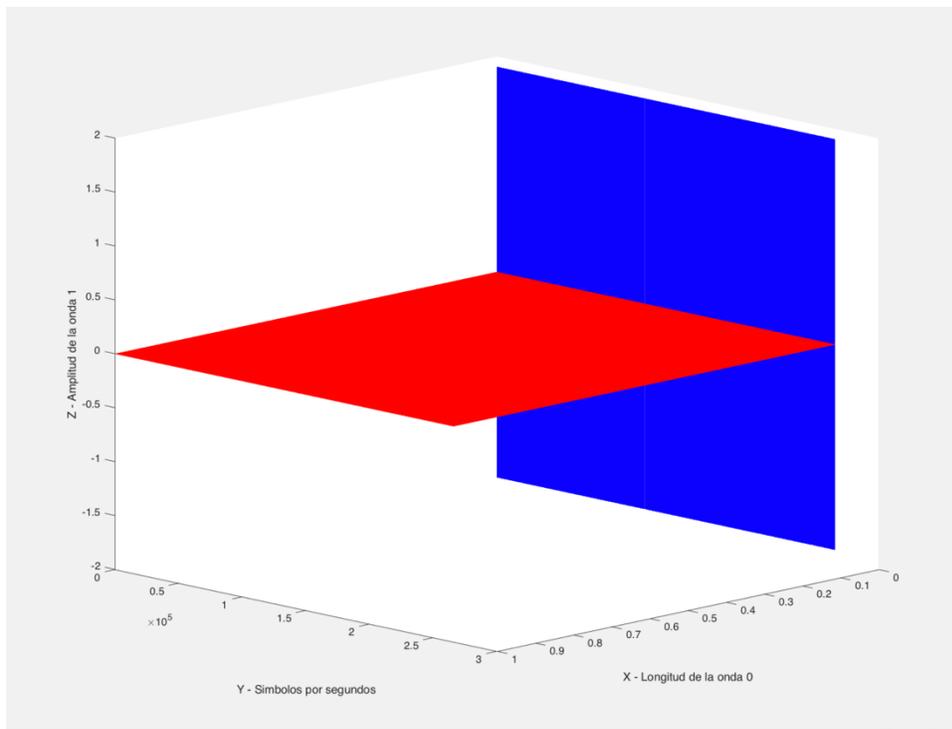


Figura 69. Dato modulado en la polarización de la luz.

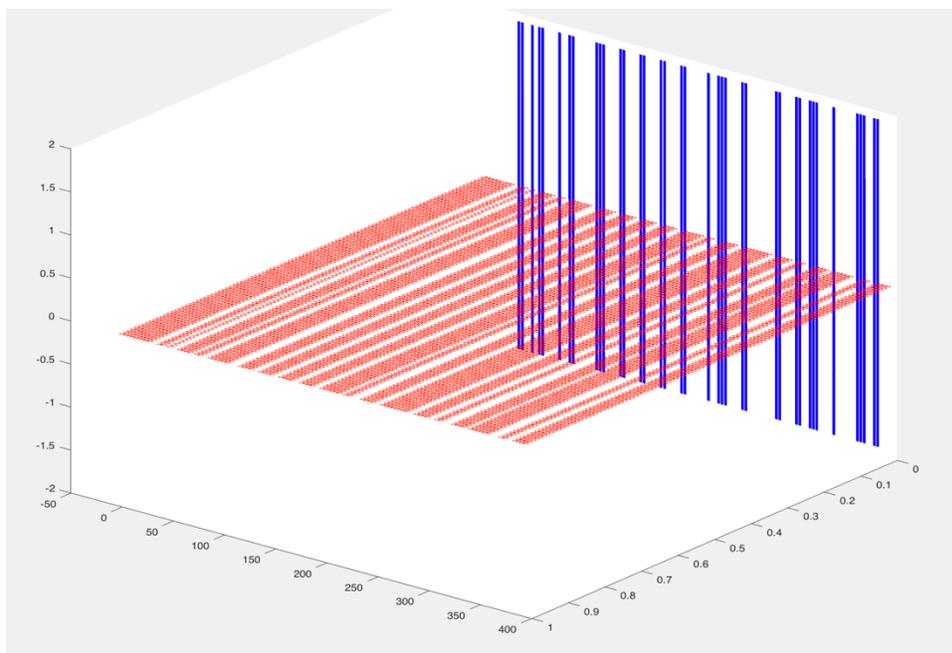


Figura 70. Zoom de las primeras 100 posiciones.

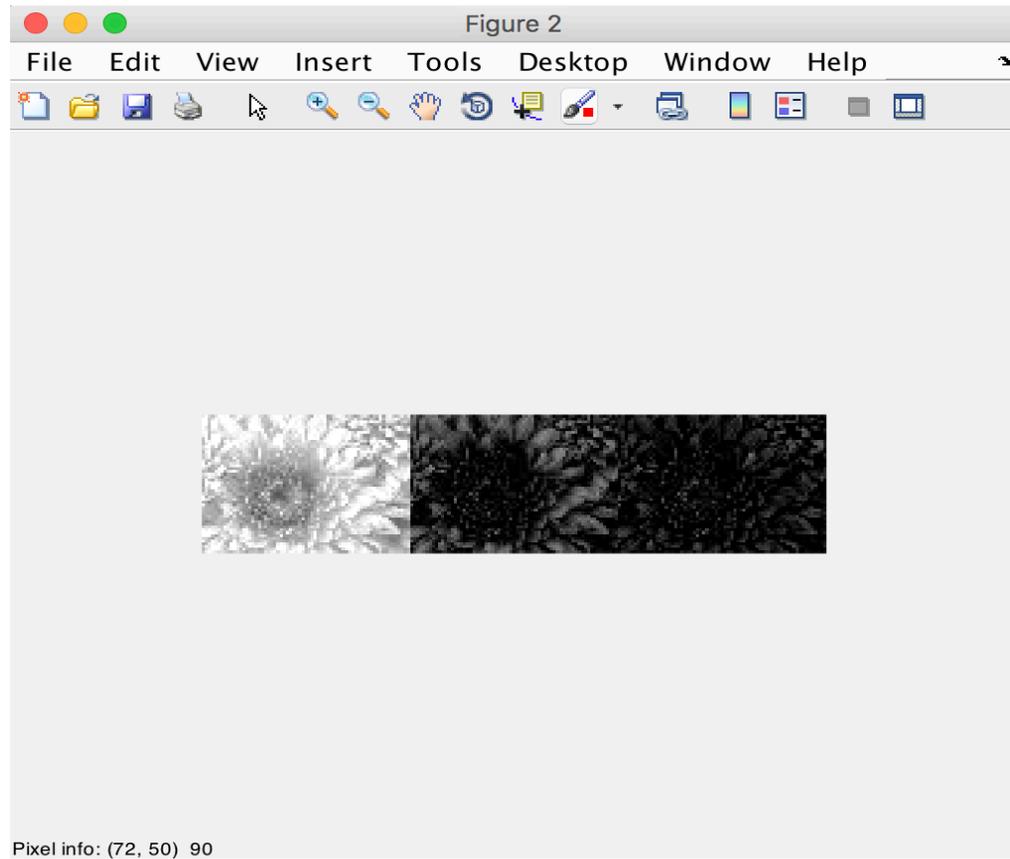


Figura 71. Señal RGB concatenada obtenida del lado del receptor.

Teniendo la matriz concatenada, lo siguiente es desmontar las intensidades para luego unirlas una sobre la otra y de esta manera se obtiene la imagen de la **figura 72**.



Figura 72. Señal final RGB obtenida del lado del receptor.

4.3.1 Resultados Obtenidos al Insertar la Imagen

Teniendo en cuenta las simulaciones descritas anteriormente con la inserción de una imagen del lado del bloque transmisor con los moduladores OOK y PPM, a continuación se presenta en la **tabla 5** los resultados obtenidos que llevaron a la selección del mejor diseño.

Modulación		Total de Bits= #Ceros+ #Unos	Tasa de Bit= $\frac{Total\ de\ Bit}{Tiempo * 10^3}$ [Kbps]	Tiempo de Compilación "Procesamiento " en Matlab
OOK	Codificación NRZ	49454 + 30961=80.415	$\frac{80415}{0.5 * 10^3}=0.16083$	3 Minutos Aproximadamente
	RZ	80415 + 80416=160.831	$\frac{160831}{0.5 * 10^3}=0.321662$	9 Minutos Aproximadamente
	Manchester Dif.	66302 + 66293=132.595	$\frac{132595}{0.5 * 10^3}=0.26519$	7 Minutos Aproximadamente
PPM	NRZ	98896 + 30961=129.857	$\frac{129.857}{0.5 * 10^3}=0.259714$	6 Minutos Aproximadamente
	RZ	98896 + 30961=129.857	$\frac{129.857}{0.5 * 10^3}=0.259714$	7 Minutos Aproximadamente
	Manchester Dif.	132592 + 66293=198.885	$\frac{198885}{0.5 * 10^3}=0.39777$	95 Minutos Aproximadamente

Tabla 5. Resultados Obtenidos en la Inserción de la imagen.

Al igual que en la **tabla 4** los parámetros de selección del mejor diseño son los mismos:

- Sincronía al llevar la simulación a un sistema real.
- Alta tasa de bits.
- Tiempo de procesamiento prudente.

Al momento de la simulación de los distintos sistemas, hay que aclarar que todos cumplieron con el objetivo pactado que es transportar un imagen desde un punto transmisor a un punto receptor. El autor está conforme con los diferentes

diseños, pero teniendo en cuenta los parámetros que especificó anteriormente, su selección se inclina por las codificaciones RZ tanto en OOK como en PPM ya que los tiempos de procesamiento son aceptables, como su tasa de transmisión, pero en términos de mayor sincronía el autor también opta por seleccionar el modulador OOK Manchester Diferencial, además de que su tasa de bits y tiempo de compilación es de igual forma que en los diseños anteriores aceptable.

4.4 Esquema de Dispersión del Color para un Sistema de Comunicación por Polarización de la Luz.

El gran desafío que aborda la tecnología VLC es la movilidad del equipo receptor, ya que si existe un desfase entre el ángulo de vista del transmisor y el campo de visión del fotodiodo, se van a presentar errores en la detección de los datos, es decir, si del lado del transmisor se envía un '1' el receptor lo interpretara como un '0', esto es un problema considerable en el diseño del sistema ya que los datos tenderán a perderse y la información enviada no será igual a la recibida.

Para abordar este problema, se sugiere diseñar una etapa dispersora del color en el lado del transmisor que se encargará de descomponer la luz blanca emitida por el diodo led en los diferentes colores principales o puros de la luz (rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta), es decir disminuirá la velocidad de propagación de la luz cuando atraviesa el polarizador horizontal del lado del receptor. En la **figura 73** se muestra la etapa transmisora del diseño del sistema en donde se agrega la etapa de dispersión **D** la cual actúa como un prisma, descomponiendo la señal blanca polarizada verticalmente en múltiples colores polarizados.

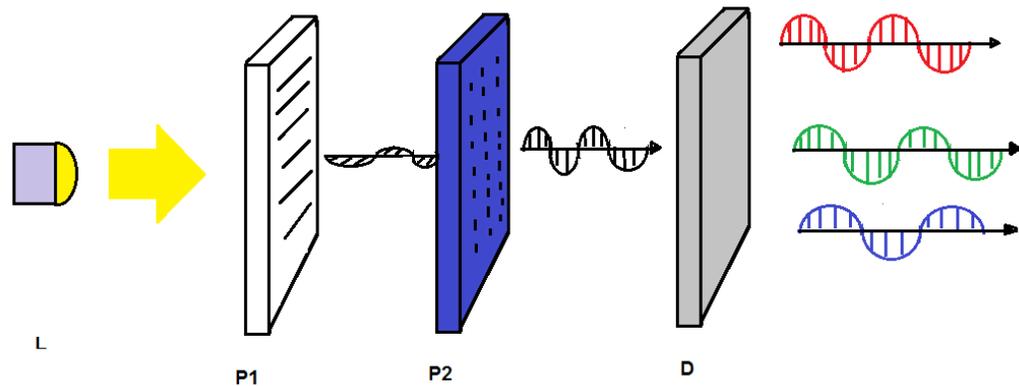


Figura 73. Etapa de dispersión del color "TX".

Del lado del receptor se ubicará el filtro polarizado verticalmente el cual se encargará de detectar los diferentes ángulos u orientaciones de los haces de luz a través de la cámara del dispositivo móvil, quien será la encargada de captar los matices o tonos del color, la modulación final de este sistema consiste en establecer una base de datos que almacene y segmente los ángulos de los haces transmitidos en un delimitado rango, que decretará los estados binarios, generalmente el material que compone el dispersor es el encargado de hacer rotar la polarización con diferentes frecuencias, a partir de las sustancias que lo componen como el cuarzo y el alcohol.

4.5 SIMULACIÓN DEL CANAL DE PROPAGACION

En este capítulo se realiza el modelaje determinístico de los efectos que acontecen en la propagación de la señal de luz visible en un entorno *indoor*, es decir se va a predecir mediante representaciones gráficas y expresiones matemáticas lo que ocurre con las ondas electromagnéticas irradiadas por una fuente lumínica en un espacio cerrado. La realización de esta etapa es posible gracias al software MATLAB y a su interfaz gráfica GUI la cual posibilita a un usuario remoto acceder a la aplicación para estimar medidas de potencias de recepción en cualquier recinto cerrado.

A la hora de ejecutar el modelaje de la potencia receptora se realizó una serie de diseños a partir del *script* de MATLAB, primordialmente se tuvo en cuenta las dimensiones del espacio *indoor* que fueron creadas a partir de variables fijas, seguidamente se insertó los parámetros de un diodo led blanco cualquiera tomando como referencia los datos de un *datasheet*. Variables como la potencia de transmisión y el ángulo de visión fueron las necesarias para simular la emisión, de igual manera se insertaron los parámetro en el lado receptor, en este caso se tuvo en cuenta la sensibilidad del receptor, el campo de vista y la responsividad.

Para recorrer las dimensiones del recinto, se hizo de uso de matrices que avanzan en el tiempo y dentro de estas se ingresaron los respectivos ángulos de irradiación e incidencia del sistema. Hay que tener en cuenta que en este diseño se supuso una superficie Lambertiana, es decir ideal en donde la radiación que incide en ésta, se refleja uniformemente en el entorno de la habitación y se representa matemáticamente así:

$$R_o(\phi) = [(m + 1)/2\pi] \cos^m(\phi)$$

Dónde: las unidades de R_o son [w/sr], ϕ es el ángulo de irradiación y m es el orden de emisión Lambertiana el cual es la concentración de la energía en el sistema, si m se acerca a cero la concentración de energía es mayor, su fórmula matemática es la siguiente:

$$m = (-\log(2) / (\log(\cos(\phi/2))).$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores se realiza el modelaje de la ganancia del sistema el cual se expresa así:

$$H(0)_{LOS} = \begin{cases} \frac{A_{rx}}{d^2} R_o(\phi) \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}$$

Donde H_{LOS} es la función de transferencia del sistema con línea de vista, A_{rx} es área activa del fotodiodo, d es la distancia entre el transmisor y el receptor, ψ es el ángulo de incidencia y ψ_c es el campo de vista del fotodiodo. Básicamente la expresión matemática manifiesta que si existe una visibilidad entre el equipo transmisor y el receptor, existe comunicación.

En este modelo la potencia del led se ve alterada por la intensidad de radiación, lo que implica que la potencia de transmisión en [w], de la fuente está definida como:

$$P_{tx} = P_{LED} * R_o(\phi).$$

Estimando la potencia de transmisión de la fuente lumínica se determina la potencia de recepción total LOS en el sistema, además está constituida por la función de transferencia que hizo un barrido por la habitación a través de la estructura de control FOR sumado al número de *leds* incrustados en la fuente óptica.

$$P_{rx,LOS} = \sum_{i=1}^{LEDs} P_{tx} H_{LOS}^i(0)$$

Los ángulos especificados anteriormente se muestran en la **figura 74** donde adicionalmente se puede observar la intensidad radiante emitida por el transmisor, el FOV o campo de vista del fotodiodo y las posiciones de los bloques transmisores y receptores.

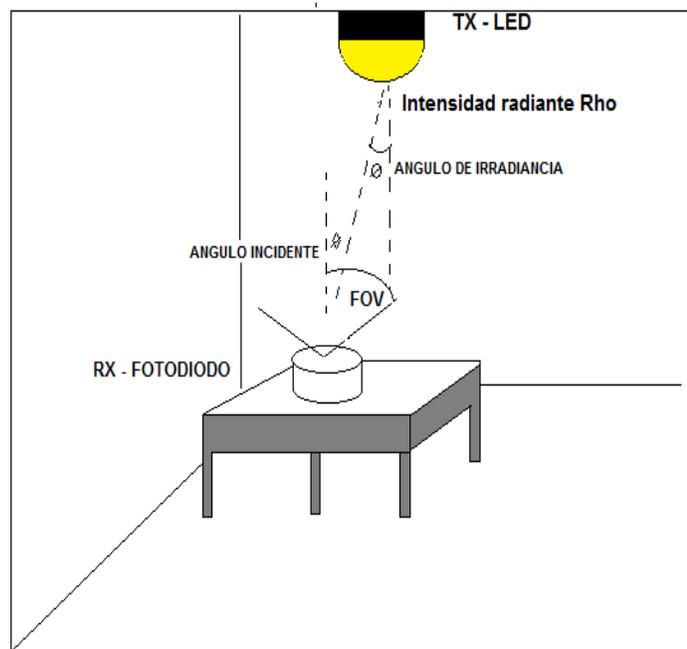


Figura 74. Representación gráfica del sistema de comunicación por luz visible SISO en modo Simplex para un ambiente indoor.

1. Al momento de llevar a cabo la simulación de la potencia percibida por el receptor se tuvo en cuenta una serie de parámetros de entradas, en primer lugar se utilizó una cantidad de *leds* de 64 , al mismo tiempo se especificó las dimensiones de la habitación: 4m*4m*3m; largo alto y ancho respectivamente, las dimensiones del transmisor:2m*2m*3 es decir en el centro del cuarto y las dimensiones del receptor: 2m*2m*1m.

A continuación se muestra la representación gráfica de los niveles de potencia (ver **figura 75**) en Wattios en el espacio cerrado, donde el color amarillo representa un mayor nivel el cual va descendiendo hasta llegar al color violeta donde se presenta ausencia de potencia, es decir los datos no serán emitidos a un receptor ubicado en esa posición, debido a la inexistencia de línea de vista con la ubicación del transmisor lumínico.

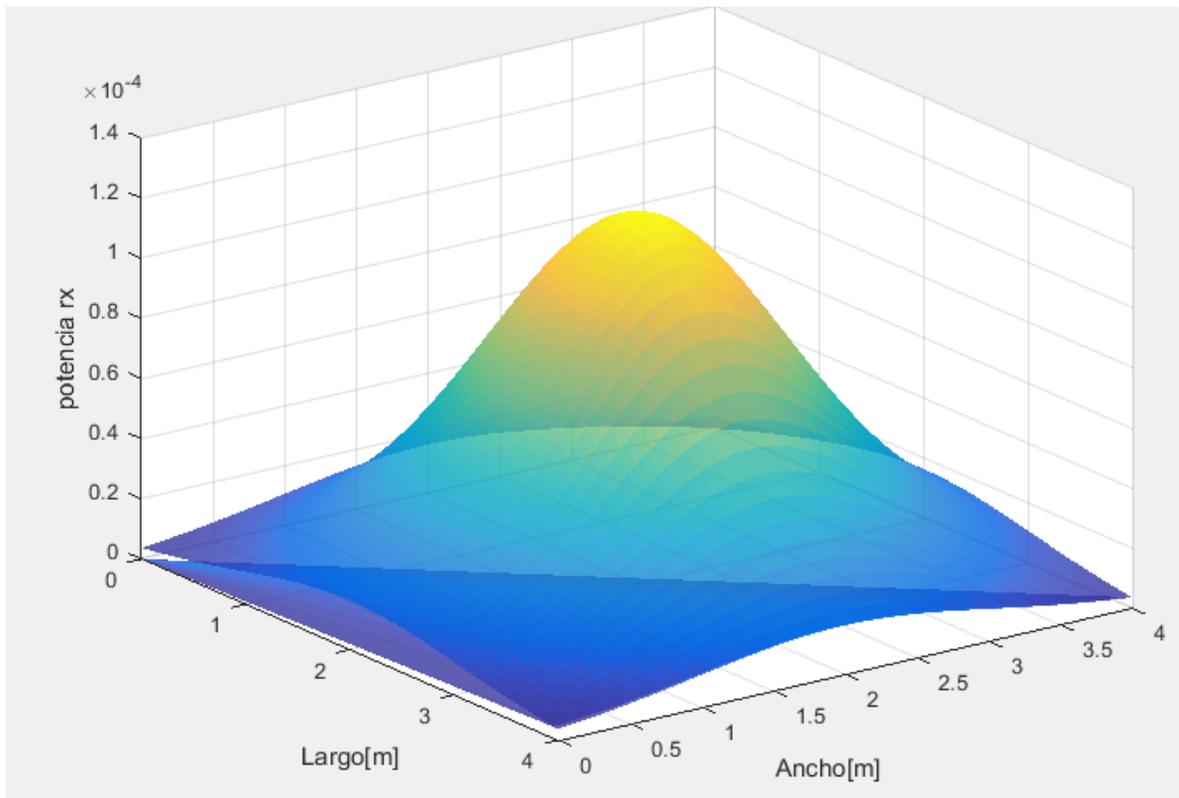


Figura 75. Distribución de la potencia receptora en el espacio cerrado.

2. Para la segunda simulación se utilizó un número de led de 10, las dimensiones de la habitación fueron: 4m*4m*3m; largo alto y ancho respectivamente, las dimensiones del transmisor: 1m*1m*3 es decir cerca a la pared del recinto y las dimensiones del receptor: 2m*2m*1m.

En esta simulación prácticamente se cambió la posición de la lámpara led y se disminuyó el número interno de los diodos emisores de luz en la figura se puede presenciar que entre más cerca el receptor este del trasmisor la señal es mejor, prácticamente a distancias superiores de 3 metros el nivel receptivo tiende a perderse.

En la **figura 76** se representa la potencia de la señal en el receptor cuando éste se encuentra a una distancia corta de la fuente óptica.

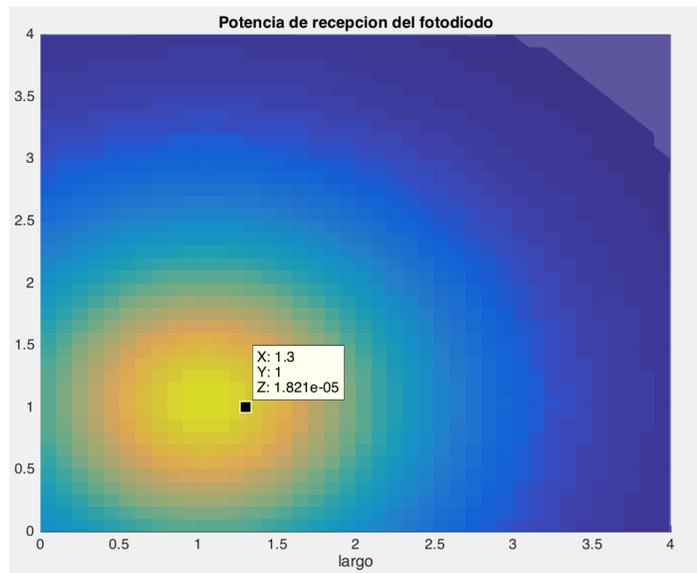


Figura 76. Nivel de potencia de 18microW a 1.3m de largo y 1 de ancho en el espacio.

Al momento que el receptor se desplace por el espacio cerrado el nivel de potencia disminuirá entre más lejos se esté de la fuente óptica “ver figura 77, 78”.

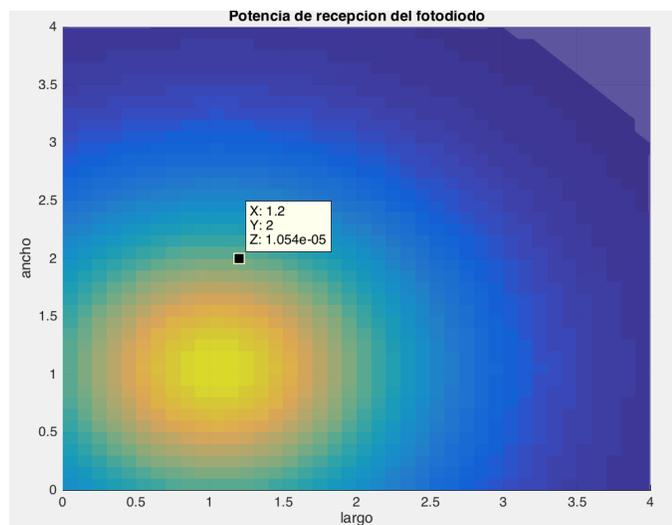


Figura 77. Nivel de potencia receptiva de 10.54microW a 1.2m de largo y 2m de ancho en la habitación.

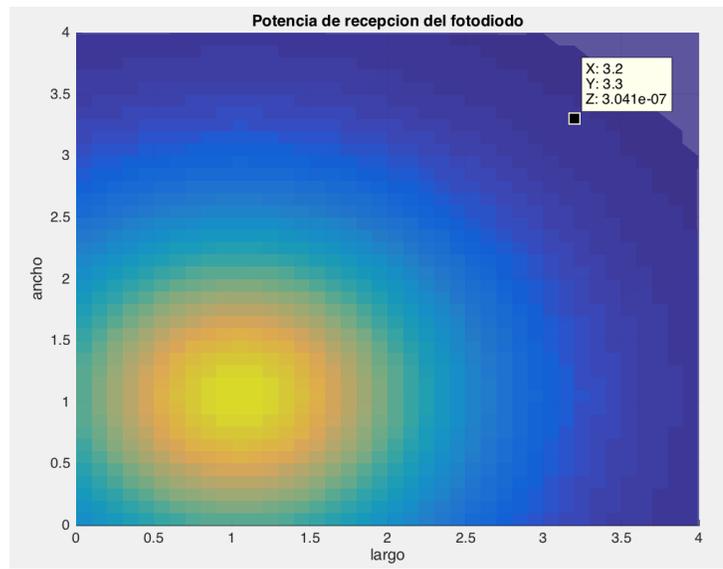


Figura 78. Nivel de potencia de 304 nW a una distancia de 3.2m de largo.

Para terminar este diseño se muestra la representación gráfica con el máximo nivel de potencia de recepción alcanzable por el sistema “ver figura 79”.

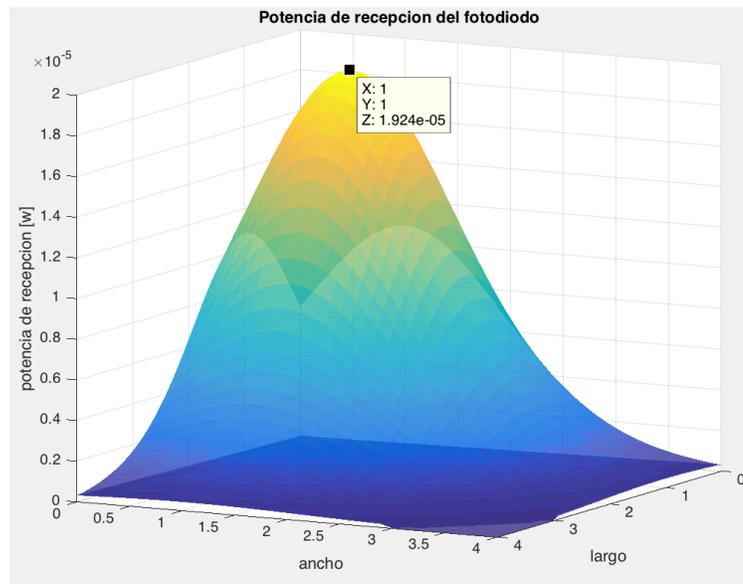


Figura 79. Nivel de potencia máximo del sistema 19.24microW.

3. Para la tercera simulación se utilizó un numero de led de 64, las dimensiones de la habitación fueron: 4m*4m*3m; largo alto y ancho respectivamente, las

dimensiones del transmisor fueron: 1m*1m*3 es decir en el cerca a la pared cuarto y las dimensiones del receptor fueron: 2m*2m*1m.

En las siguientes representaciones se muestra que sucede con la potencia de la señal del receptor al desplazarse por el recinto. En la **figura 80** el receptor está cerca del transmisor lo que trae como consecuencia mayor nivel de señal.

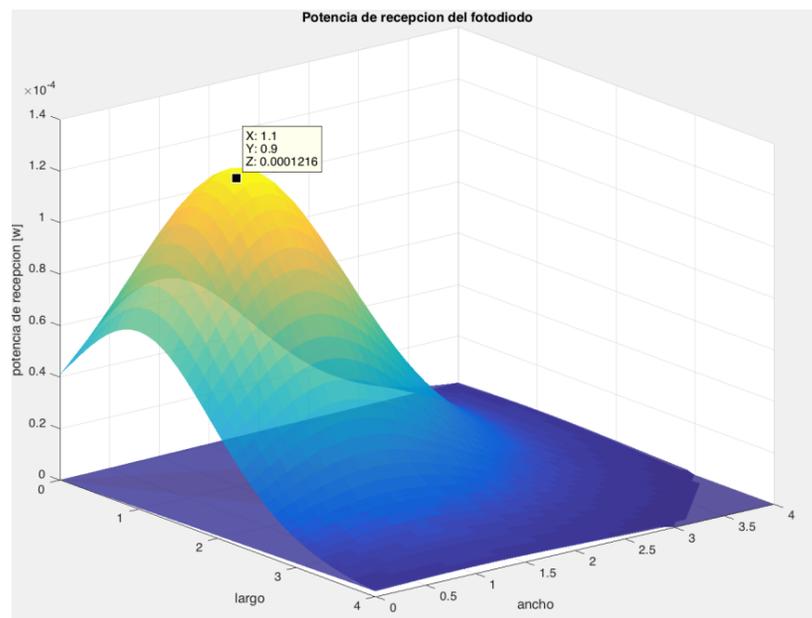


Figura 80. Potencia de recepción del fotodiodo de 121.5 microW a una distancia de 1.1m de largo en el espacio cerrado

El nivel de señal tiende a disminuir a partir del alejamiento del usuario de la fuente lumínica “ver **figura 81**”.

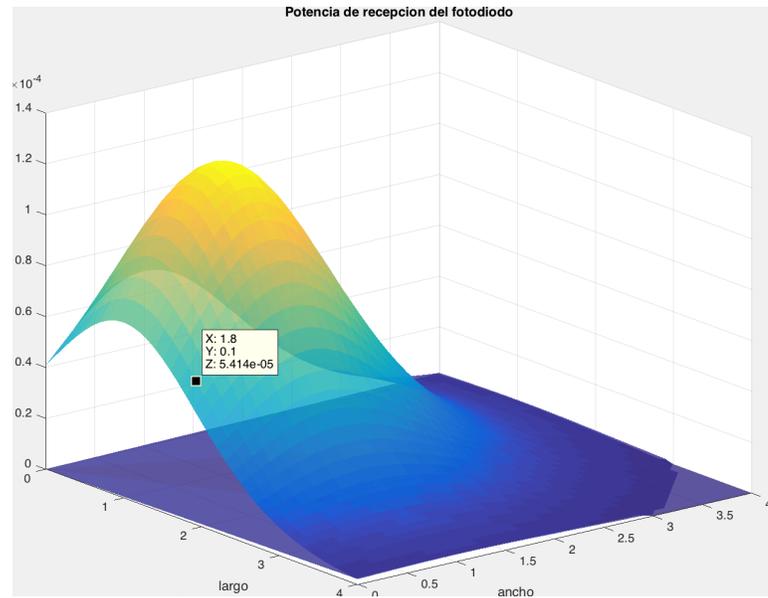


Figura 81. Potencia de recepción del fotodiodo de 54.14 microW a una distancia de 1.8 m de largo en el espacio cerrado.

Cuando el campo de visión del receptor, se encuentra por fuera del rango de vista del transmisor la potencia de la señal se pierde “ver figura 82”.

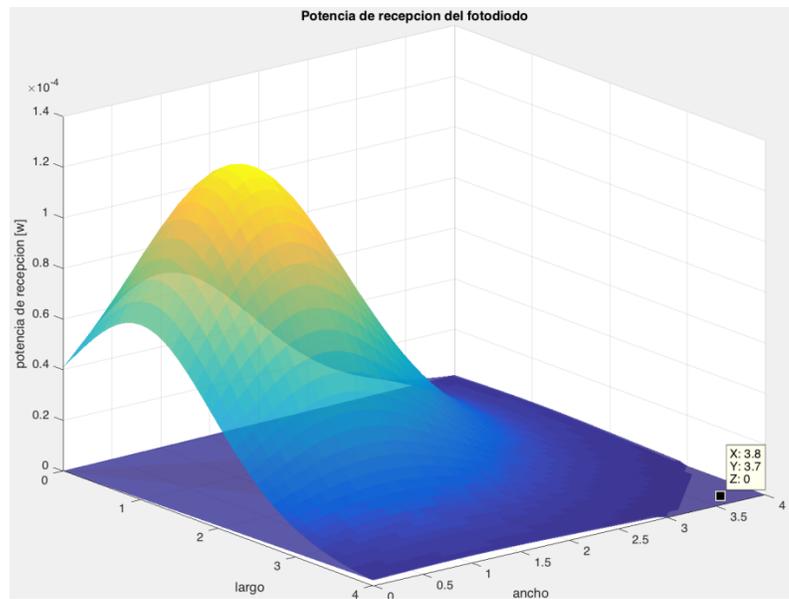


Figura 82. Potencia de recepción del fotodiodo de 0 W a una distancia de 3.8m de largo en el espacio cerrado.

4. Simulación del Modelo de Propagación Determinístico Ray Tracing

Este modelo de propagación de rayos ópticos que se encarga de detectar la potencia recibida por un dispositivo receptor a partir de los rayos reflejados por los diferentes parámetros como paredes, suelo, techo, etc. Es por esto que en la siguiente simulación se tendrán en cuenta algunos efectos de gran importancia en un ambiente interior, como lo es los múltiples trayectos de un rayo incidente a partir de las reflexiones del recurso, como se muestra en la **figura 83**, para llevar a cabo la simulación se mantendrán las mismas dimensiones del diseño 3, pero como se dijo anteriormente se mantendrá en consideración diferentes fenómenos como los coeficientes de reflexión del piso, techo y pared y la reflexión difusa sobre la superficie, para representar gráficamente la potencia difusa recibida y la potencia total recibida. De acuerdo a lo mencionado anteriormente se procede a modelar la reflexión difusa en el recinto a partir de la expresión matemáticamente siguiente:

$$I = rho * PrxLOS / Area habitación. [W/m^2]$$

Dónde:

rho es la reflectividad promedio del sistema la cual está compuesta por las áreas y reflectividades de la habitación

PrxLos es la potencia recibida sin pérdidas. Gracias a la obtención de la reflexión difusa se halla la primera reflexión óptica incidente en la superficie mediante la siguiente fórmula, la cual es representada en la **figura 83**:

$$I_{prime} = I / (1 - rho).$$

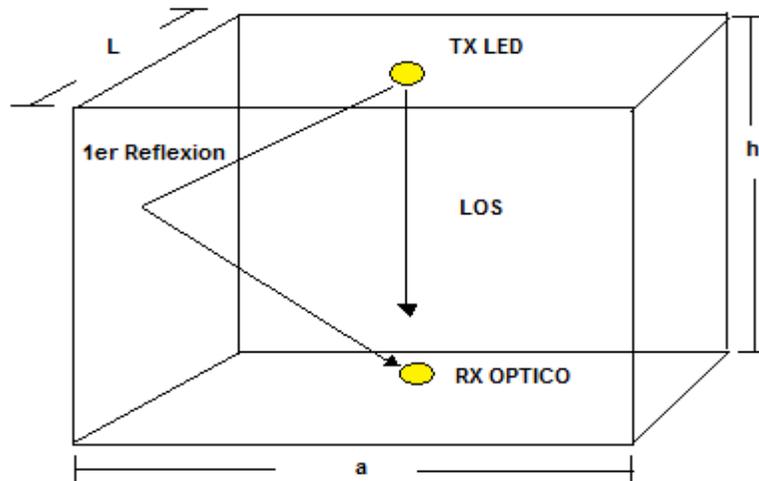


Figura 83. Trazado de rayos en el sistema de comunicación inalámbrica por luz visible *indoor*.

Teniendo en cuenta esta reflexión y el área activa del fotodiodo lo siguiente es calcular la potencia de difusión del sistema, es decir con las pérdidas provocadas por los fenómenos descritos anteriormente; mediante la expresión matemática que se presenta a continuación, para proceder a simular en MATLAB y obtener la representación gráfica “ver figura 84”.

$$P_{diff} = Area_{Rx} * I_{prime}$$

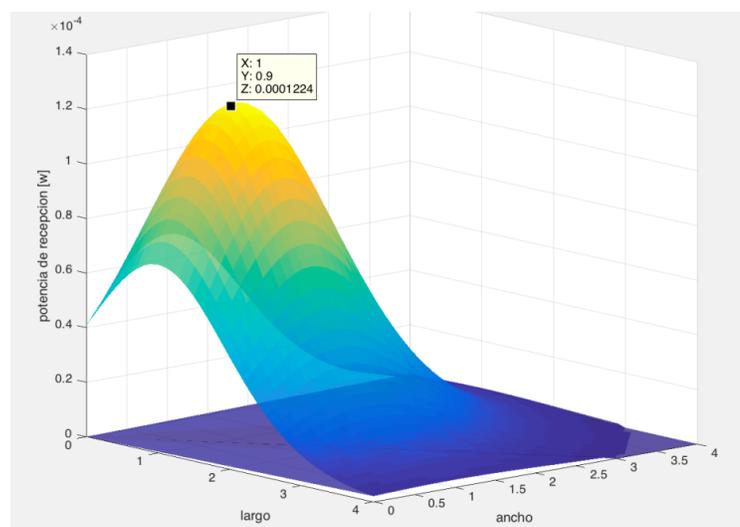


Figura 84. Máximo nivel de potencia de recepción difusa 122microW.

En la **figura 84** se puede observar la atenuación de la señal al verse afectada por los diferentes fenómenos presentes en el sistema, lo que ha provocado una disminución en su nivel de potencia. Cuando el receptor está ubicado a una distancia de aproximadamente 3 metros de lejanía de la fuente lumínica, su potencia tiende a disminuir “ver **figura 85**”.

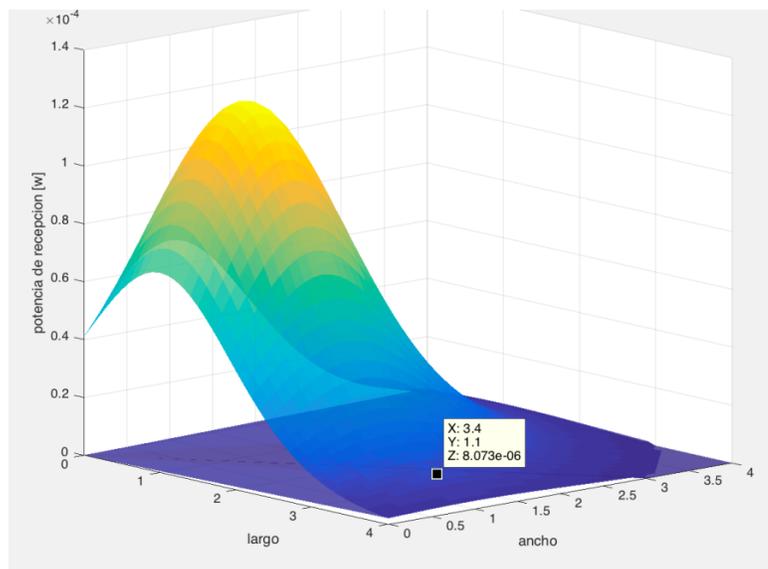


Figura 85. Nivel de potencia de recepción de 8.07 microW.

4.6 Diseño De La Interfaz De Usuario GUI

El siguiente paso fue crear una interfaz gráfica a través de la herramienta GUI de MATLAB donde un usuario remoto puede ingresar las dimensiones del recinto, el número de led que contiene la fuente luminosa y además puede escoger el tipo de diodo y fotodiodo con el que desea trabajar.

Los diodos led utilizados en la interfaz fueron previamente definidos a través de las características principales de su *datasheet* donde se tomó como referencia, la potencia de transmisión, el ángulo de vista, el radio y el flujo luminoso; de igual manera se hizo con el fotodiodo, donde se utilizó como herramientas de trabajo el

radio, el campo de vista y el área. A continuación en la **figura 86** se presenta la interfaz gráfica.

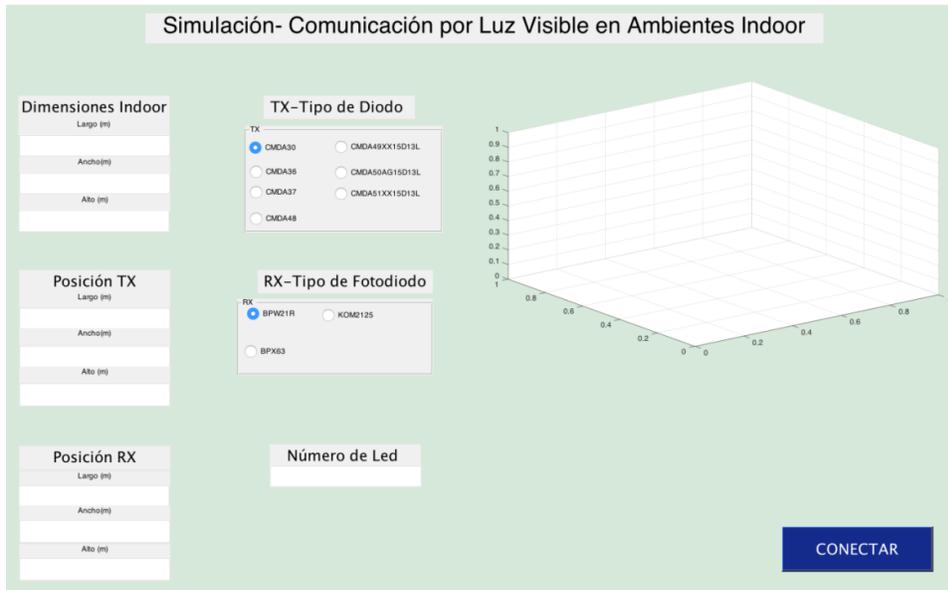


Figura 86. Interfaz de usuario

Seguidamente se rellenó los campos de la simulación, donde arrojó la gráfica de la potencia de recepción, “ver **figura 87**”.

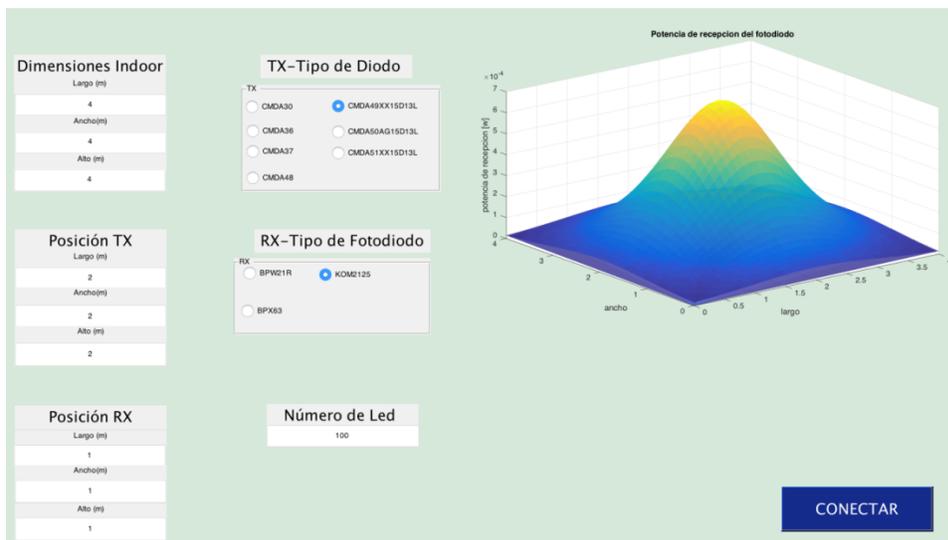


Figura 87. Interfaz grafica funcionando correctamente.

4.7 Diseño de la etapa de luminosidad

Al igual que la simulación anterior se ingresan las dimensiones del recinto y se crea una matriz que recorra las diferentes dimensiones, las ecuaciones de intensidad de radiación y orden Lambertiano son indispensables en la representación gráfica, adicionalmente se modela el nivel de intensidad luminosa en la habitación es decir la cantidad de flujo luminoso propagado por el transmisor y que es percibido por el receptor, para ello se hace uso del **Teorema de Malus** que especifica el comportamiento de la intensidad de la luz polarizada mediante la siguiente expresión:

$$I = (i_o * \cos(\phi))^m \text{ [cd]}$$

Dónde: i_o es la intensidad central del transmisor y ϕ es el ángulo de irradiación, seguidamente se modela la luminancia o densidad angular del flujo luminoso en la superficie, para esto se hace uso del modelo matemático

$$\text{Luminosidad} = I * \cos(\psi) / d^2 \text{ [cd/m}^2\text{]}$$

Al momento de simular estos parámetros en el primer diseño se ingresó una intensidad luminosa central de 50 cd, que dio como resultado la representación de luminosidad vista en la **figura 88**.

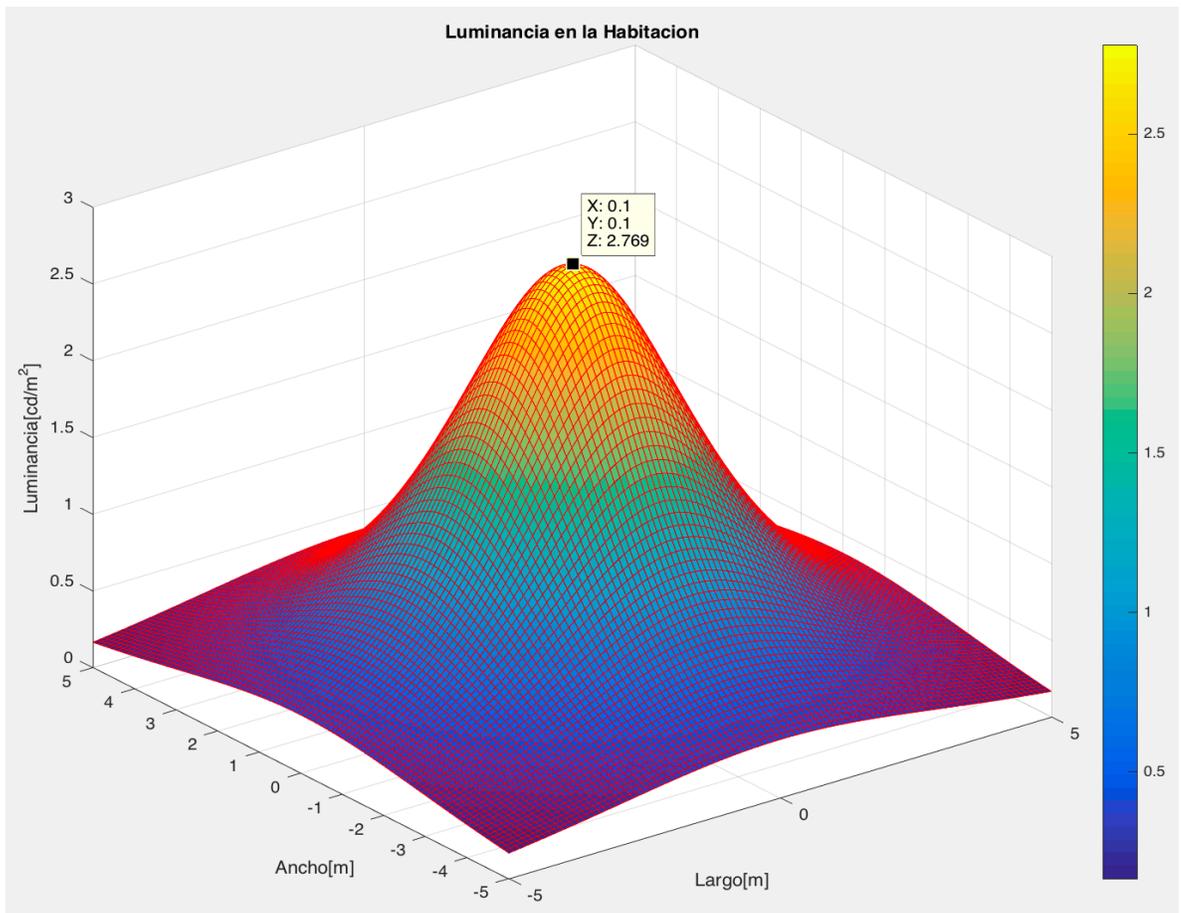


Figura 88. Luminosidad en un punto cercano del transmisor 2.769 cd/m^2 .

Debido a que el punto de luminosidad medido en la figura se encuentra en la posición del transmisor, su nivel de luminosidad es mayor, pero si se aleja el receptor su luminosidad disminuye “ver **figura 89**”.

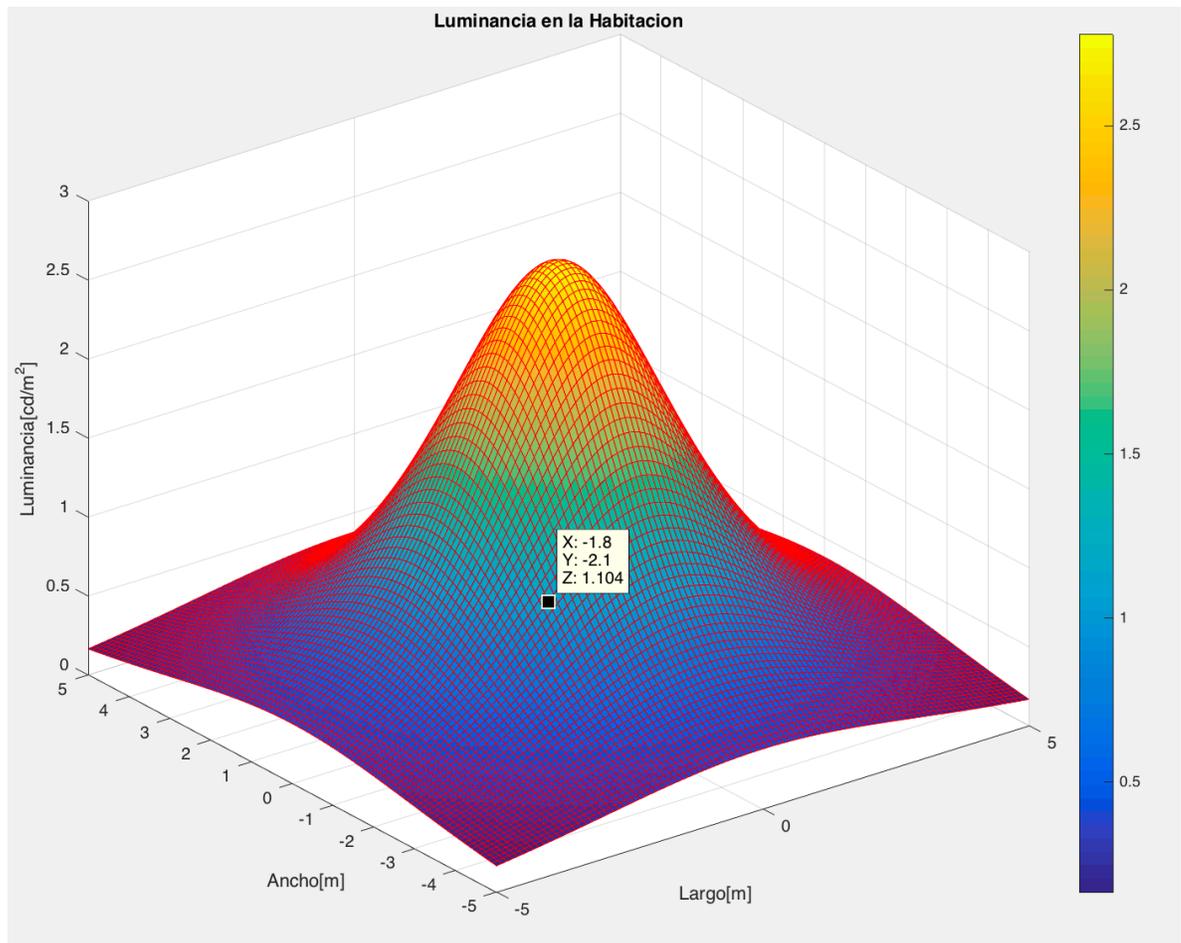


Figura 89. Luminosidad en un punto lejano del transmisor 1.104 cd/m^2 .

En la siguiente simulación la intensidad luminosa central del transmisor se aumenta a 100 cd , lo que trae como consecuencia una mayor densidad de luminosa en la habitación, en el rango de las 5 cd que es lo recomendable en las habitaciones, ver **figura 90**.

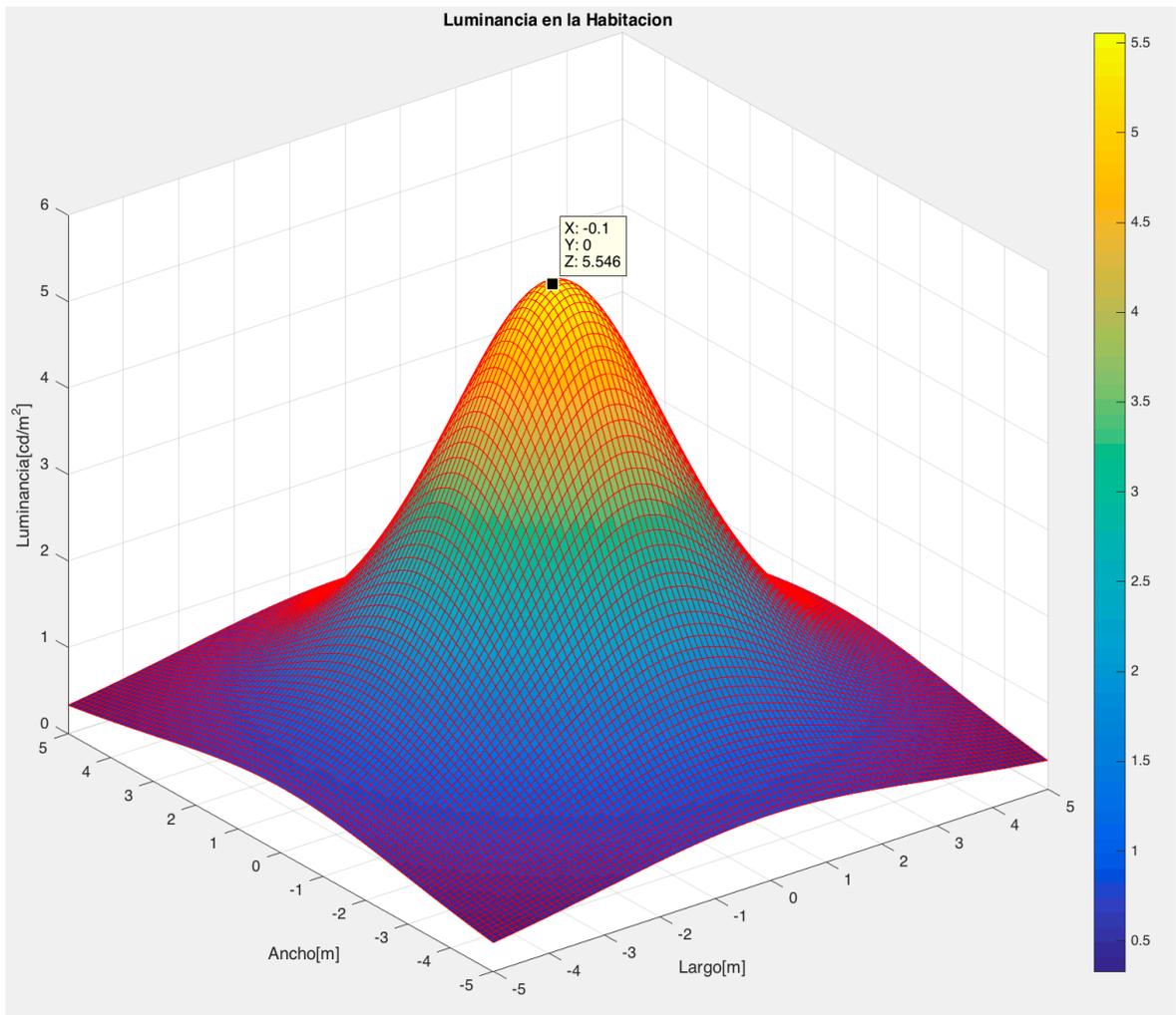


Figura 90. Nivel máximo de luminancia en la habitación 5.546 cd/m^2 .

Por último se ubica el receptor en una posición lejana al receptor y se obtiene la siguiente representación, “ver figura 91”.

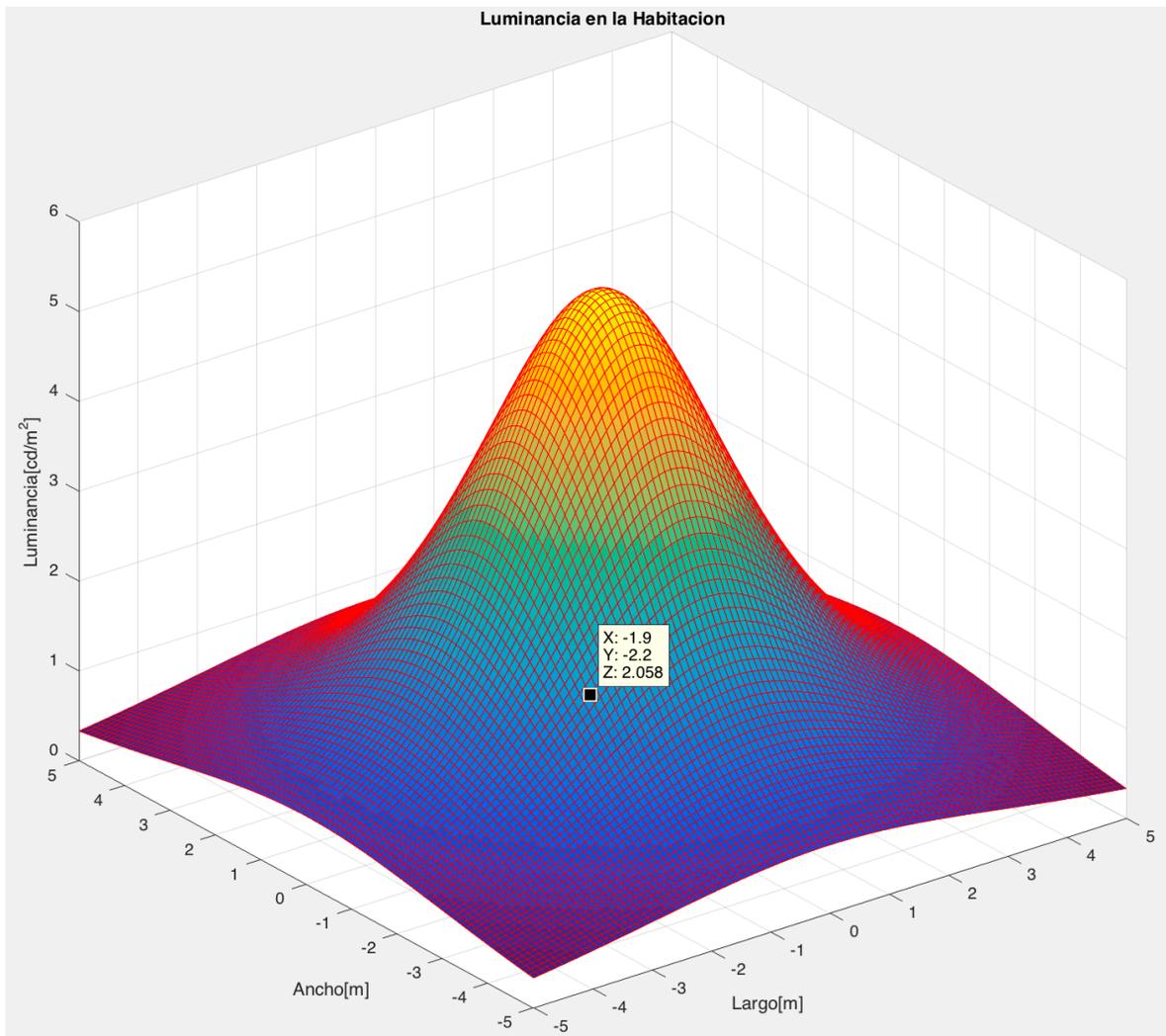


Figura 91. Nivel de luminosidad en un punto lejano al transmisor con una luminosidad de 5.36 cd/m².

4.8 Diseño de la etapa SNR (relación señal a ruido)

Teniendo en cuenta los parámetros utilizados anteriormente para encontrar la potencia difusa del sistema, se parte a la obtención de la relación señal a ruido, es decir la cantidad de potencia que se transmite con relación a la que se pierde por el ruido. Para llevar a cabo la simulación de este proceso se tienen en cuenta las siguientes formulas matemáticas:

Las variaciones por el ruido de disparo el cual es creado por las fluctuaciones de los fotones en el espacio

Ruido de disparo= $2 \cdot \text{Carga electrón} \cdot \text{Responsividad} \cdot (\text{Potencia total Rx} + \text{Ruido ambiental}) \cdot \text{Ancho de banda ruido}$

El ruido provocado por el amplificador de la señal.

Ruido amplificado = $\text{Corriente amplificada}^2 \cdot \text{Ancho de banda del amplificador}$

Al sumar los dos ruidos descritos anteriormente se produce un ruido total:

Ruido Total = Ruido de disparo + Ruido amplificado.

Teniendo en cuenta estas señales no deseadas en el sistema se calcula la relación señal a ruido mediante la expresión:

SNR = $(\text{Responsividad} \cdot \text{Potencia total Rx})^2 / (\text{Ruido Total I})$;

Disponiendo de la relación señal a ruido, lo siguiente es convertirla en su forma en decibeles para luego pasar a simular su comportamiento “ver **figura 92**”.

$$SNR_{dB} = 20 * \log (SNR).$$

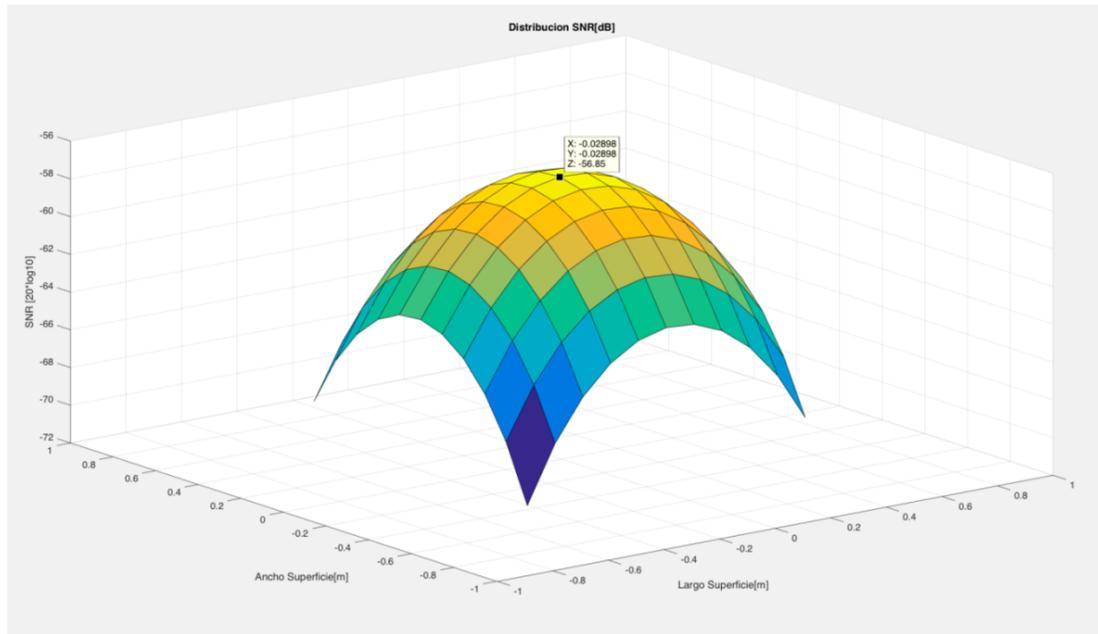


Figura 92. Señal de salida con un SNR óptimo de -56.85dB.

Al momento de que el usuario se encuentre en una posición lejana al punto del transmisor su SNR disminuirá “ver figuras 93, 94”.

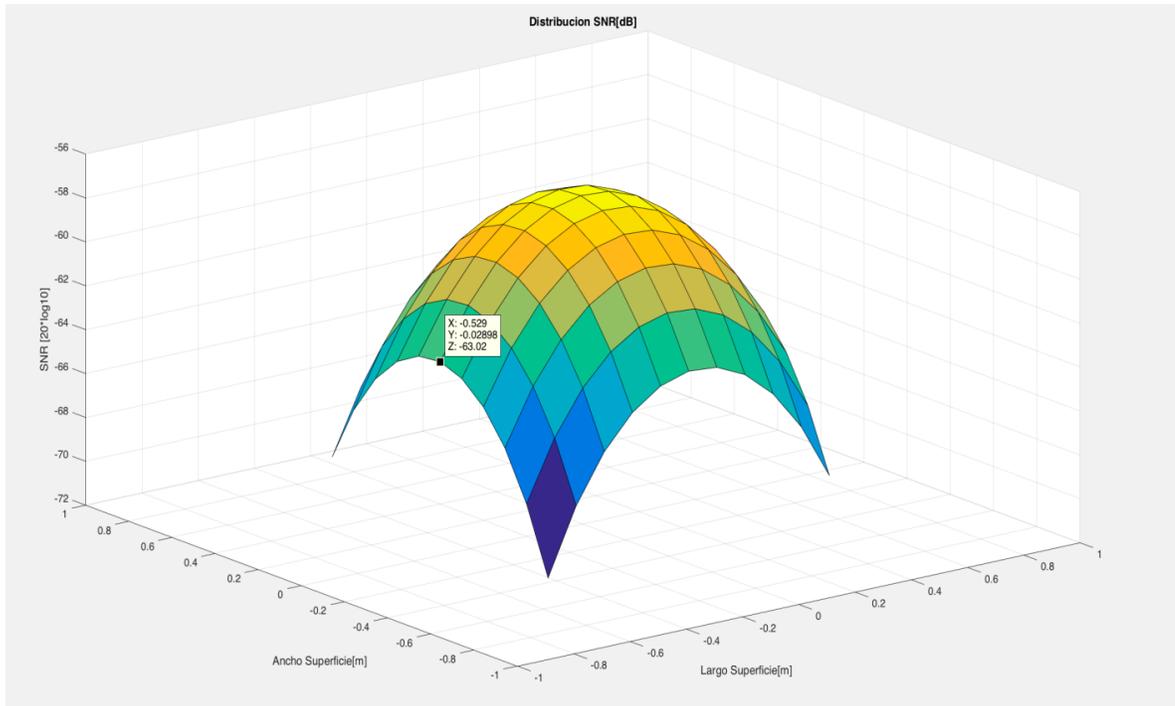


Figura 93. Señal de salida en un punto lejano del transmisor óptico con un SNR de -63 dB.

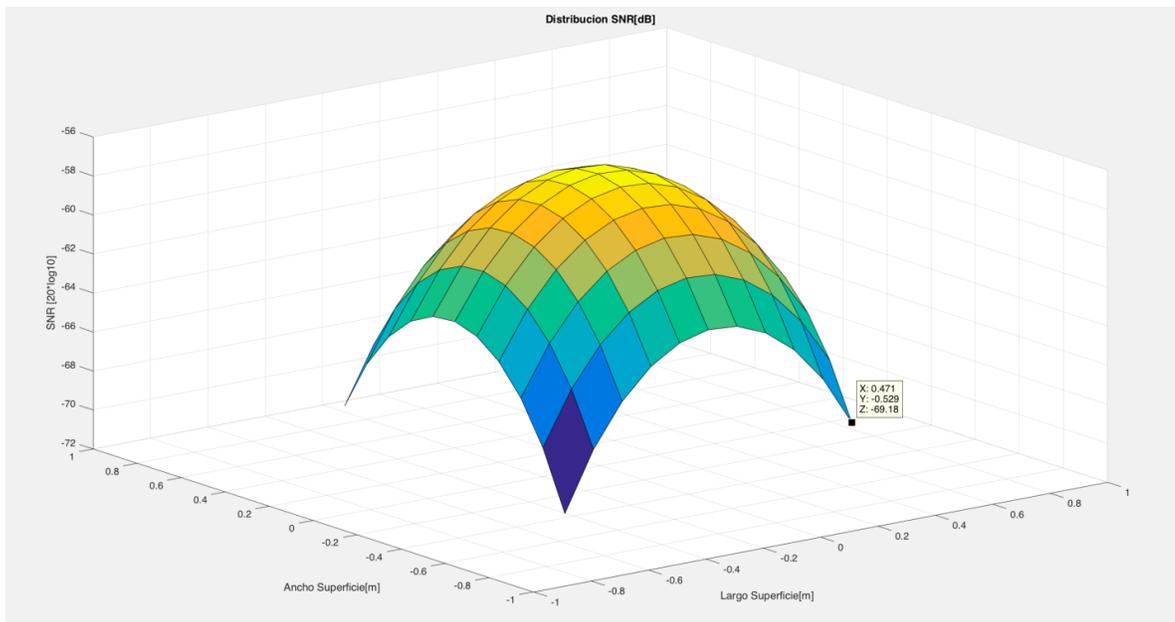


Figura 94. Señal de salida en un punto lejano del transmisor óptico con un SNR de -69 dB.

Capítulo 5

ANÁLISIS ECONÓMICO

El gasto de este proyecto recae básicamente en los abastos de los siguientes elementos y servicios mostrados en la **tabla 6**.

Descripción	Cantidad	Costo
Computador Portátil Lenovo G485	1	\$800.000
Papelería	1	\$150.000
Servicio de Internet (meses)	6	\$100.000
Vivienda (meses)	6	\$1.800.000
Transporte	3	\$60.000
Alimentación (meses)	5	\$800.000
	Total	\$3'710.000

Tabla 6. Presupuesto gastado aproximadamente en la elaboración del proyecto.

Teniendo en cuenta la **tabla 6** los gastos pertenecientes los gastos correspondientes a los activos utilizados, fueron provistos por mi familia y por el autor.

Capítulo 6

Marco Legal

Teniendo en cuenta el ambiente de trabajo en interiores, existe una reglamentación de los niveles de iluminación recomendables para brindar un funcionamiento seguro en la visión humana, el cual es indispensable al momento de realizar una infraestructura lumínica en un recurso, donde dichos niveles están relacionados con el trabajo a realizar en estos. A continuación se presenta una tabla con las normas de iluminación en ambientes *indoor*.

Aplicaciones	Iluminancia (lux)
Pasillos	50-150
Aulas y laboratorios	300 – 500
Oficinas	450- 750
Comercio tradicional	300- 750
Centros comerciales	500-1000
Labores con necesidades visuales especiales	1000-2000
Dormitorios y cocinas	100-200
Cuartos de estudio	300-750

Tabla 7. Niveles de iluminación en ambientes cerrados. (Pattini, (2000))

INFLUENCIA AMBIENTAL DEL TRABAJO

Al momento de trabajar con la luz como fuente de emisión en un sistema de comunicación inalámbrico, se debe atender a los efectos del parpadeo es decir, las fluctuaciones luminosas presente en los dispositivos emisores de luz, los cuales afectan a los observadores y que comúnmente son contrarrestados en las modulaciones tradicionales por intensidad, con niveles de frecuencias relativamente altos que conllevan a mayor procesamiento en los equipos transmisores y receptores. La influencia ambiental de este trabajo radica en la polarización de la luz, una técnica que disminuye los rangos de frecuencias de trabajo en la neutralización del *flicker* o impresión fisiológica causante de alteraciones en el sistema nervioso central; ya que separa las superposiciones de ondas que están presentes en la radiación lumínica. Con el uso de este método en un sistema inalámbrico se reduce la carga computacional en los equipos del sistema y al mismo tiempo se aprovecha el canal de iluminación para comunicar un dato evitando así la implementación de nuevos dispositivos que consuman energía.

Capítulo 8

Resultados

Se Presentó el diseño y simulación de un sistema de comunicación por luz visible para ambientes *indoor* con la estructura y bloques que lo constituyen, mediante la herramienta de software matemático MATLAB:

8.1. Etapa Transmisora

Se llevó a cabo el diseño de la fase de transmisión para luego ser simulado haciendo uso del entorno de diagramas en bloques de MATLAB Simulink, donde se simuló un haz de luz con múltiples orientaciones emitido por una fuente lumínica, el cual recorrió en el tiempo un espacio cerrado, posteriormente se creó la etapa del polarizador vertical y horizontal mediante la filtración de matrices, teniendo en cuenta dichas polarizaciones se realizó la etapa de creación del mensaje a través de un bloque generador de estados binarios y posteriormente mediante la inserción de una imagen, la cual se codificó mediante los métodos NRZ, RZ, Manchester Diferencial, para luego ser modulado en OOK y PPM e introducido en la portadora, es decir la polarización de la luz; para luego ser emitido por la fuente.

8.2. Valoración de las técnicas de modulación

Al momento del diseño y simulación de los moduladores OOK y PPM seleccionados previamente no se presentó problemas considerables en el envío del mensaje (estados binarios generados por el bloque Bernoulli e imagen insertada por el usuario), ya que las gráficas de las señales salientes del sistema enviaron los paquetes. Sin embargo la modulación por posición de pulsos PPM, sufrió desincronización en la señal con mayor consideración cuando se enviaban

los *bits* ya que el tiempo en el que se representaban los estados binarios era brusco.

El modulador OOK codificado con RZ al igual que el Manchester Diferencial no manifestó grandes problemas en la sincronización de la señal, No obstante cualquier técnica es recomendable para trabajar, sin embargo el autor recomienda el modulador OOK por codificación Manchester Diferencial ya que garantiza un mejor rendimiento de la señal debido a la auto sincronización que contempla a tramas largas de bits semejantes cuando sea llevado a la implementación, las transiciones suaves que presentó, como también una cantidad de tasa de bits considerable y un menor procesamiento.

8.3. Valoración de la Etapa Receptora

En el lado receptor se diseñó la etapa de detección de los estados binarios a través de un interruptor que funcionaba a partir de las comparaciones condicionadas en el bloque de salida, esto para el diseño con el generador de estados binarios Bernoulli, en el caso dos en el que se insertó una imagen por el usuario, se pudo contemplar la concatenación de los niveles de colores RGB en la imagen final, la cual al mezclar los 3 niveles representó la imagen insertada, dando como resultado el correcto funcionamiento del sistema de simulación creado en Simulink.

8.4. Etapa de Dispersión

Se planteó teóricamente una forma de abordar el problema de posicionamiento del equipo receptor, ya que a diferentes ángulos de visión la luz blanca va a tender a verse oscura, es por esto que debe incorporar una etapa dispersora ubicada del lado del transmisor, que se encargara de separar la luz blanca polarizada en múltiples longitudes de onda y frecuencias, es decir diferentes colores, que serán

detectados por el equipo receptor mediante una base de datos de ángulos y colores que evaluara si el estado es cero o uno.

8.5. Valoración de la Etapa de Modelaje

Se representó gráficamente a partir del modelo de propagación determinístico Ray Tracing, el comportamiento de la señal emitida por una fuente lumínica trabajando a una potencia de transmisión dada, donde se insertaron las dimensiones de la habitación, las dimensiones donde se ubica la lámpara led y la posición principal del usuario receptor; a la hora de la simulación se pudo notar que a medida que se aumentan los diodos led en la fuente, la potencia de recepción y la luminosidad en cualquier posición de la habitación se ve incrementada, a partir de que el usuario se aleja del campo de visión de la fuente se presentan alteraciones por las interferencias del medio y reducción de cobertura, para mejorar este problema se debe trabajar con fotodiodos que tengan una mayor responsividad y campo de visión, del mismo modo otra solución a los inconvenientes de atenuación es instalar diferentes arreglos en posiciones estratégicas para evitar pérdidas de señal como también, segmentar en celdas la red para otorgar movilidad al usuario cuando cambia de posición, conmutando de celda lumínica, como también ubicar la fuente transmisora en el centro posterior del recurso a una altura considerable para llegar a los dispositivos receptores.

Finalmente se mostró el diseño de una interfaz gráfica creada en MATLAB mediante la herramienta Simulink donde el usuario ingresa los datos dimensionales de los parámetros de entrada y obtiene el nivel de potencia recibida en la posición determinad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES.....	106
9.2. RECOMENDACIONES.....	107

9.1. CONCLUSIONES

Tomando como punto de partida el crecimiento de las redes móviles y las redes de Internet en los últimos años, se dispuso mediante este trabajo plantear una serie de diseños enfocados en comunicaciones opto-inalámbricas que respalden las comunicaciones tradicionales por radiofrecuencias. A partir de la búsqueda de soluciones a este inconveniente presente en la actualidad, se realizó satisfactoriamente mediante la simulación en MATLAB, las etapas de transmisión y recepción del sistema inalámbrico por luz visible VLC, haciendo uso de las técnicas de modulación OOK y PPM en la polarización de la luz, una técnica innovadora que tiene como propósito disminuir la carga computacional en los equipos receptores y evitar trabajar con alta responsividad, para permitir la incorporación de dispositivos que pertenezcan al internet de las cosas.

A la hora de diseñar la etapa de transmisión, primeramente se simuló la luz mediante la herramienta Simulink, el contratiempo que se presentó tuvo que ver con la superposición de las diferentes orientaciones, la cual fue abordada satisfactoriamente mediante la conservación de las representaciones graficas de las señales y las sentencias en bucles, que a partir de la exclusión de matrices se

logró filtrar en las polarizaciones horizontal y vertical, para actuar como onda portadora.

Los diseños simulados con las diferentes modulaciones cumplieron con el propósito decretado, el cual fue emitir una señal de un punto a otro a partir de la inserción de un bloque generador de estados binarios aleatorios y seguidamente a través de una imagen ingresada por el usuario, mediante la polarización de la luz visible, los principales inconvenientes presentes en el sistema tuvieron que ver con la sincronía de la señal en el modulador por posición de pulsos PPM, que a medida que se aumentaba el tiempo de muestreo su procesamiento tendió a tardar demasiado y las representaciones de los símbolos eran visualizados a tiempos esporádicos, un problema que puede ser solucionado en la implementación mediante el proceso de retroalimentación de la señal. Asimismo se estableció las técnicas de codificación RZ, NRZ y Manchester Diferencial para una modulación OOK, con la intención de realizar el proceso de conversión de la señal digital en tramas alteradas, La selección del modulador de trabajo se basó en reconocer el más óptimo tanto en simulación como a la hora de implementarlo, es por esto que en términos de sincronía, alta tasa de bits y menor procesamiento, el modulador OOK Manchester diferencial fue el seleccionado como el más óptimo al obtener una velocidad de transmisión de 0.26519 Kbps en un tiempo de procesamiento de aproximadamente 7 minutos, sin subestimar el diseño con la modulación PPM RZ que alcanzó una velocidad de 0.259714 Kbps a un mismo tiempo de procesamiento en Simulink.

En la etapa final de la simulación del diseño, del sistema de comunicación inalámbrico por luz visible se creó la fase de demodulación la cual es la misma para todos los sistemas y se encargó de detectar a través de un comparador y de condiciones de código en MATLAB la visualización de la señal del lado del receptor. No obstante si se quiere que el mensaje llegue al destino sin ningún tipo

de alteración por efectos del posicionamiento de los ángulos de visión del receptor se planteó un método de corrección de errores determinado por la dispersión del color, una etapa que se adiciona al polarizador del transmisor, y que se encarga de actuar como un prisma que descompone la luz de color blanca en los múltiples colores que la unifican y con el uso de una base de datos en el detector se estiman los rangos de colores que equivalen a los estados binarios.

Seguidamente se tuvo en cuenta el comportamiento de la señal que recibe el equipo receptor gracias a la simulación de modelos determinísticos que posibilitaron la visualización de los niveles de energía, luminosidad y relación señal a ruido presentes en un ambientes *indoor*, donde se pudo observar que a medida se aumenta el número de *leds* en el transmisor la señal abarca mayor cobertura en el espacio y que si el receptor se encuentra en los límites del campo de visión lumínico, la señal tiende a atenuarse, una posible solución a este problema es instalar el transmisor lumínico en el centro del recinto, en la parte más alta para repartir uniformemente la señal, como también la instalación en posiciones estratégicas arreglos de iluminación que permitan cubrir todos los espacios del recinto o implementar un sistema MIMO que cubra múltiples caminos y permitan una mejor recepción de la señal. Finalmente este diseño se llevó a una interfaz gráfica encargada de interactuar con usuario remoto que ingresa por teclado el número de led de la fuente lumínica y las dimensiones de un recinto de su interés, para dar como resultado la potencia de recepción del dispositivo a cualquier posición dentro de la habitación.

9.2. RECOMENDACIONES

Las sugerencias que el autor recomienda a posibles nuevos trabajos y que no pudo contemplar por motivos de que es una tecnología prácticamente nueva y debía organizar y estructurar la información, es aplicar entradas de audio y videos, como también modulaciones más complejas que permitan aprovechar el canal de transmisión, de igual manera sugiere aplicar otras etapas en los bloques de simulación, es decir para adicionar nuevos subsistemas de codificación que permitan mejorar la conversión de la señal y la sincronía; sumado a esto se aconseja adicionar señales no deseadas para simular el ruido y finalmente tener en cuenta muchas más alteraciones del medio.

9.3. BIBLIOGRAFIA

- ANDREU, Joaquin. 2011.** *Redes locales de datos (Redes locales)*. . s.l. : Editex, 2011.
- ANGUIS, Jose. 2008.** . *Redes de Area Local Inalambricas: Diseno de la WLAN de Wheelers Lane Technology College. Tesis Doctoral. Tesis para optar al grado de ingeniero.* . Universidad de Sevilla Espana. : Escuela Superior de Ingeniero., 2008.
- ATELIN, Philippe y DORDOIGNE, Jose. 2006.** *Redes informaticas: conceptos fundamentales: normas, arquitectura, modelo OSI, TCP/IP, Ethernet, Wi-Fi.* s.l. : Ediciones ENI, 2006.
- BARR, Michael. 2001.** *Pulse width modulation. Embedded Systems Programming.* 2001. pags. 103-104. Vol. 14.
- Boucouvalas, 2005.** "Challenges in Optical Wireless Communications"; Optics & Photonics News, vol. 16, iss. 9, pp. 36 - 39,
- BRITANNICA Encyclopadia. 2013.** *Radio-frequency spectrum.* s.l : Encyclopadia Britannica Inc, 2013.
- CHEZA, Guachamin, PATRICIO, Vicente y NARANJO ANDRADE, Edison Geovanny. 2011.** *Analisis y Estudio de la Calidad de Energia Electrica en la planta industrial de Quito Imprenta Mariscal Tesis de Licenciatura.* . QUITO : s.n., 2011.
- CORDOBA, Maximiliano. 2003..** *Procesos de fabricacion de fibras opticas. Tesis Doctoral Facultad de Ingenieria y Tecnologia Informatica Ingenieria Industrial.* Universidad de Belgrano : s.n., 2003.
- CORREA, Cristian, et al. 2005.** *Evaluacion de enlaces inalambricos urbanos usando protocolo IEEE 802.11 b.* *Revista Facultad de Ingenieria-Universidad de Tarapaca.* 2005. pags. 38-44.
- COSTA MUNOZ, David. 2010.** *Diseno de un sistema de iluminacion con tecnologia LED.* 2010.

- DEL RISCO SANCHEZ, Arnaldo.** *Diseño de un Modulador/Demodulador OOK con portadora y tasa de transmisión configurable para el estándar de baja frecuencia de dispositivos RFID. Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones.*
- ECHAZU, R. CADENA, C. SARAVIA, L. 2000.** *Estudio de materiales reflectivos para concentradores solares. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.* 2000. pag. 19. Vol. 4.
- FOROUZAN, Behrouz A. Behrouz A. 2007.** *Transmisión de datos y redes de comunicaciones.* s.l. : McGraw-Hill, 2007.
- GONZALEZ, Ricardo A. y AGUILAR, Clara M. 2011.** *Tecnología oled y moled. Visión Electrónica: algo más que un estado sólido.* 2011. pags. 34-48. Vol. 4.
- GUEVARA PENAGOS, Oscar Armando, et al. 2014.** *Alcances del desarrollo de la nueva tecnología LI-FI para las telecomunicaciones en Colombia. Tesis de Licenciatura.* 2014.
Noriega Editores, 2003.
- HEWITT, Paul G. 2002.** *Conceptual physics. Pearson Educación.* 2002. pag. 544.
- HOWELL, John R., MENGUC, M. Pinar y SIEGEL, Robert. 2010.** *Thermal radiation heat transfer. CRC press.* 2010.
- HUBEL, David H. 2000.** *Ojo, cerebro y visión.* s.l. : EDITUM, 2000.
- LIEW, S. C.** *Electromagnetic Waves. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing.*
- LOAIZA, ALEX FERNANDO HIDALGO.** *WIMAX INTEROPERABILIDAD MUNDIAL POR ACCESO INALÁMBRICO.*
- MANCEBO SANCHEZ, Elena María . 2013.** *Laboratorio de Óptica.* 2013.
- MAUCH, Reiner H. 1996.** *Electroluminescence in thin films. Applied surface science.* 1996. pags. 589-597. Vol. 92.
- MELNYCHUK, I. E., AVDEIEVA, D. A. y SHELKOVNIKOV, B. N. 2012.** *The reasons of deterioration of LTE signal. Comparison of bit error rate for different types of modulation. En Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo).*

2012.

MENDEZ, VARGAS y VICTOR, YEMPOL. 2016. *ANALISIS DE LAS VULNERABILIDADES DE LAS REDES INALAMBRICAS DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA LEONARDO DA VINCI.* 2016.

MOLINA, J. C. y BERMUDEZ, J. C. 2006. *Calibracion de responsividad absoluta de detectores fotometricos para la realizacion de la candela. En Simposio de Metrologia.* Mexico : Centro Nacional de Metrologia, 2006.

Ortega, Xavier y BISBAL, Jaume Jorba. 1996. *Las radiaciones ionizantes: su utilizacion y riesgos.* Univ. Politec. de Catalunya : (ed.) ARAMBURU, 1996.

QUINTERO RESTREPO, Julian Antonio. 2015. *Estudio sobre iluminacion natural en lugares con poco acceso de luz. Tesis de Licenciatura.* Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira : et al, 2015.

ROBERTS, Richard D., RAJAGOPAL, Sridhar y LIM, Sang-Kyu. 2011. *IEEE 802.15. 7 physical layer summary. En GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), IEEE,.* 2011. pags. 772-776.

ROCHA, Arturo Menchaca. 1988. *El discreto encanto de las particulas elementales.* s.l. : Fondo de Cultura Economica, 1988. et al..

ROMERO KANASHIRO, Walter R. 2013. . *Redes inalambricas y simulacion de WLAN mediante OPNET Tesis de Licenciatura..* s.l. : Universitat Oberta de Catalunya, 2013. .

RUFO TORRES, Julio Francisco. 2016.. *Contribucion al estudio de servicios soportados sobre redes VLC (Visible Light Communications).* 2016.

RUIDO, RELACION SENAL A. *Relacion de la potencia de una senal analogica con respecto al nivel de ruido. Se expresa en dB. RUIDO, RELACION SENAL A. Relacion de la potencia de una senal analogica con respecto al nivel de ruido.*

SAGOTRA, Rajan y AGGARWAL, Reena. 2013. *Visible light communication. International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT).* 2013. pags. 906-910. Vol. 4 .

SAINI, Harnit. 2012.. *Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology In Wireless*

communication. . 2012.

SALAZAR, DAVID GARCIA. *ANALISIS COMPARATIVO ENTRE ILUMINACION CONVENCIONAL E ILUMINACION LED UTILIZANDO EL METODO DE LOS LUMENES.*

SERWAY, Raymond A. y JEWETT, J. W. 2003. *.Physics for Scientists and Engineers.* Brooks/Cole : s.n., 2003.

SEVE, Robert. 2009. *Science de la couleur: Aspects physiques et perceptif.* s.l. : Chalagam ed, 2009. pags. 139-140.

VILAR, Ruth, RAMOS, Francisco y MARTI, Javier. 2006. *Tecnicas de deteccion de fallo y monitorizacion de la senal en tiempo real en redes opticas de conmutacion de paquetes.* Telecom I+ D. Madrid : s.n., 2006.

VILORIA, Jose Roldan. 2005. *Instalaciones electricas para la vivienda.* s.l. : Paraninfo, 2005.

WALDMAN, Gary. 2002. *Introduction to light: The physics of light, vision, and color.* s.l. : Courier Corporation, 2002. pag. 193.

WILLEBRAND, Heinz y GHUMAN, Baksheesh S. 2002. *Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks.* SAMS publishing, . 2002.

WILLIAMS, R. H., KEMENY, P. C. y LEY, L. 1976. *Spatial symmetries of valence band structures by angularly resolved X-ray photoelectron spectroscopy.* *Solid State Communications.* 1976. pags. 495-497. 6.

WYSZECKI, Gunter y STILES, Walter Stanley. 1982.. *Color science.* New York: Wiley : s.n., 1982.

ZELANSKI, Paul y FISHER, Mary Pat. 2001. *Color.* s.l. : Ediciones AKAL, 2001.
