



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS TÉCNICAS DE
MULTIPLEXACIÓN, MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN PARA LA
TECNOLOGÍA LI-FI.

AUTOR

Erick Alexander Albuja Beltrán

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS TÉCNICAS DE
MULTIPLEXACIÓN, MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN PARA LA
TECNOLOGÍA LI-FI.

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de
Ingeniero en Redes y Telecomunicaciones.

Profesor Guía:

MSc. Iván Ricardo Sánchez Salazar

Autor:

Erick Alexander Albuja Beltrán

AÑO:

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUIA

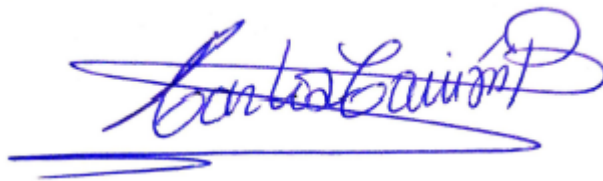
Declaro haber dirigido el trabajo, estudio del estado del arte de las técnicas de multiplexación, modulación y demodulación para la tecnología Li-Fi., a través de reuniones periódicas con el estudiante Erick Alexander Albuja Beltrán, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.



Iván Ricardo Sánchez Salazar
Magister en Calidad, Seguridad y Ambiente
C.I. 180345614-2

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

Declaro haber revisado este trabajo, estudio del estado del arte de las técnicas de multiplexación, modulación y demodulación para la tecnología Li-Fi., del estudiante Erick Alexander Albuja Beltrán en el semestre 202020, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación



Carlos Enrique Carrión Betancourt

Máster en Ciencias en Telecomunicaciones y Telemática

C. I. 110373807-4

DECLARACIÓN DE AUTORIA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.



Erick Alexander Albuja Beltrán

C. I. 171821442-0

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por darme unos padres espectaculares quienes permitieron que este sueño se haga realidad y finalizar una etapa importante en mi vida, sin ellos nada fuera posible.

Estoy agradecido con toda mi familia y amigos quienes fueron de fundamental apoyo en momentos difíciles para que no me diera por vencido y seguir hasta el final.

DEDICATORIA

Dedico todo mi esfuerzo a mis padres quienes fueron mi principal pilar, a Dios por bendecirme al tener la oportunidad de estudiar lo que me gusta, a mi futura familia y a todos los que me acompañaron durante todo este trayecto.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación está enfocado al análisis de la multiplexación, modulación y demodulación de la tecnología Li-Fi, para lo cual se ha abordado teóricamente la investigación.

Entender el tratamiento de los datos a través del canal es una parte fundamental de esta tecnología propuesta como alternativa a la tecnología Wi-Fi, su alcance y limitaciones comprenden una nueva necesidad de transmisión de datos inalámbricos a través del uso de la luz, la cual puede llegar a alcanzar mayores velocidades de transmisión que Wi-Fi.

Como primer paso se analizarán los conceptos básicos para entender la tecnología Li-Fi, los elementos que componen la red como sus distintas aplicaciones. Evaluar que esquema escoger para la multiplexación modulación, demodulación, como también tener en cuenta que parámetros interfieren en el canal, son los objetivos de este trabajo de titulación, para posteriormente servir como referencia en futuras implementaciones prácticas e investigaciones que sugieran una mejoría en los sistemas existentes.

Conocer la manera de cómo se envían los datos en la tecnología Li-Fi, es un paso fundamental para poder realizar implementaciones prácticas y de esa manera poder sacar provecho y ventajas frente a la tecnología actual que se utiliza en transmisiones inalámbricas como es Wi-Fi que presenta saturaciones del espectro electromagnético.

ABSTRACT

The present work is focused on the analysis of the multiplexing, modulation and demodulation of Li-Fi technology, for which the research has been theoretically addressed.

Understanding the treatment of data through the channel is a fundamental part of this technology proposed as an alternative to Wi-Fi technology, its scope and limitations affected a new need for wireless data transmission through the use of light, which it can reach higher transmission speeds than Wi-Fi.

As a first step, the basic concepts to understand Li-Fi technology, the elements that make up the network and its different applications will be analyzed. To evaluate which scheme selected for multiplexing, modulation, demodulation, as well as taking into account which parameters interfere in the channel, are the objectives of this titration work, to later serve as a reference in future practical implementations and investigations that suggest an improvement in the systems. concerns.

Learn how to send data in Li-Fi technology, it is a fundamental step to be able to carry out practical implementations and thus be able to take advantage and advantages compared to the current technology used in wireless transmissions such as Wi-Fi that it presents saturations of the electromagnetic spectrum.

ÍNDICE

1	CAPÍTULO I. Introducción.....	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Alcance.....	2
1.3	Justificación	3
1.4	Objetivos	3
1.4.1	Objetivo general.....	4
1.4.2	Objetivos específicos.....	4
2	CAPÍTULO II. Marco teórico.....	4
2.1	Introducción	4
2.2	Comunicaciones por luz visible (VLC).....	4
2.3	Tecnología Li-Fi.....	6
2.3.1	¿Qué significa Li-Fi?.....	6
2.3.2	Funcionamiento de Li-Fi	7
2.3.3	Estándar 802.15.7	8
2.3.4	Modulaciones incorporadas en el estándar IEEE 802.15.7	11
2.3.5	Demodulación.....	12
2.3.6	Multiplexación	13
2.3.7	Elementos que componen una red Li-Fi	14

2.3.8	Li-Fi en internet de las cosas (<i>IoT</i>)	22
2.3.9	Aplicaciones en Li-Fi.....	24
2.4	Expansión de la tecnología Li-Fi	26
2.5	Comparación de la tecnología Li-Fi con Wi-Fi.....	26
3	CAPITULO III. Canal de transmisión	28
3.1	Descripción del canal óptico.....	28
3.2	Configuración de parámetros para establecer el canal	29
3.2.1	Fuentes Ópticas.....	30
3.2.2	Detector Óptico.....	32
3.2.3	Filtros Ópticos.....	33
3.3	Dispersión del Canal	35
3.3.1	Canal de dispersión UV NLOS	36
3.3.2	Superficies Reflectoras.....	36
3.4	Ruido del Canal.....	40
3.5	Fuentes de interferencia.....	41
3.6	Impacto de la interferencia en el BER.....	43
3.7	Tipos de canal	43
3.7.1	Canal de Poisson en tiempo discreto	44
3.7.2	Canal de intensidad óptica de espacio libre	46

3.7.3	Canal de intensidad óptica con ruido Gaussiano dependiente de la entrada.....	48
4	CAPÍTULO IV. Modulación y demodulación para Li-Fi.	49
4.1	Modulación OOK.....	49
4.1.1	OOK-OCDMA.....	52
4.2	Modulación PPM.....	53
4.2.1	Modulación VPPM.....	55
4.2.2	M-ary PPM OCDMA.....	57
4.3	Modulación CSK.....	58
4.4	Modulación QAM.....	60
4.5	Modulación espacial (SM-OFDM).....	64
4.6	(O-SM-OFDM) Modulación espacial óptica OFDM.....	66
4.7	(SIM-OFDM) Modulación por índice de subportadora OFDM.....	69
5	CAPÍTULO V. Técnicas de multiplexación para Li-Fi ...	71
5.1	Sistema CDMA.....	71
5.1.1	Sistema óptico inalámbrico OCDMA.....	72
5.1.2	Sistema OCDMA de espacio libre.....	76
5.2	Sistema OFDM.....	77

5.2.1	Sistema O-OFDM	78
5.2.2	Sistema O-OFDM de espacio libre	82
6	CAPÍTULO VI. Sistematización de las tecnologías analizadas	84
6.1	Factores que interfieren en el canal	84
6.2	Comparativa entre técnicas de modulación y demodulación para Li-Fi.....	86
6.2.1	Modulaciones definidas en el estándar 802.15.7.....	86
6.2.2	Modulaciones ópticas OCDMA, O-OFMD	88
6.3	Comparativa entre técnicas de multiplexación para Li-Fi.....	92
6.3.1	Sistemas ópticos de espacio libre O-OFDM, OCDMA.....	93
7	Conclusiones y recomendaciones	96
7.1	Conclusiones.....	96
7.2	Recomendaciones.....	98
	REFERENCIAS.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rango de frecuencias del espectro de luz visible por ojo del humano.	5
Figura 2. Conexión de dispositivos a internet por Li-Fi.....	6
Figura 3. Conexión red Li-Fi.....	7
Figura 4. Modulación OOK.....	10
Figura 5. Técnicas de multiplexación TDMA, FDMA y CDMA.....	14
Figura 6. Diagrama de circuito con polarización directa del LED.....	15
Figura 7. Chip incorporado en bombilla LED.....	16
Figura 8. Esquema circuital de un arreglo de LEDS de transmisión Li-Fi.	17
Figura 9. Receptor Li-Fi.....	18
Figura 10. Esquema de circuito del amplificador de un fotodiodo de recepción.	18
Figura 11. Fotodiodo tipo PIN.....	19
Figura 12. Fotodiodo tipo APD.....	20
Figura 13. Diagrama del Sistema de comunicación.....	22
Figura 14. Red híbrida Wi-Fi Li-Fi.....	23
Figura 15. Patrones de direcciones emitidas por el emisor.....	31
Figura 16. Transmisión angular característica de filtro película delgada banda paso.....	35
Figura 17. Transmisión de datos NLOS ilustrada por Reilly y Warde.....	36
Figura 18. Trazado de rayos aleatorio en la comunicación.....	38
Figura 19. Diagrama de transmisión OOK.....	50
Figura 20. Detector de envolvente.....	51
Figura 21. Ondas de ciclos de trabajo.....	55

Figura 22. Diagrama de transmisión VPPM.	56
Figura 23. Símbolos transmitidos en M-ary PPM OCDMA con 4 símbolos.	57
Figura 24. Modulación CSK, ubicación de coordenadas en el plano x, y.	58
Figura 25. Diagrama de transmisión CSK.	59
Figura 26. Constelación cuadrada QAM.	61
Figura 27. Modulador digital QAM.	63
Figura 28. Demodulador digital QAM.	63
Figura 29. Modulación SM-OFDM.	64
Figura 30. Demodulación SM-OFDM.	66
Figura 31. Proceso de modulación y demodulación de O-SM-OFDM.	69
Figura 32. Modulación por índice de subportadora OFDM.	70
Figura 33. Diagrama de bloques para SIM-OFDM.	71
Figura 34. Transmisión y recepción de datos CDMA.	72
Figura 35. Diagrama de bloques de transmisión del sistema OCDMA.	73
Figura 36. Estructura para un receptor OCDMA.	75
Figura 37. Sistema transmisor y receptor en FSO-CDMA.	77
Figura 38. Flujo de los datos a transmitir en OFDM.	78
Figura 39. Diagrama de bloques de transmisión de esquemas O-OFDM.	80
Figura 40. Transmisión y recepción del sistema FSO-OFDM.	83
Figura 41. Enlace óptico de espacio libre.	84
Figura 42. Proceso modulador, demodulador del sistema O-SM-OFDM.	91
Figura 43. Demodulador para el sistema OCDMA.	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre la actual y futura tecnología inalámbrica.....	16
Tabla 2. Comparación entre la actual y futura tecnología inalámbrica.....	27
Tabla 3. Modos de operación de la capa física PHY I.....	50
Tabla 4. Modos de operación de la capa física II.....	55
Tabla 5. Modos de operación de la capa física PHY III.....	60
Tabla 6. Comparación de rendimiento de los esquemas ópticos de OFDM expuestos.....	81
Tabla 7. Tasa de datos máxima en cada modulación en las capas físicas PHY I, PHY II y PHY II.....	86

1 CAPÍTULO I. Introducción

1.1 Antecedentes

La tecnología Li-Fi (*Light Fidelity*), es transmitida por medio de la luz visible o también conocida como VLC (*Visible Light Communication*), la cual fue desarrollada por el Profesor Harald Hass y su equipo de trabajo en la Universidad de Edimburgo. El Dr. Hass anonadó a la audiencia con una demostración de lo que es capaz esta tecnología, haciendo muestra de la gran velocidad que podía usar Li-Fi al emitir un video en alta resolución haciendo uso de una bombilla LED en el global TED en la fecha de junio de 2011, en ese instante fue que bautizó a esta tecnología como Li-Fi. (Haas, 2011)

En varias implementaciones realizadas en laboratorios de Berlín se ha podido demostrar que las bombillas o lámparas LED blancas pueden llegar a transmitir cerca de los 500 megabytes por segundo, sin embargo también se ha experimentado en las universidades de Oxford y Edimburgo la transmisión de datos de manera concurrente mediante el uso de arreglos de LEDs, en el cual cada LED representa un flujo de transmisión distinta de datos, haciendo también la mezcla e inclusión de colores de LED como rojo, azul e incluso el verde que implicaría la codificación de varios canales de datos para de esa manera variar la frecuencia de la luz utilizada. (Khandal & Jain, 2014)

En esta tecnología se encuentran varios estudios realizados en distintas técnicas de multiplexación que se han basado en la multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM (J. Armstrong, J. C. Schmidt, p. 342-345), ya que se ha demostrado compatibilidad con la tecnología LI-FI, debido a que esta técnica de multiplexación es adecuada para comunicaciones ópticas inalámbricas como es el caso de LI-FI.

Li-Fi podría llegar a ser mejor que Wi-Fi debido a que existen varias limitantes en Wi-Fi. Wi-Fi hace uso de las frecuencias de radio de 2.4 a 5 GHz para ofrecer acceso inalámbrico a Internet mientras que su ancho de banda está limitado a 50-100 Mbps. Con el aumento en la cantidad de puntos de acceso Wi-Fi y el volumen del tráfico de Wi-Fi, la fiabilidad de las señales se verá afectada. (García, 2019).

Para ello la tecnología *light Fidelity* o conocida como LI-FI resulta como una alternativa para las redes inalámbricas, dichas redes deben operar al alcance del espectro de la luz visible y así poder tener más opciones de redes inalámbricas aparte de la tradicional WI-FI que por sus siglas en inglés significa *Wireless Fidelity*.

1.2 Alcance

El presente estudio permitirá determinar la manera de cómo se han tratado las distintas técnicas de modulación, demodulación y multiplexación de la tecnología LI-FI.

Posteriormente se realizará una comparación entre distintas técnicas de modulaciones sustentadas en la multiplexación por división de frecuencias ortogonales y las tecnologías utilizadas LI-FI. Para de esa manera poder sintetizar toda la información recolectada y presentarla de manera ordenada con fácil comprensión para los lectores.

De igual manera el estudio pretende brindar fundamentos para poder realizar implementaciones futuras de la tecnología LI-FI.

1.3 Justificación

El estudio pretende brindar soluciones alternas a la red inalámbrica WI-FI debido a que en esta red se puede llegar a saturar el espectro electromagnético, mientras el espectro de luz visible usado en LI-FI es 10.000 veces superior brindaría menor susceptibilidad a la saturación.

En cuestiones económicas, la red LI-FI sería económica de implementar, debido a que bastaría con implementar moduladores a las luces como también receptores en los dispositivos que se quieran conectar a la misma. Esta tecnología a diferencia de otras, se puede implementar en lugares sensibles a las áreas electromagnéticas para de ese modo no causar interferencias.

Por estas razones se puede tener una mejor conexión a internet por medios alternativos a los existentes hoy en día, brindando así al usuario una mejor opción cuando existan saturaciones en las conexiones habituales.

Mediante este estudio se podrán tener líneas base de cómo es el uso de la modulación, demodulación y multiplexación de la tecnología LI-FI para posteriormente ser puesta en práctica y tener fundamentos base de la misma.

La finalidad de este estudio es motivar y servir como línea base para futuras implementaciones como también investigaciones.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Realizar un estudio del estado del arte de las técnicas de multiplexación, modulación y demodulación para la tecnología Li-Fi identificando los principales avances.

1.4.2 Objetivos específicos

- Presentar conceptos básicos que permitan comprender el funcionamiento de la tecnología Li-Fi.
- Describir las características del canal de transmisión en el que la tecnología Li-Fi opera
- Analizar diferentes técnicas de modulación y demodulación para Li-Fi.
- Estudiar las técnicas de multiplexación empleadas en la tecnología Li-Fi
- Realizar una sistematización descriptiva de los aportes más representativos con la finalidad de abordar teóricamente el presente estudio.

2 CAPÍTULO II. Marco teórico

2.1 Introducción

Durante el desarrollo del presente capítulo, se detallarán los conceptos que se emplearán a lo largo del mismo para poder entender de manera precisa el funcionamiento de la tecnología Li-Fi, como también los elementos que intervienen para poder formar la red como tal de esta manera alternativa de conexión a internet de manera inalámbrica.

2.2 Comunicaciones por luz visible (VLC)

Este tipo de comunicaciones permite el envío de datos mediante el uso del espectro de luz visible, es por ello que se la denomina VLC, la cual pretende ser una manera alterna de conexión inalámbrica que hace uso del espectro de radio frecuencia el cual se encuentra muy saturado.

La principal fuente de transmisión para esta tecnología es el uso de la tecnología LED, la cual permite que un diodo emita luz, por ende, a través de dispositivos de emisión de luz poder transportar datos a altas velocidades.

Se considera que el espectro de luz visible está en un rango de entre 400 a 800 THz, es de esa forma que en todo ese intervalo está permitido poder hacer uso de esas frecuencias para poder transmitir información por emisión de luz. (García, 2019).

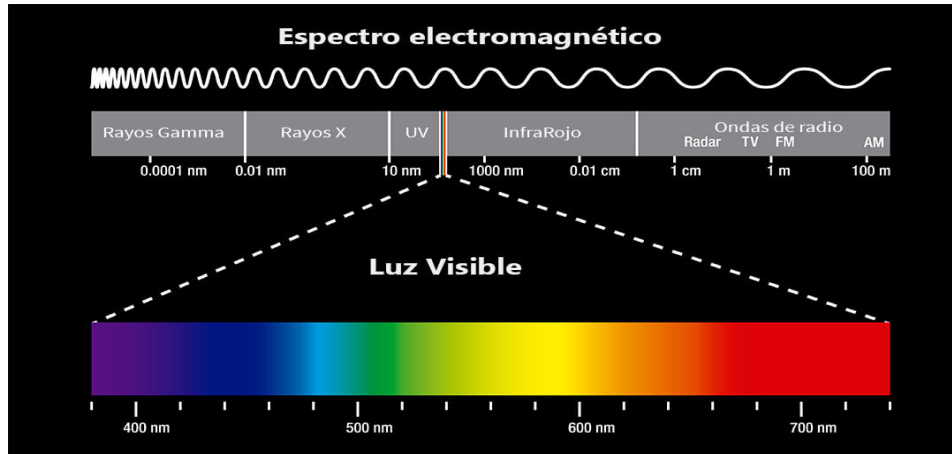


Figura 1. Rango de frecuencias del espectro de luz visible por ojo del humano.

Tomado de (Hermes. P, s. f).

2.3 Tecnología Li-Fi

2.3.1 ¿Qué significa Li-Fi?

Por sus siglas significa *Light Fidelity*, la cual se desempeña como una alternativa a la tradicional conexión de manera inalámbrica al internet Wi-Fi, para lo cual, en lugar de usar de ondas de radio, hace uso de la luz para transmitir datos (Sarkar. A, 2015). En lugar de módems Wi-Fi, Li-Fi usaría transmisores y receptores los cuales están equipados con lámparas LED y fotorreceptores que iluminarían una habitación sin problemas, y a su vez, transmitir y recibir información. Hace uso de la porción visible del espectro electromagnético que está subutilizada.

Mediante el uso de la tecnología LED desarrollada en los últimos años explotando sus características para poder transmitir datos con una alta velocidad en comparación a la tradicional Wi-Fi. Dado así que el doctor Harald Hass quien fue el creador de esta tecnología le nombra como Li-Fi en una charla del TED global celebrada en Edimburgo, dando una demostración de una velocidad de 10Mb/s. (Aravena, 2013).

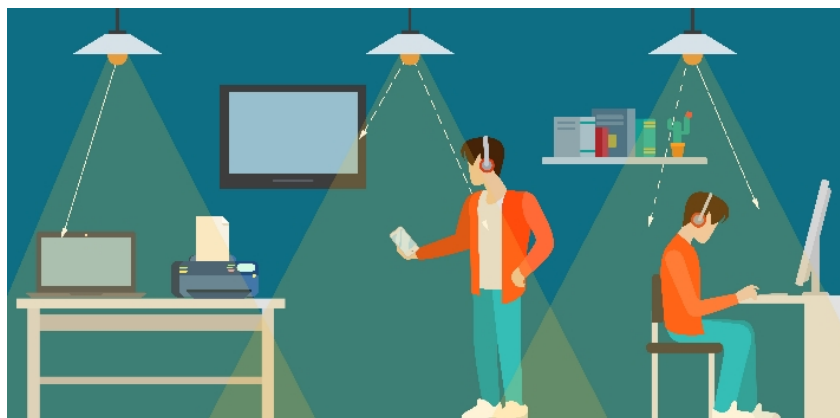


Figura 2. Conexión de dispositivos a internet por Li-Fi.

Tomado de (Levy. G. 2018).

2.3.2 Funcionamiento de Li-Fi

Como característica principal se tiene que su transmisión de datos desde y hacia la internet, hace uso de un *chip* incorporado al bombillo LED el cual actuará como un *Router* para poder enviar el tráfico de datos y como receptor tener un diodo que sea sensible a la luz, es decir, un fotodiodo el cual estaría incorporado en los terminales de los usuarios como por ejemplo dispositivos móviles, PC, consolas de videojuegos, etc.

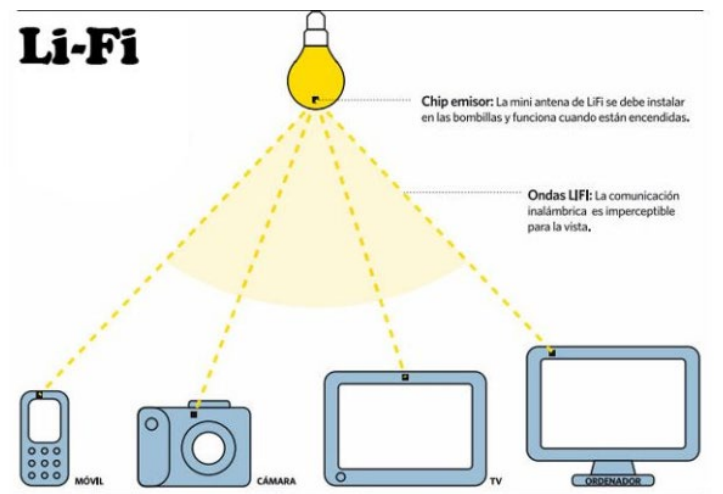


Figura 3. Conexión red Li-Fi.

Tomado de (*PureLiFi*, 2014).

Cuando el bombillo LED se encuentre encendido entrará en estado "on" este transmitirá una 1 digital, en caso contrario cuando esté apagado estará en estado "off" el cual transmite una 0 digital logrando de esta forma que se pueda variar la frecuencia de transmisión de datos.

Al momento en que los LED's envían los datos a través de la luz, es necesario codificar y modular la información y la frecuencia en un receptor para poder realizar la comunicación bidireccional que implica esta tecnología. Su forma de

enviar los datos por la luz es de manera binaria mediante unos y ceros, para poder enviar dichos valores esta tecnología lo que hace es apagar y prender los dispositivos de luz de una manera muy rápida la cual es totalmente imperceptible al ojo humano, dando, así como un plus el poder también recibir luz en un determinado ambiente aparte de poder transmitir datos a través de la misma.

Para poder realizar la conexión a Internet se dispondrá de un *Router* para enviar los datos que pasarán por los distintos emisores *LED*. En la parte de la recepción se tendrá un receptor el cual será encargado de convertir los distintos cambios de amplitud que vengan de las señales eléctricas, debido a que todos estos cambios pasarán a ser flujos de datos que se transmitirán de un dispositivo a otro, cabe recalcar que se tienen distintos tipos de dispositivos sean celulares, computadores, tabletas, etc.

El dispositivo receptor se deberá introducir en cada computador para poder realizar las interpretaciones de los encendidos y apagados que producen los transmisores *LED*, es decir, los parpadeos constantes que se generan y los cuales son imperceptibles al ojo humano.

Para la codificación de los datos emitidos por la luz se hace uso de la variación de la velocidad en la que los *LED* encienden y apagan, dando así un resultado de distintas cadenas de transmisión de unos y ceros. Para ello la intensidad del *LED* es adecuadamente modulada a grandes velocidades para que sea imperceptible al ojo humano proporcionando un efecto al ojo que pareciera que todo el tiempo la luz estuviera encendida. (García, 2019)

2.3.3 Estándar 802.15.7

El estándar 802.15.7, especifica que puede lograr velocidades de transmisión de datos aceptables para entregar audio y video (96 Mb/s), como otra cualidad del estándar se tiene que es capaz de soportar la movilidad entre el emisor y receptor, es decir, el enlace óptico, se considera también distintas infraestructuras de luz, el ruido del canal como también las diversas fuentes de luz por ejemplo la luz ambiental, haciendo uso de las normas de seguridad el ojo humano (*IEEE Computer Society*, 2011), y una subcapa MAC que acomoda necesidades únicas de enlaces visibles, así como otras longitudes de onda de luz específicas (Goldberg. J, 2019).

Como características principales del estándar 802.15.7 se pueden mencionar las siguientes:

- Consta con direcciones de 16 bits cortos para preparar el sistema si se tienen desarrollos de múltiples usuarios.
- Opera en tres tipos de topologías de conexión de red: *peer to peer*, estrella, *broadcast*.
- Permite una transferencia de información de manera fiable gracias al uso de las tramas de confirmación.
- Realiza transmisiones de datos de manera programada o por el Acceso Aleatorio el cual consta con prevención de colisiones.
- WQI (*Wavelength Quality Indication*), el cual garantiza la calidad de la longitud de onda.
- Cuenta con soportes para: la visibilidad, el color, el control de oscurecimiento y estabilizador de color.

Este estándar también conocido como *On-Off Keying* (OOK), hace uso de la codificación denominada como *Manchester*, el cual permite que el periodo de pulsos positivos sea igual que el periodo de pulsos negativos. Como efecto se obtiene que dobla el ancho de banda que se requiere para el envío de datos, sin

embargo, se tiene que para tasas de bits altas se ejecuta la codificación *run length limited* (RRL), la cual permite que el espectro sea mucho más eficiente en cuestiones de transmisión, para la atenuación esta se ajusta al agregar extensiones de OOK la cual permite modular la salida agregada a un nivel adecuado. (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012)



Figura 4. Modulación OOK.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012).

Este estándar define dos capas principales, la de control de acceso (MAC) y la física (PHY) para las comunicaciones ópticas inalámbricas de corto alcance haciendo uso de la luz visible, principalmente la capa física comprende 3 clases distintas denominadas PHY I, PHY II y PHY III.

Al hablar de las dos primeras capas físicas PHY I y PHY II, se trata de una transmisión de una entrada y una salida es decir, SISO (*single-input single-output*) mediante el uso de una única fuente de luz haciendo uso de la modulación previamente mencionada OOK (*On-Off Key*), también utilizando la modulación (VPPM) que hace referencia a la modulación por porción o posición de pulso variable, mientras tanto la capa física PHY III usa para la transmisión el sistema MIMO, es decir, para múltiples entradas múltiples salidas, siendo así capaz de soportar varias fuentes ópticas mediante la modulación CSK con constelaciones de color de 4, 8 o 16 es decir, por desplazamiento de color.

En la capa física PHY I se pueden tener velocidades de transmisión de datos de entre 12 a 267 Kbits/s, haciendo uso de códigos de corrección de errores tales como los *Reed Solomon* o los convolucionales. En la capa física PHY II se ha destinado para usarlo en ambientes *indoor*, es decir, interiores con velocidades que oscilan los 1.25 a 96 Mbits/s haciendo uso de los anteriores códigos mencionados para la corrección de errores, por otra parte, en la capa física PHY III es utilizada como fuente de detección RGB, brindando velocidades de transmisión de datos de entre 12 a 96 Mbits/s con la ayuda del código de detección de errores Reed Solomon. (Rajagopal, Roberts, & Lim, 2012)

En la subcapa MAC, se encuentra la operación encargada de los accesos a la capa física, dando como resultado los siguientes aspectos:

- Brinda soporte a: movilidad, visibilidad, seguridad del dispositivo y a la función del color.
- Brinda el esquema para la mitigación de parpadeo de la luz.
- Entrega un enlace confiable entre dos pares de existencias MAC.
- Genera y sincroniza balizas de red.
- Tolera el indicador visual que indica el estado de un terminal como también la calidad del canal del enlace.

2.3.4 Modulaciones incorporadas en el estándar IEEE 802.15.7

Para cada capa física PHY tiene mecanismos para poder modular la fuente de luz proveniente, para los cuales se tienen codificaciones como RLL de longitud de carrera limitada y la codificación de canal, que sirve para el envío de corrección de los errores generados mediante FEC.

Los códigos de línea que se tienen es estos modelos como son: *Manchester*, 4B6B y sus variaciones están definidos en el estándar 802.15.7 y estos proporcionan compensaciones con la sobrecarga de codificación y con la facilidad de ejecución.

Los esquemas de FEC son utilizados en ambientes interiores y son muy útiles al momento de tener decisiones difíciles generadas por el CDR. Por otra parte, para los ambientes exteriores, los códigos que se utilizan son más fuertes como los RS y CC que son concatenados y son implementados para compensar la pérdida de ruta provocada por las largas distancias generando interferencia por el ruido óptico como la luz natural del día y la luz fluorescente.

Las codificaciones RS (*Reed-Solomon*) y CC (códigos convolucionales) son los códigos para verificar la paridad de baja densidad (LDPC) usados en las limitaciones de datos de transmisión cortos. (Rajagopla et al., 2012)

Para ello el estándar 802.15.7 define tres principales modulaciones que son:

- Modulación OOK
- Modulación VPPM
- Modulación CSK

2.3.5 Demodulación

En la demodulación se encuentra la parte de recibir la información transmitida y realizar el proceso inverso de la modulación para poder reconstruir los datos que fueron enviados a través del canal o medio.

Para realizar el proceso de demodulación es importante definir un esquema de modulación primero, para que la parte receptora pueda decodificar la señal y realizar el mapeo inverso de los símbolos transmitidos debido a esto el receptor es fundamental para poder detectar la tasa de error de bits y posteriormente realizar la corrección de los mismos.

2.3.6 Multiplexación

La técnica de multiplexación o también conocida como técnica de acceso múltiple es la encargada de que una cantidad de usuarios los cuales están conectados en un mismo canal o medio, transmita y reciba información de manera compartida.

Para poder conseguir el acceso múltiple de los usuarios, es necesario realizar este proceso en la capa física PHY del sistema de comunicaciones con la implementación del protocolo de acceso múltiple y MAC que es el encargado del control de acceso al medio debido a que gracias a este último se logran evitar las interferencias entre usuarios que acceden al mismo tiempo y de esa manera distribuir los recursos de la red según el protocolo implementado para dar eficiencia a la transmisión.

Para poder implementar las técnicas de multiplexación existen 3 tipos principales:

- FDMA
- TDMA
- CDMA

Para cada una de estas técnicas de multiplexación existen sus diferentes derivados los cuales se destinan según el tipo de implementación, para este caso se detallará de mejor manera en un próximo capítulo.

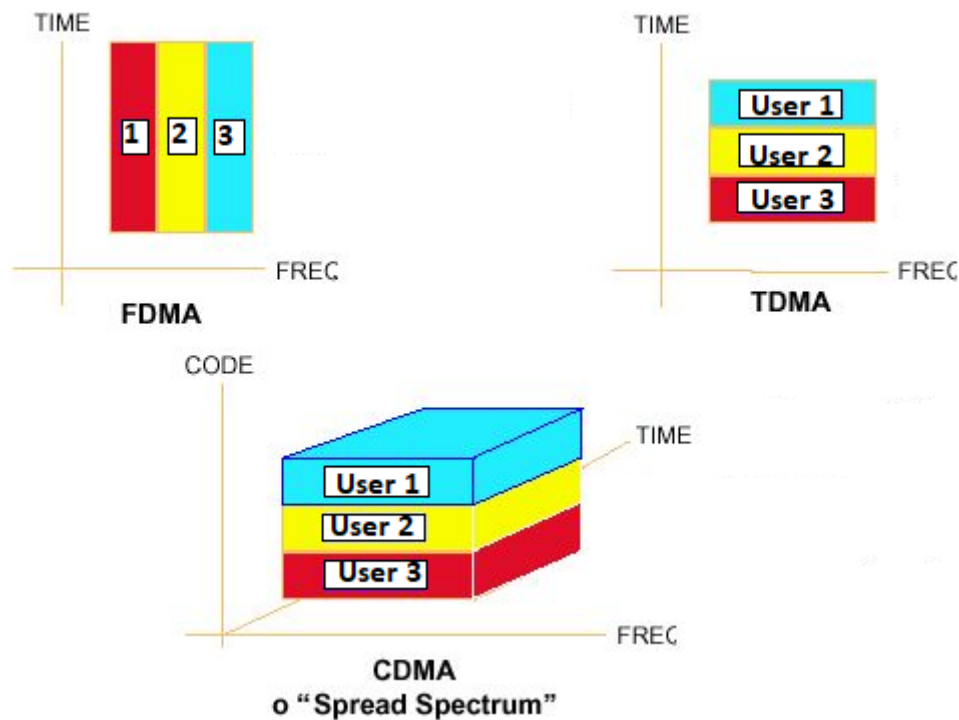


Figura 5. Técnicas de multiplexación TDMA, FDMA y CDMA.

Tomado de (García. J. 2014).

2.3.7 Elementos que componen una red Li-Fi

2.3.7.1 Emisor

Los emisores de luz LED son diodos que irradian distintos colores dependiendo así del material del cual sean fabricados y para el propósito para el que fueron creados, por ejemplo se tienen colores en particular los cuales son de uso frecuente, por ejemplo los colores: blanco, el cual es el que se ha demostrado

en estudios es el que mejor velocidad brinda, azul, rojo y verde, colores que se encuentran bajo prácticas de laboratorio en Berlín Alemania. (Khandal & Jain, 2014)

Debido a su material caracterizador que es semiconductor que pueden ser entre galio o silicio, la intensidad de luz que emite puede ser modulada o ajustada a velocidades imperceptibles al ojo humano.

Para poder transmitir se hace uso de la luz visible en el espacio libre, haciendo uso de las frecuencias 385-789 Thz con una velocidad de 1 Gbps, para ello es indispensable instalar un módulo o *chip* en las bombillas LED como se muestra en la figura 7, la cual será la encargada de ir conmutando la señal entre 1 y 0 y así transmitir los datos.

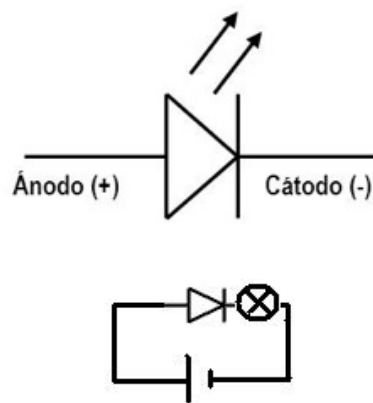


Figura 6. Diagrama de circuito con polarización directa del LED.

Tomado de (areatecnologia.com, Diodo LED, s. f).

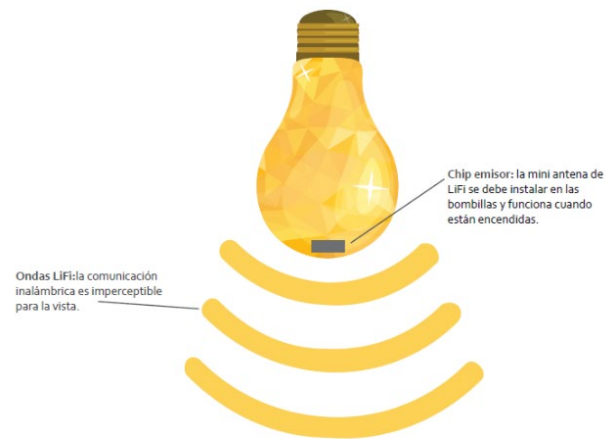


Figura 7. Chip incorporado en bombilla LED.

Tomado de (Salgado. R, s. f).

El diodo emisor de luz conocido como LED, es un elemento de larga duración con bajo consumo de energía el cual es amigable con el medio ambiente, dependiendo del color que emita tendrá diferentes parámetros como los que se exponen en la tabla 1.

Tabla 1.

Comparación entre la actual y futura tecnología inalámbrica.

COLOR	LUMINOSIDAD	CONSUMO	LONGITUD DE ONDA	DIÁMETRO
Rojo	1,25 mcd	10 mA	660 nm	3 y 5 mm
Verde, amarillo, naranja	8 mcd	10 mA	-	3 y 5 mm
Rojo con luminosidad alta	80 mcd	10 mA	625 nm	5 mm
Verde con luminosidad alta	50 mcd	10 mA	565 nm	5 mm
Hiper Rojo	3500 - 1600 mcd	20 mA	660 nm	5 mm
Hiper Verde	300 mcd	20 Ma	565 nm	5 mm
Azul opaco	1 mcd 60°	-	470	5 mm
Rojo y verde	40 mcd	20 mA	-	10 mm

Adaptado de (DH gate.com, s. f).

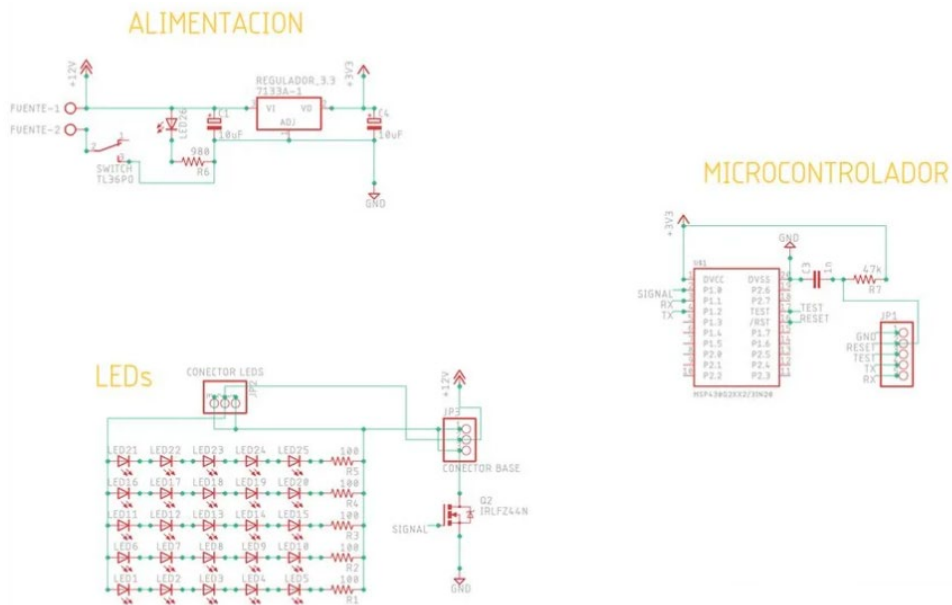


Figura 8. Esquema circuital de un arreglo de LEDS de transmisión Li-Fi.

Tomado de (*Instructables circuits*, s. f).

2.3.7.2 Receptor

Una vez finalizado el proceso de modulación de la intensidad de luz a grandes velocidades, está pasa a ser recibida por un fotodiodo el cual tiene sensibilidad a la luz y de esa manera capta el flujo de corriente eléctrica haciendo uso de los fotones que emitió el LED.

Al realizar todo ese proceso de captar el flujo de corriente eléctrica emitidos por el LED, pasa toda esta información al dispositivo final del usuario el cual puede ser un computador, un celular, etc. Para que este dispositivo sea capaz de interpretar el envío de datos, presentado un ancho de banda de entre 45 a 98 Thz.



Figura 9. Receptor Li-Fi.

Tomado de (prnewswire.com, s. f).

Los fotodetectores o fotodiodos son los encargados de recibir las señales emitidas del emisor LED y los fotones los cuales son absorbidos en este proceso pasan a generar portadores libres. Posteriormente un campo eléctrico aplicado obliga el movimiento de los portadores generados que da como resultado una corriente generadora de tensión en una impedancia de carga (Muriel. M).

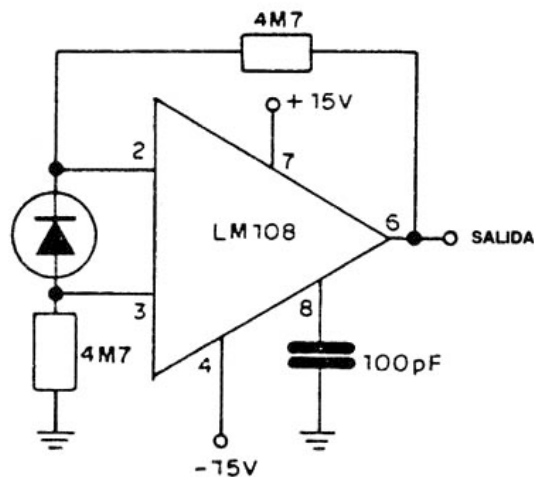


Figura 10. Esquema de circuito del amplificador de un fotodiodo de recepción.

Tomado de (Mouser electronics.com, s. f).

Los fotodetectores o fotodiodos se clasifican en los siguientes tipos:

- Fotodiodo PIN
- Fotodiodo APD

Los fotodiodos APD que por sus siglas significan *Avalanche Photo-Diode* presenta una sensibilidad de recepción mucho más potente que el fotodiodo PIN pero que a su vez por su mejora de sensibilidad representa una complejidad mayor de fabricación según detalla (Muriel. M, s. f).

Otro tipo de inconvenientes que presenta APD es que en su ganancia aleatoria se genera un ruido adicional a la señal, por otra parte, su ganancia también dependerá bastante de la temperatura en el que el ambiente se encuentre presentando además menor ancho de banda.

El fotodiodo PIN presenta una solución cuando no se generan los pares electrón-hueco en la carga de espacio, permitiendo, este tipo de fotorreceptor tenga una gran zona de carga espacio al insertar una capa intrínseca I entre las capas P y N y formar PIN que así es denominado.

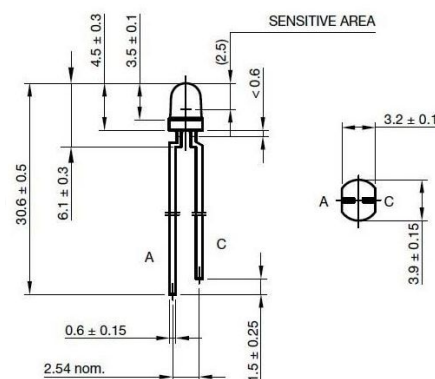


Figura 11. Fotodiodo tipo PIN.

Tomado de (Electrónicas Caldas, s. f).

Los fotorreceptores APD son considerados como un semiconductor de los fotomultiplicadores, utilizados comúnmente en aplicaciones como el telemetro laser y en telecomunicaciones de largas distancias por medio de la fibra óptica en otro tipo de aplicaciones aparte de las telecomunicaciones es el estudio de la física en el campo de las partículas y astro partículas.

Los fotodiodos PIN son los fotorreceptores más comunes debido a que su capa I que es la capa intrínseca es fácilmente modificable para poder mejorar su eficiencia cuántica y margen de frecuencia.

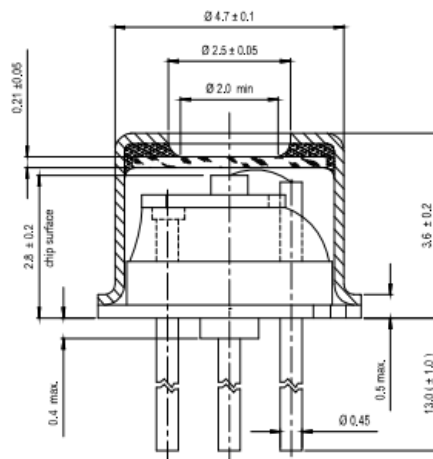


Figura 12. Fotodiodo tipo APD.

Tomado de (*Mouser Electronics*, s. f).

2.3.7.3 Canal de transmisión

En el ámbito de las comunicaciones ópticas, las altas frecuencias tienden a dificultar la modulación de la fase como también la frecuencia a la que va la señal transmitida. Por otra parte, existen sistemas ópticos moduladores de la intensidad de la señal.

Caracterizando al canal por la existencia de forma casi inevitable de las señales que causan interferencia debido a fuentes de iluminación artificial, causando dificultades en el perfeccionamiento y ejecución de sistemas de comunicación ópticos no guiados, para evitar este tipo de interferencias es preciso implementar circuitos determinados en la parte del receptor para que pueda discriminar la señal correcta y evitar el efecto de interferencia.

El canal de transmisión tiene como capacidad la tasa más alta de comunicación que se pueda llegar a través del medio. Por otro lado, las tasas que estén por debajo de dicha capacidad máxima del canal tienden a generar errores y para ello es posible implementar códigos que reduzcan dichos errores con suficiente longitud llamados *block-length*. (Biosca Rojas, Cárdenas Barroso, & León Morales, 2017)

Al hablar de la capacidad se entiende como la calidad que puede lograr el canal proporcionando una referencia importante para brindar calidad a la transmisión. Para entender la capacidad como tal del canal es preciso describir los modelos de los canales entendiendo las restricciones de entrada por cada uno. (Arnon et al., 2012)

Existen tres tipos de canales ópticos de tiempo discreto los cuales están modulados por la intensidad de pulso:

- Canal de Poisson de tiempo discreto.
- Canal de intensidad óptica de espacio libre.
- Canal de intensidad óptica con ruido Gaussiano.

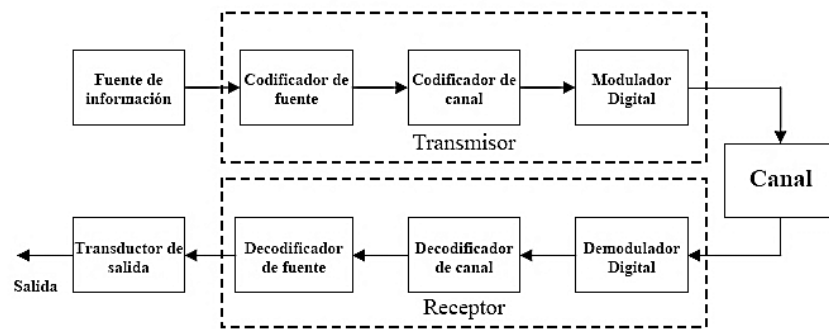


Figura 13. Diagrama del Sistema de comunicación.

Tomado de (Sandoval. C, 2017).

2.3.8 Li-Fi en internet de las cosas (IoT)

En el ámbito del internet de las cosas, Li-Fi podría presentar varias prestaciones en este tipo de tendencia tecnológica, como por ejemplo la alta velocidad en transmisión de datos. En los estudios realizados en ambientes controlados se ha podido ir puliendo este tipo de transmisión de datos por medio de la luz, dando así también mejores en la parte emisora y transmisora para Li-Fi.

En un proyecto realizado por participantes, entre ellos miembros de la IEEE pudieron realizar pruebas demostrando que en el emisor se utiliza un arreglo de diodos, los cuales emiten luz y del lado receptor haciendo uso de un arreglo de fotodiodos para así poder transmitir velocidades de 1 Gbps. (Leguizamón-Páez, Rojas-Pineda, & Rodríguez-Sánchez, 2019)

Mediante este tipo de pruebas, así como también otras a más velocidades como de 20 y 100 Gbps empleando otros tipos de arreglos, por ejemplo, en la velocidad de 100 Gbps se emplearon emisores de diodos RGB tipo láser para poder hacer uso de todo el espectro de luz visible para poder alcanzar dicha velocidad,

estudios sugieren que se continúa trabajando esta modalidad para alcanzar un pico teórico de hasta 224 Gbps. (Leguizamón et al., 2019)

Una de las fundamentales actividades que pretende Li-Fi es poder garantizar una conexión de red híbrida con la actual red Wi-Fi, para de esa manera poder complementar en ambientes interiores un mejor alcance a todos los dispositivos conectados, por lo que la señal Wi-Fi se ve degradada mediante más alejado este o si hay muchos obstáculos de por medio.



Figura 14. Red híbrida Wi-Fi Li-Fi.

Tomado de (Leguizamón-Páez, Rojas-Pineda, & Rodríguez-Sánchez, 2019).

Considerando también que para poder lograr su integración en el *IoT* debe considerar varios aspectos como la seguridad, la cual en esta tecnología proporciona una mejoría en seguridad en la comunicación debido a que la transmisión por luz no puede ser interferida tanto como radiofrecuencia y de esa manera puede garantizar mayor seguridad a sus usuarios.

Otro apartado importante de la tecnología Li-Fi radica en la disminución de sus costos, esto se da debido a que esta tecnología hace uso de los diodos LED, los

cuales emiten un costo de potencia muy bajo y a su vez brindan una larga vida útil para lo cual se pueden generar beneficios como incorporar una red amplia de *IoT* sin la necesidad de incidir a costos grandes post producción.

En cuanto a disponibilidad se refiere también se puede evidenciar una reducción de costos, debido a que se también en esta tecnología se puede implementar redundancia al agregar más LED y regular la intensidad en la que emana la luz.

Para poder considerarse esta tecnología apta para el internet de las cosas, se debe considerar el incremento exponencial de los dispositivos conectados a la red, para la cual Li-Fi cuenta con un gran ancho de banda para poder abastecer a tanta demanda de dispositivos conectados como también de eficiencia espectral, todo esto es posible debido a que la luz visible no se satura como sucede en Wi-Fi. (Leguizamón et al., 2019)

2.3.9 Aplicaciones en Li-Fi

Dentro de las bondades en aplicaciones que brinda la tecnología Li-Fi pueden destacar varias, como por ejemplo las siguientes que se van a enlistar:

Tecnología en la salud: existen limitantes para Wi-Fi en los hospitales, esto se debe a que pueden causar interferencias en las ondas de radiación y por ende con el espectro. Es por esto que la implementación de Li-Fi puede resolver estos problemas debido que las luces están permitidas en las salas de los quirófanos.

Otra de las utilidades que tiene Li-Fi es en el uso dentro de las aerolíneas debido a que el servicio que se brinda de telefonía mediante Wi-Fi en el avión es muy caro y gracias al uso de la tecnología Li-Fi puede ser fácilmente implementada

en la luz de lectura que tiene cada pasajero en su asiento permitiendo así una conexión de bajo costo y fácil implementación.

En las plantas de energía donde son áreas sensibles Wi-fi y ondas de radiación son perjudiciales para este tipo de áreas, en especial cuando se trata de plantas de energía atómica, para la gran demanda de rapidez que necesitan este tipo de centrales nucleares se podrían implementar sistemas de datos interconectados para poder realizar monitores, permitiendo así que Li-Fi pueda ofrecer una conexión segura y continua en áreas de alta sensibilidad debido que se transmitiría por luz que no afecta a las dichas áreas con ondas de radiación dando como resultado una mejoría en las soluciones implementadas en la actualidad.

Mediante el uso de la tecnología Li-Fi puede brindar mayor precisión en el uso del *GPS* debido a que no importa cuán avanzados sean las comunicaciones satelitales siempre hay algún lugar donde no llegue con precisión, tal es el caso en los ambientes interiores en donde se utiliza tecnología de triangulación, pero es poca fiable, es ahí en donde Li-Fi puede entrar como tecnología híbrida y brindar mayor precisión en estos datos de localización.

Gracias a la empresa *Byte Light* se puede tener un sistema que permita realizar el sistema de ubicación dentro de una infraestructura el cual consiste en realizar modulaciones LED que capten las cámaras de un dispositivo móvil los cuales esos datos pasarán a ser procesados dentro de una aplicación en el mismo dispositivo inteligente siendo así una ventaja al no tener la necesidad de utilizar el sistema Wi-Fi para realizar cálculos de la ubicación y obtener una mejor precisión dentro de alguna infraestructura en la que se encuentre el usuario.

2.4 Expansión de la tecnología Li-Fi

Hoy en día se están realizando diversos experimentos que consisten en probar la tecnología Li-Fi en agencias de muchas partes del mundo con el uso de iluminación LED, por otra parte, industrias como la aeronáutica también se encuentra trabajando en la búsqueda de soluciones que permitan realizar la integración de esta tecnología en los aviones comerciales.

Li-Fi pretende llegar a industrias en las cuales Wi-Fi puede tener varias complicaciones por la radiación de sus ondas, es así el caso de aeropuertos, hospitales, plantas de energía o incluso las calles de la ciudad en donde Li-Fi puede adecuarse sin causar mayores dificultades. La creciente demanda de ancho de banda que tienen los usuarios es un factor clave para impulsar al crecimiento de esta tecnología Li-Fi (*Global Market for Li-Fi technology Analysis and Forecast. 2018*).

2.5 Comparación de la tecnología Li-Fi con Wi-Fi

Parámetros que destacan a Li-Fi son: su rapidez y gran ancho de banda, más barata y segura que Wi-Fi para las cuales se especificarán a continuación:

La velocidad de transmisión que contempla Li-Fi bajo estudios realizados en los últimos tiempos han podido demostrar que pueden alcanzar los 10 GB/s, pero fácilmente esa velocidad puede varias y alcanzar muchas más cifras de hasta 224 GB/s lo cual permitiría descargar archivos muy pesados como juegos de consolas o películas en milésimas de segundo. (Li-Fi, Internet a la velocidad de la luz, s. f)

Alcanzando también una economía mucho más sostenible debido a que tiene menor cantidad de componentes que incorporar y un gasto de energía mucho menor provocando así un ahorro significativo, basta con encender el LED.

Una red segura es lo que proveería Li-Fi gracias a que la luz que emana el LED no traspasa los muros de las paredes como lo hacen normalmente las ondas de radio, evitando así interferencias no deseadas por personas que quieran interceptar señales y realizar robos de información mediante esta manera.

Además de evitar interrupciones no deseadas Li-Fi también ofrece una conexión a internet sin saturación, es decir, evita el colapso del canal del espectro radioeléctrico lo cual proporciona una experiencia de conexión mucho más amigable al usuario ya que no habría tantos retardos como lo hay por W-Fi.

Por otra parte, al no poder atravesar los muros de las paredes limita mucho la transmisión de datos en un amplio escenario, limitando también el área de cobertura hablando en metros alrededor de 5 a 10 m. (Li-Fi, Internet a la velocidad de la luz, s. f)

Las ondas de luz visibles no son capaces de poder atravesar objetos, es decir si existe algún objeto entre el emisor y transmisor habrá una interferencia de señal lo que provocará un corte de señal de datos.

Tabla 2.

Comparación entre la actual y futura tecnología inalámbrica.

Technology	Speed	Data density
Wireless(current)		
Wi-Fi-IEEE 802.11n	150 Mbps	*
Bluetooth	3 Mbps	*
IRDA	4 Mbps	***
Wireless(future)		
WiGig	2Gbps	**
Giga-IR	1Gbps	***
Li-Fi	>1Gbps	****

Tomado de (Khandal & Jain, 2014)

3 CAPITULO III. Canal de transmisión

3.1 Descripción del canal óptico

El canal de transmisión óptica el cual es usado por la tecnología Li-Fi, hace uso del espectro electromagnético a diferencia de la tecnología Wi-Fi, el cual usa el espectro de radiofrecuencia, este tipo de espectro ha venido presentando problemas de saturación por lo cual se ha propuesto esta alternativa al envío de datos por medio de la tecnología inalámbrica. El estándar IEEE 802.15.7, previamente mencionado, define que el canal consta de siete colores para la capa física PHY I en las comunicaciones por luz visible (VLC).

El espectro de luz visible es sensible al ojo humano y opera en un rango de 400 a 700 nm como se había mencionado previamente, por lo cual es permitido trabajar en dicho rango de longitud de onda para poder realizar el envío de datos por medio del canal óptico. (Biosca et al., 2017)

La tecnología inalámbrica de infrarrojo utilizada en ambientes interiores, hace uso de la alta disponibilidad del ancho de banda en las transmisiones ópticas con la movilidad que brindan los sistemas de radiofrecuencias que actualmente se

utilizan. Las comunicaciones ópticas inalámbricas tienen una ventaja de transmisión a corto y medio alcance al poder utilizar un mayor ancho de banda para transmisiones que requieran alta demanda del mismo.

El canal que se forma entre el emisor y receptor, es decir, el enlace, tiene como característica ventajosa el despliegue seguro del mismo debido a que cuenta con inmunidad de interferencia en celdas de comunicaciones contiguas porque la forma de transmisión de la señal óptica no puede traspasar obstáculos como las paredes gruesas.

El concepto de usar las lámparas LED como transmisor y punto de acceso es bastante ventajoso debido que se puede intercambiar información muy rápidamente sin la necesidad de realizar grandes cambios en la infraestructura que ilumina a distintos ambientes. Por ende, el canal de transmisión es una parte fundamental para lograr una comunicación óptica inalámbrica de calidad para poder explotar y garantizar que sus recursos sean utilizados de forma óptica.

Al hablar del principio del canal inalámbrico para transmisiones ópticas se puede decir que la detección directa de una modulación de intensidad es la técnica más acertada para realizar la transmisión de datos para casi todas las transmisiones de interiores, es decir, de corto alcance. (Arnon et al., 2012)

3.2 Configuración de parámetros para establecer el canal

Para poder clasificar los enlaces ópticos se deben tener en cuenta aspectos como el ángulo de direccionalidad que se tiene en el transmisor y receptor como también de si existe una ruta directa entre los mismo, para de esa manera poder obtener topologías de ambientes interiores como: guiados, no guiados e

híbridos. Por otra parte, si existe una ruta directa entre el receptor y transmisor se pueden obtener los enlaces infrarrojos inalámbricos puede clasificarse como: línea de vista (LOS) o sin línea de vista (non-LOS).

Los enlaces de tipo LOS mejoran la eficiencia energética como también reducen la distorsión por trayectos múltiples, es decir, cuando la luz rebota en objetos, por otra parte, los enlaces non-LOS aumentan la solidez del enlace debido a que su funcionamiento se basa en hacer uso de las superficies que son reflectantes tomando como provecho los obstáculos que existan entre el emisor y transmisor, de esa manera se permite que entre el receptor y el emisor no tengan una línea de vista directa necesariamente. (Arnon et al., 2012)

3.2.1 Fuentes Ópticas

Como fuentes ópticas se pueden tener dos tipos: el LED y el Diodo Laser LD, ambos tienen un rango de longitudes de onda en los que operan son entre 780 nm a 950nm. Para poder escoger entre el LED o el LD es necesario saber el tipo de aplicación en la cual se va a usar, LED es utilizado en aplicaciones de interiores de corta distancia sea de tipo LOS o non-LOS, las cuales requieren que soporte la movilidad del receptor debido a que no necesita una alineación minuciosa entre el transmisor y receptor también porque ese tipo de transmisor LED es económico y de larga duración en comparación a los LD permitiendo así que no cause efectos negativos al ojo humano.

Los diodos laser son usados en enlaces LOS guiados o dirigidos los cuales van a altas velocidades en ambientes exteriores debido a que el haz emitido de este tipo de fuentes es mucho más estrecho permitiendo así poder alcanzar mayores distancias, también los diodos laser pueden utilizar mayores tasas de modulación que los diodos LED permitiendo la transferencia de datos a una gran velocidad. (Biosca et al., 2017)

Cabe resaltar que implementar un circuito con el LD es más complejo que instalar un LED causando así una potencia emitida limitada debido a que el LD puede causar daños en el ojo humano siendo también muy sensibles a la temperatura.

Para la obtención del diagrama direccional que emite la fuente óptica depende del fabricante y para ser hallado se debe obtener la variable $F(\alpha)$ la cual es la función que describe el diagrama direccional del emisor considerando datos del fabricante.

El diagrama direccional del emisor o de la fuente óptica es descrita por la ley de Lambert generalizada siendo esta expresada en la ecuación 1 tomada de: (Rojas D, Cárdenas A, Morales J. 2017).

$$F(\alpha) = \cos^n(\alpha) \text{ Ecuación 1.}$$

Donde α hace referencia a la posición angular y n es el factor forma del lóbulo de emisión.

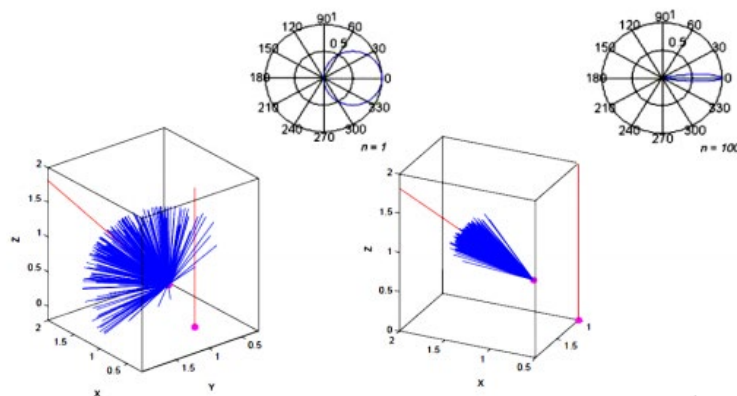


Figura 15. Patrones de direcciones emitidas por el emisor.

Tomado de (Rojas D, Cárdenas A, Morales J. 2017).

En la figura 15, se puede apreciar los distintos tipos de direcciones de radiación del lóbulo utilizando emisores de Lambert generalizados, proyectando así que el grado de direccionalidad aumenta según el factor forma n cuando este se hace mayor, es decir, cuando n es mayor se hace más estrecho el haz de luz.

Como información adicional se acerca de la seguridad ocular, los diodos laser tienen a generar problemas con el ojo humano por ende es preferible evitar su aplicación en sistemas de interiores debido a que la potencia óptica debe cumplir un régimen estricto para evitar este tipo de problemas. La IEC (comisión electrónica internacional) define los límites máximos de exposición. (Biosca et al., 2017)

3.2.2 Detector Óptico

Para empezar, la parte receptora debe contar con una alta capacidad de sensibilidad y fidelidad que transforme de óptico a eléctrico con otra serie de parámetros los cuales deben ser: eficiencia, amplia cobertura de detección, respuesta en tiempos muy cortos con bajo costo y alta confiabilidad, por lo cual se precisa hacer el uso de los fotorreceptores previamente mencionados los de tipo PIN y APD para que cumplan con la mayoría de requisitos expuestos.

Una de las razones fundamentales para la elección de esos diodos fotorreceptores es que su disponibilidad en el mercado es bastante amplia para poder adquirirlos. Por otra parte, un fotorreceptor tipo PIN no es nada complejo en estructura ni tampoco en emplearlo en un circuito, pero es menos sensible que uno de tipo APD con un aproximado de entre 10 a 15 dB menos sensible, dando lugar al fotodiodo APD como mucho más robusto en margen de potencia permitiéndole poder detectar la inexactitud de señales como también sus pérdidas. (Arnon et al., 2012)

Además, los fotodiodos APD necesitan un alto sesgo de voltajes y producen ganancia de corriente no lineal y sensibilidad a la polarización de voltaje inverso lo cual produce efectos de modulación de la interferencia de luz ambiente.

Para poder cuantificar el rendimiento de un fotorreceptor PIN se lo hace mediante el coeficiente de absorción el cual se simboliza con la letra griega α y también mediante la estructura como tal de este dispositivo, es importante considerar el ancho de banda del detector, para ello se utiliza la capacitancia del dispositivo el cual es el que limita la velocidad máxima de ejecución también con la ayuda de la resistencia dada por el receptor.

Para lograr aumentar la cantidad de luz en ambientes interiores de los sistemas ópticos inalámbricos es preferible usar fotorreceptores de un área amplia de recepción, pero esto a su vez genera más capacitancia y esto genera gran controversia en las investigaciones, considerando así que un detector tipo PIN es la implementación más barata y simple para este tipo de recepción de datos. (Arnon et al., 2012)

3.2.3 Filtros Ópticos

Al implementar el filtro óptico se pretende reducir o en casos eliminar el ruido que se introduce en la parte del receptor óptico causado por interferencias las cuales pueden ser las diversas iluminarias que se tienen producidas por otros dispositivos, para ello se pueden implementar 2 de las más comunes técnicas para minimizar el ruido producido por interferencias las cuales son: combinación filtro-detector y filtro óptico de película delgada la cual se ubica justo antes del fotorreceptor para reducir el ruido introducido.

El fotodiodo es capaz de responder a longitudes de onda inferiores a los 1100nm y los filtros pasan luz con longitudes de onda superiores a los 780nm. (Arnon et al., 2012)

3.2.3.1 Combinación Filtro-Detector

La aplicación de esta técnica de filtrado se basa en el uso de un material que posee características de paso largo por ejemplo del material GaAs el cual puede ser un sustrato, plástico o hasta un vidrio de color, con un detector de material de silicio. La combinación producida por estos materiales genera un comportamiento efectivo para ser considerado un filtro de paso de banda, compuesto por un borde creado por el roll-off como respuesta de la frecuencia del fotorreceptor y otro borde de la transferencia del material que lo filtra.

Al generar este filtro se puede obtener una banda de paso óptica de alrededor de 320 nm como resultado. (Arnon et al., 2012)

3.2.3.2 Filtro de película delgada

Esta técnica surge como alternativa a la anterior debido a que la combinación filtro-detector es muy amplia para aplicaciones que requieren una reducción máxima de ruido o también para aplicaciones que requieran alta velocidad de transmisión que usen espectro óptico estrecho.

Para esta técnica se emplea una película delgada como filtro colocada justo en la entrada del fotorreceptor para obtener mejores resultados para la reducción del ruido que se genera. El uso de varias capas o películas delgadas dieléctricas

se pueden combinar para proporcionar bandas de paso muy reducidas que se sitúan por debajo de 1nm. (Arnon et al., 2012)

Esta técnica de filtrado presenta un principal inconveniente y es que su respuesta depende mucho del ángulo de la luz entrante, por lo cual este efecto debe ser considerado al momento de realizar el diseño del extremo frontal óptico del receptor en especial cuando se lo va a utilizar en aplicaciones móviles.

Cuando se utilizan filtros ópticos cabe recalcar que para poder lograr maximizar la relación señal-ruido (SNR) en el fotorreceptor, el espectro óptico del emisor debe estar en la banda de paso del filtro.

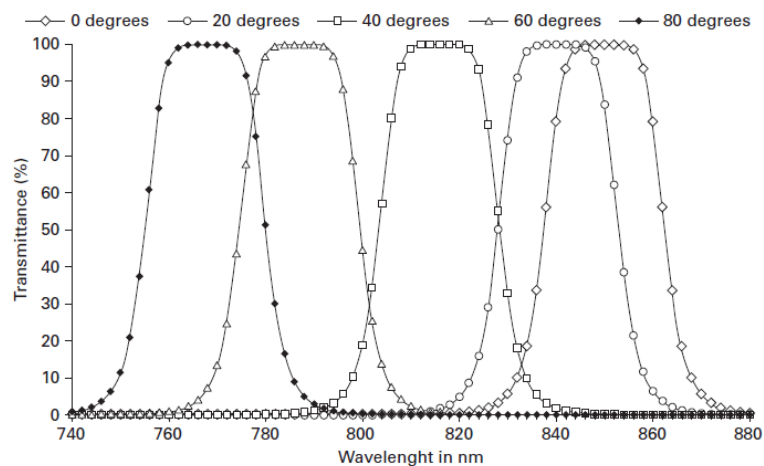


Figura 16. Transmisión angular característica de filtro película delgada banda paso.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012).

3.3 Dispersión del Canal

3.3.1 Canal de dispersión UV NLOS

En este tipo de canal se toma en cuenta la dispersión molecular como también la absorción, se considera una propagación de corto alcance en la cual no se toma en cuenta la turbulencia atmosférica debido a que no toma gran importancia en este tipo de propagación. (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012)

En las comunicaciones UV NLOS ultravioleta sin línea de visión, la dispersión es utilizada para el tráfico de información entre el transmisor y receptor, en su funcionamiento, la luz que esta dispersa que llega al receptor depende de la geometría del vínculo como también de las características de la atmosfera, la cual es propiamente ilustrada en la figura continuación:

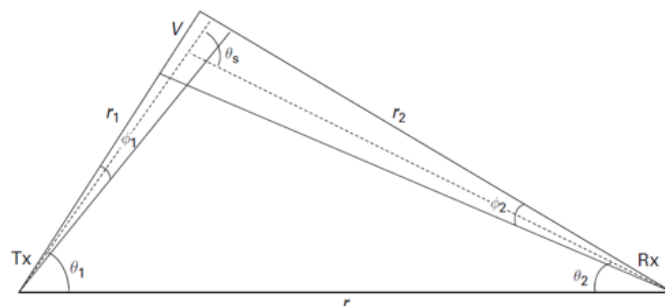


Figura 17. Transmisión de datos NLOS ilustrada por Reilly y Warde.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012).

3.3.2 Superficies Reflectoras

Existen distintos comportamientos que tienen las superficies reflectoras y para ello hay un caso ideal que es bastante común conocido como reflectores de Lambert que es caracterizado por simplificar el análisis sin pérdidas de generalidad debido a su coeficiente de reflexión.

Al ser el más común en los escenarios también existen más modelos por ejemplo el modelo TRM-B el cual contiene funciones de BRDF las que permiten la modelación de superficies reflectoras que sean distintas al del modelo de Lambert el cual es un difusor netamente. Por otra parte, también existe un modelo que tienen componentes especulares de importancia como es el caso del modelo *Phong*, *Blinn*, *Torrance-Sparrow* y varios más, los cuales podrían ser considerados al momento de realizar los requerimientos para el canal. (Biosca et al., 2017)

3.3.2.1 Algoritmo Monte Carlo Modificado

El algoritmo modificado de Monte Carlo se utiliza para generalizar el trazado de rayos en el modelo de reflectores TRM-B, hace que sea eficiente es su combinación de las técnicas parabólicas y determinísticas debido a que los rayos se disparan y se trazan de manera aleatoria desde que salen del transmisor y en cada reflexión se complica el cálculo de la ganancia de potencia que corresponde en el receptor.

El transmisor es considerado como una fuente extendida en el modelo de Lambert teniendo una potencia total simbolizada con $[P_s]$ y a sus rayos trazados con $[NR]$ a los cuales se les da una potencia inicial de lanzamiento con $[P_s/NR]$. Una vez que un rayo emitido choca con un obstáculo este se convierte en una nueva fuente emisora y a partir de este se trazan nuevos rayos, puede emitirse de forma repetitiva siguiendo el modelo BRDF de la superficie en la que haya incidido.

En cada una de las reflexiones generadas durante los rebotes en las superficies, se procede a realizar el cálculo del aporte de potencia al receptor y este proceso

tiene una duración hasta que el tiempo de vuelo denominado así al tiempo en el que los rayos están en el aire, supere el tiempo límite para poder considerar como respuesta al impulso que se desea calcular o hasta que el número de rebotes del rayo emitido exceda una cantidad máxima permitida denominada con el símbolo $[k]$ la cual es definida al inicio de estos cálculos, para lo cual se suele fijar un número máximo de 5 rebotes. (Biosca et al., 2017)

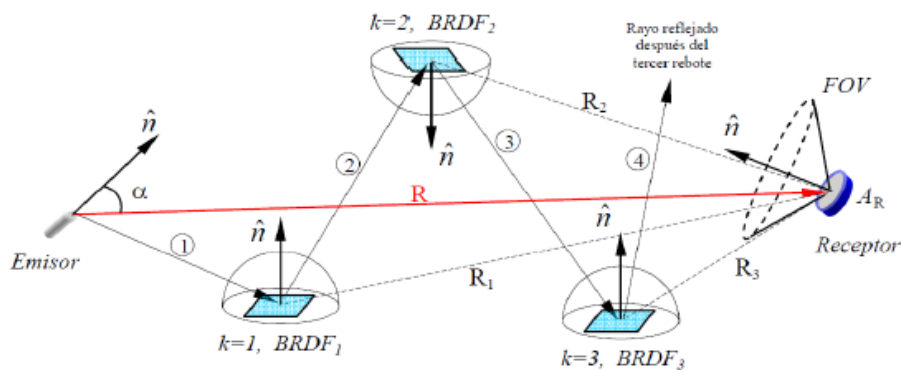


Figura 18. Trazado de rayos aleatorio en la comunicación.

Tomado de (Rojas D, Cárdenas A, Morales J. 2017).

3.3.2.2 Respuesta al impulso de línea visible

El impulso de línea con vista directa genera una respuesta al trazado de los rayos, basándose en que la emisión del transmisor irradia un patrón de intensidad modelado por Lambert siendo este el más común, se pueden realizar los cálculos apropiados basándose en que si no existe obstáculos se transmitirá un 1 como símbolo y caso contrario será un 0 como símbolo a transmitir.

3.3.2.3 Respuesta al impulso para múltiples Rebotes

La ecuación que define el aporte de un reflector simple sobre el receptor viene dada por la ecuación 2 tomada de: (Rojas D, Cárdenas A, Morales J. 2017).

$$dP_{Rx} = \frac{P_i}{R_2^2} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_{Rx}, \phi_{Rx}) \cos(\theta_r) A_r \cos(i_2) V(C_2, Rx) \text{rect}(i_2, FOV) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Para este caso en particular se debe definir una función que evalúe si este un obstáculo de por medio entre la superficie reflectante y el receptor de la señal para ello la función en cuestión es $V(C_2, Rx)$, donde C_2 es el elemento en donde incide el rayo sobre una superficie, además, la función $f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_{Rx}, \phi_{Rx})$ es la que modela BRDF (Función de distribución de reflectancia bidireccional) de la superficie reflectora.

Una vez especificadas las funciones se tiene en cuenta que en el modelo TRM-B, la reflectividad de diversas superficies que están actuando al momento de la reflexión y la interacción que tiene con la señal óptica propagada para posteriormente definir la respuesta al impulso de rayos propagados NR y una cantidad infinita de rebotes presentados según el modelo de TRM-B sería descrita por la ecuación 3 tomada de: (Rojas D, Cárdenas A, Morales J. 2017).

$$h^{(k, k \neq 0)}(t, Rx, Tx) = \sum_{i=1}^{NR} \sum_{k=1}^{\infty} dP_{Rx}^{(k)}(t) \quad \text{Ecuación 3.}$$

Los parámetros de aporte vienen dados por $dP_{Rx}^{(k)}(t)$ y se calculan por cada rayo propagado NR en los diferentes rebotes k dados que se quieran tomar en cuenta para el cálculo en cuestión y la respuesta del impulso viene representada en Watts. Para poder estimar el tiempo estimado del impulso está ligado a las dimensiones del lugar en donde se encuentra propagándose el rayo y para ello

se debe tener en cuenta que la distancia máxima que se puede propagar el rayo es de manera diagonal, este tiempo viene expresado por la ecuación 4 tomada de: (Rojas D, Cárdenas A, Morales J. 2017).

$$T = L \frac{(k + 1)}{c} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Ecuación que denota sus variables como T que representa el rango de tiempo para el cálculo del impulso, L la longitud principal del lugar donde se propaga el rayo, k el número máximo a estimar de rebotes y c como la velocidad de propagación de la luz que es una constante.

3.4 Ruido del Canal

El ruido es uno de los factores que degradan la señal propagada, además de la distorsión que se introduce al propagar la señal por el canal pero que a su vez el ruido es un término que representa muchas posibilidades de expresiones del mundo real, las cuales obstruyen el correcto rendimiento del sistema en cuestión.

En la subdivisión de las comunicaciones inalámbricas ópticas, es considerado que el ruido es una combinación de dos principales factores los cuales son: el ruido emitido o de salida y el ruido de interferencia, pero a pesar de ello el ruido está más relacionado al canal que a la señal como tal debido a que al momento de propagarse la señal por el canal se presentan factores que degradan la misma.

Es de esta manera que la cantidad de interferencia o ruido que llega al receptor depende de cómo este la configuración de la habitación en donde se propaga

como también sus las propiedades de reflectividad que tenga. Las propiedades del receptor vienen dadas por el rango de cobertura del fotorreceptor, el campo de visión FOV como también la posición y orientación que se tenga con respecto al emisor. (Arnon et al., 2012)

3.5 Fuentes de interferencia

En los sistemas de comunicación óptica inalámbrica siempre tienen interferencia de la luz las cuales pueden ser varias y estas a su vez interactúan para minimizar la relación de contraste efectiva o para aumentarla.

Al hablar de los efectos que tienen las características del canal al propagar la señal, se tienden a conocer las longitudes de onda en las que trabaja el emisor, siendo así que las propagaciones por comunicaciones infrarrojas, sus señales ocuparán un rango de frecuencias muy estrechas que funcionan típicamente entre 780 nm, 870 nm o 970 nm lo cual implica que la fuente de energía tiene un rango de longitudes de onda conocidas que están emparejados a sus receptores para que puedan comunicarse. (Arnon et al., 2012)

Los dispositivos infrarrojos son muy comunes de encontrar, por otra parte, también se tienen los dispositivos que son fuentes de luz de iluminación como tal los cuales son caracterizados por la constante interacción que tienen con el ojo humano como también sus propiedades eléctricas.

Las distintas fuentes de interferencia que se pueden encontrar en las comunicaciones ópticas inalámbricas son las siguientes:

- **Luz solar**

Este tipo de interferencia de luz es considerada como una constante en el elemento receptor, debido a que el sol es una fuente emisora de banda ancha espectral relativamente constante que se refleja en el receptor de un sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas, es así que se considera que induce un ruido emisor constante que genera en el receptor unos cientos de micro amperios de más.

- **Fuentes Artificiales**

Las fuentes artificiales de luz de 60 W no emiten toda su potencia en las longitudes de onda de en las que trabajan las comunicaciones ópticas inalámbricas, se considera que las fuentes de iluminación incluyendo el sol irradian de manera variable en el rango al que percibe un fotodiodo de silicio.

Al utilizar filtros de luz diurnas con una banda o longitud de onda menor a los 780 nanómetros, se reduce gran parte de la radiación de fondo que provocan estas fuentes artificiales, pero al estar encima de este rango las fuentes artificiales introducen ruido al canal. Este tipo de efectos producidos por la iluminación artificial han sido considerados comúnmente en los modelos de comunicaciones ópticas inalámbricas para poder ser reducidos.

Las lámparas incandescentes han sido progresivamente disminuidas en los hogares por razones de consumo energético, sin embargo, se suelen encontrar muchas en locales, oficinas o en residencias lo cual contribuye al ruido o interferencia en la tecnología óptica inalámbrica para sistemas de interiores.

Las lámparas fluorescentes son bastante utilizadas en las oficinas o locales comerciales, el material que compone este tipo de lámparas provoca efectos de ruido en el canal de aproximadamente 2 kHz. (Arnon et al., 2012)

3.6 Impacto de la interferencia en el BER

Para poder determinar el impacto en el BER (*bit error rate*) es posible incluir las fuentes de fondo artificial antes mencionadas, tomándolas como periódicas, es decir, constantes para posteriormente integrarlas en la expresión de cálculo del BER durante un periodo de tiempo. (Arnon et al., 2012)

3.7 Tipos de canal

Para las comunicaciones ópticas se hace el uso de frecuencias altas, mismas que en ciertas ocasiones tienden a ser difícil su modulación de fase y la frecuencia a la que se transmite la señal. Por otra parte, para ciertos sistemas ópticos modulan la intensidad de la señal, dichos sistemas son en consecuencia diferentes de los sistemas de comunicación inalámbricos estándar como lo pueden ser los sistemas móviles de comunicaciones.

Los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas emplean la modulación de amplitud de pulso (PAM) que para el caso de la comunicación óptica se denomina intensidad de pulso, en este tipo de esquema el emisor modula los bits de información en pulsos que viajan en tiempo continuo con una determinada duración para que posteriormente el receptor procese la llegada de la señal de tiempo continuo uniéndola en intervalos que no se sobrepongan. (Arnon et al., 2012)

Estos sistemas de tiempo continuo pueden ser modelados como canales de tiempo discreto, es importante recalcar que la velocidad de datos obtenida no se mide en bits por segundo [Bits/seg] pero si en bits por uso de canal.

Para poder calcular el rendimiento o capacidad de los distintos canales a detallar, se pueden emplear condiciones de *Karusk-Kuhn-Tucker*, las cuales consisten en hallar una solución a problemas de optimización los cuales están restringidos a una o varias igualdades. Considerando que las distribuciones de entrada son discretos con un número limitado de puntos de masa para poder alcanzar un buen rendimiento.

Para la estimación del rendimiento o capacidad del canal, se analiza de manera asintótica, existen diferentes zonas para estudiar el rendimiento. La primera capacidad del canal está en la zona asintótica de alta potencia en la cual, la potencia promedio y las restricciones de potencia máxima son extremadamente grandes y, por otra parte, la zona asintótica de baja potencia en la cual al menos una de las limitaciones de poder es muy pequeña.

Para el régimen asintótico de alta potencia se pretende calcular la capacidad hasta que una de las brechas tienda a alcanzar el cero, debido a que las potencias tienden al infinito, mientras que en el régimen asintótico de baja potencia se requiere calcular la capacidad hasta que un espacio que tiende a cero más rápido que la capacidad. (Arnon et al., 2012)

3.7.1 Canal de Poisson en tiempo discreto

En este tipo de canal, la salida de los datos es la suma de dos procesos estocásticos independientes, siendo de esta manera que el primer proceso lleva

a la entrada un condicional conocido como un proceso de Poisson doblemente estocástico en el cual la función velocidad es igual a la entrada.

Para el segundo proceso, es un proceso de Poisson homogéneo que explica resultados de conteos falsos de la radiación de fondo y también del ruido recibido en el receptor. Al realizar una modulación PAM que en este caso sería una modulación de intensidad de pulso, para esa función en el parámetro de entrada sería constante durante intervalos de tiempo también introduciendo un valor entero de longitud se podría adivinar la forma que tomaría la onda que se basa en la salida del canal.

En este tipo de canal se modela la entrada como una secuencia de datos no negativa simbolizada con $[x_k]$, donde x_k se refiere a la integral de la entrada de tiempo continuo durante un cierto periodo o intervalo previamente mencionado y se define como $[kT, (k + 1) T]$, para posteriormente realizar la modulación de la intensidad del pulso. La variable x_k representa el producto de T por la potencia de un instante de la señal emitida durante el intervalo definido.

A la salida se obtiene una secuencia denominada Y_k , donde dicha salida representa el número de recuentos registrados en el intervalo definido, adicionalmente se tiene un condicional a la forma de la onda emitida siendo esta que Y_k representada por una distribución de Poisson que cuenta con una media de $x_k + \lambda$, en donde se puede denotar que λ representa el número que se espera de conteos falsos en el intervalo definido como también en ciertas circunstancias se refiere a la corriente oscura.

Se considera así que el canal de Poisson de tiempo discreto es un canal sin memoria y que en su salida toma valores en el conjunto de enteros que no sean

negativos y en su entrada toma valores del conjunto de números reales no negativos (Arnon et al., 2012. p. 147)

Al hablar la capacidad del rendimiento del canal en tiempo discreto de Poisson este es desconocido, es más bien factible hablar del canal de Poisson en tiempo continuo en el cual la señal de entrada no se tienen restricciones de ser intensidad modulada de pulso debido a que la señal ha sido derivada de manera exacta.

Existen escenarios en los cuales se pueden realizar el cálculo del rendimiento del canal, por ejemplo, el primer escenario donde se tienen restricciones de potencia media y potencia máxima, ambas tienden a crecer proporcionalmente, lo que quiere decir que con un pico medio constante en relación de potencia.

Para el escenario en el que se tiene alta potencia asintótica habla del rendimiento que se tiene cuando se conoce que la corriente oscura es fija, esto quiere decir que cuando la potencia no tiende a infinito, por otra parte, cuando la corriente oscura crece proporcionalmente con la potencia se dice que cae en un caso en el que no se propone una restricción de potencia máxima.

La capacidad de potencia baja se propone para escenarios donde la corriente oscura es fija y positiva t para cuando no se tienda a 0 de manera proporcional a la restricción de potencia media, en otras palabras, con una relación constante. (Arnon et al., 2012)

3.7.2 Canal de intensidad óptica de espacio libre

Para este tipo de canal se tienen en consideración principalmente tres tipos de fuentes que producen interferencia o ruido:

La primera es el ruido térmico detectado posteriormente en el circuito seguido de la foto detección, lo cual está bien modelado por la distribución Gaussiana. La segunda interferencia o fuente de ruido es la intensidad relativa, este ruido modela las fluctuaciones de intensidad que son aleatorias inherentes a fuentes laser con bajo costo las cuales también se consideran como Gaussianas. La tercera fuente de ruido es la de disparo, ocasionada por la luz ambiental, este tipo de ruido ocasiona un impacto notorio solamente en grandes intensidades para lo cual su distribución tiende a ser Gaussiana también considerado como independiente de la señal.

Se considera que, a baja intensidad térmica, el ruido sería el factor limitante, es por ello que la suma de estos tres tipos de fuentes de ruido es fácilmente modelable como un ruido Gaussiana aditivo que es independiente y sin memoria, dando como resultado la ecuación 5 tomada de: (Arnon et al., 2012)

$$Y = x + Z \quad \text{Ecuación 5.}$$

En la cual, Y representa la salida del canal, X la entrada del canal la cual es proporcional a la intensidad óptica y por ende no puede tener valor negativo y Z representa al ruido aditivo que es Gaussiano de media cero con una varianza de σ^2 , es importante tener en cuenta que la salida Y si puede tener valores negativos a diferencia de la entrada que solo pueden ser positivos debido a que el ruido introducido en el receptor si puede tener valores negativos.

Para analizar el rendimiento de este canal, se analiza en el régimen asintótico de alta y baja potencia como también en límites no asintóticos de capacidad para dar potencias indistintamente, la relación de potencia promedio a pico de este régimen se mantiene fijo y de esa manera ambas potencias crecen o se dispersan de manera proporcional.

Al hacer uso de la simetría que tiene este canal, se puede ver que cuando la relación de potencia promedio excede la mitad de la restricción de potencia máxima, la relación de potencia promedio permanece inactiva, dando como resultado que la restricción potencia pico y la restricción de potencia media es igual a la capacidad de espacio libre. (Arnon et al., 2012)

3.7.3 Canal de intensidad óptica con ruido Gaussiano dependiente de la entrada

En este modelo se sigue manteniendo el formato de que en el receptor se tendrá ruido aditivo de tipo Gaussiano, pero con la variante de que la varianza del ruido depende ahora de la entrada del canal, de esta manera se pretende reflejar de mejor manera la dependencia implícita de la distorsión aleatoria en un canal óptico en la misma señal.

Es de esa manera que este modelo tiene la capacidad de combinar características de los dos anteriores modelos siendo estos la suposición del ruido gaussiano del canal de intensidad óptica de espacio libre y la característica de la doble estocástica que es dependiente de la señal proveniente del canal de Poisson en tiempo discreto.

Este canal viene descrito por la ecuación 6 tomada de: (Shlomi, Barry, Karagiannidis, Schober, Uysal, 2012).

$$Y = x + \sqrt{x}Z_1 + Z_0,$$

Ecuación 6

En donde Y es el resultado de la salida del canal, x es un valor positivo que es la entrada del canal, Z_0 es una variable aleatoria de tipo gaussiana de varianza media y Z_1 es una variable aleatoria de tipo Gaussiana de media unidad con varianza unitaria la cual describe la entrada que depende del ruido. En esta ecuación las variables Z_0 y Z_1 son independientes, es decir, no hay pérdida en general debido a que se asume que Z_1 es de varianza unitaria.

En este canal se propone el análisis del rendimiento del canal en el régimen de alta potencia y de baja potencia como también en los no asintóticos los cuales son los límites inferiores en la capacidad de las potencias arbitrarias. (Arnon et al., 2012)

4 CAPÍTULO IV. Modulación y demodulación para Li-Fi.

4.1 Modulación OOK

La modulación *On-Off key* es el más simple esquema que se implementa para las comunicaciones VLC, en el cual consiste que los LED's se prendan o se apaguen en base a los bits de transmisión los cuales pueden ser 1 o 0 donde se transmite de 5V y 0V respectivamente, al transmitir bits con valor 0 esto no representa que la luz está totalmente apagada, en ese caso la intensidad de luz se puede reducir pero no estar apagada del todo siempre y cuando se pueda distinguir notoriamente en los dos estados de apagado o encendido.

El modo de transmisión de datos es sincrónica y está sustentada en el diagrama en bloques de la figura 19 en la cual se puede observar que los bits de las capas superiores las cuales entran por el FEC antes de ser codificados con el algoritmo RRL Manchester, este código concentra el reloj en los datos al momento de representar un 0 lógico como símbolo de esta codificación OOK se tiene "01" y cuando se tiene un uno lógico se tiene el símbolo de OOK como "10", dando así como resultado un código DC equitativo. (Rajagopal et al., 2012)

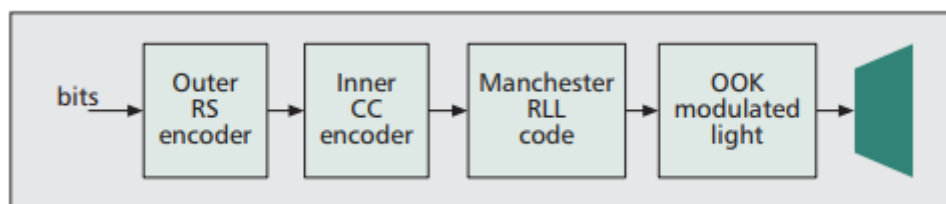


Figura 19. Diagrama de transmisión OOK.

Tomado de (IEEE 802.15.7 Comunicación por luz visible. 2012).

Para poder lograr la atenuación en OOK se deben redefinir los niveles de prendido o apagado del símbolo transmitido para poder obtener una intensidad más baja y por ende poder atenuar, otra manera de poder obtener atenuación es mantener los niveles iguales y el ciclo de trabajo promedio de la onda cambiarlo por medio de la inserción de tiempo de compensación en la onda de modulación. El tiempo de compensación consiste en realizar encendidos y apagados completamente desde la fuente de luz durante un tiempo determinado para de esa manera poder obtener atenuación.

Tabla 3.

Modos de operación de la capa física PHY I.

PHY I					
Modulation	RLC code	Optical clock rate	FEC		Data rate
			Outer code (RS)	Inner code (CC)	
OOK	Manchester	200kHz	(15,7)	1/4	11.67 kb/s
			(15,7)	1/3	24.44 kb/s
			(15,7)	2/3	48.89 kb/s
			(15,7)	none	73.3 kb/s
			none	none	100 kb/s
VPPM	4B6B	400kHz	(15,7)	none	35.56 kb/s
			(15,7)	none	71.11 kb/s
			none	none	124.4 kb/s
			none	none	266.6 kb/s

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012)

La modulación OOK es parte de un caso en específico de la modulación ASK, es por ello que un circuito demodulador de una señal ASK se lo puede utilizar para la recolección de datos modulados por OOK. Un circuito que puede ser utilizado para poder realizar la demodulación es el del circuito detector de envolvente como se muestra en la figura 20 (Del risco. A, Cruz. J. 2013).

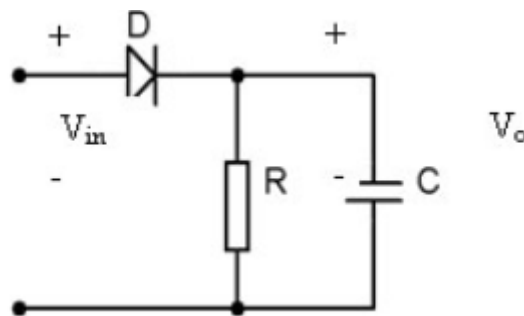


Figura 20. Detector de envolvente.

Tomado de (Del Risco. A, Cruz. J. 2013).

En la figura mostrada, se puede denotar que V_{in} es la tensión de entrada mientras que V_o representa la tensión de salida, el circuito expuesto está conformado por un diodo el cual, anula la unidad negativa de la señal previamente modulada y también de un filtro pasa bajo el cual se encarga de dejar pasar solamente las

variantes lentas de la señal, dando como resultado a la salida la envolvente que representa la señal ya modulada.

Al configurar la modulación OOK con parámetros como el que un uno lógico sea asociado como la oscilación y un cero lógico con nivel directo de 0 volts, también, utilizando un periodo de muestreo que concuerde con la tasa de transmisión de bits, mediante esta configuración es posible de detección de señales sean que existan o no.

Una característica que destaca de este demodulador es que, tiene la necesidad de sincronizarse con la señal modulada, para obtener la sincronización se debe verificar el primer intervalo de subida y a mitad del periodo de la señal moduladora empezar a realizar el muestreo tomando en cuenta que debe ser con una frecuencia que represente como resultado la tasa de transmisión.

Al realizar todos estos procesos de demodulación es posible re-sincronizar durante cualquier momento de la transmisión, para de esa manera poder evitar los retardos efectuados por la base de tiempo. (Arnon et al., 2012)

4.1.1 OOK-OCDMA

En este tipo de sistemas, el bit "1" se establece a chips secuenciales de longitud de código "L" en las cuales, las posiciones de chip peso del código "w" están dadas por la estructura del código cuando están en estado de encendido, mientras que los chips L-w restantes se encuentran apagados. Por otra parte. El bit "0" es asignado a los chips secuenciales "L cero".

Para realizar la ejecución de esta modulación es sencilla y además su rendimiento es aceptable en la mayoría de aplicaciones (Shlomi et al., 2012. p. 75). Una necesidad de la modulación OOK es poder obtener el cálculo del umbral óptimo en la estructura del correlacionador, lo que quiere decir que después de este, un *hard-limiter* debe decidir sobre el bit transmitido mediante la comparativa de energía determinada con el umbral óptimo.

Se ha podido demostrar en varias implementaciones que en algunas aplicaciones la ganancia del receptor es bastante sensitiva al umbral, en casos particulares cuando la potencia recibida no es lo suficientemente alta. Por ejemplo, cuando en los enlaces ópticos de espacio libre hay una diferencia notable del rendimiento de los sistemas con y sin el umbral adaptativo.

Para poder obtener la evaluación del rendimiento, solo se debe tomar en cuenta el ruido MAI (interferencia de acceso múltiple) y así poder conseguir los límites del rendimiento para distintos sistemas que usen OCDMA y estén basados en modulaciones OOC (*optical orthogonal codes*) en sistemas OCDMA.

En un sistema que tenga “N” usuarios, en el cual cada usuario se le asigna un código ortogonal óptico (OOC) con un peso de código “w”. una longitud de código “L” y un coeficiente de correlación $\lambda = 1$, se puede determinar la probabilidad de error en la modulación OOK con la siguiente ecuación 6 tomada de: (Shlomi, Barry, Karagiannidis, Schober, Uysal, 2012).

$$P_{e/OOK} = \frac{1}{2} \left[1 + \sum_{k=1}^w (-1)^k \binom{w}{k} \left(1 - k \frac{w}{2L} \right)^{N-1} \right].$$

Ecuación 6.

4.2 Modulación PPM

La modulación por ancho de pulso es comúnmente utilizada en aplicaciones para el control de los colores de un LED RGB, describe una señal digital que para la cual se puede variar el tiempo de la misma, es decir, pasar de un estado alto a bajo o viceversa con voltajes de 5V o 0V respectivamente, también permite modificar el ancho del pulso que se proporcione en función del tiempo.

El ciclo de trabajo de esta modulación se maneja en el tiempo, para el cual si el ciclo de trabajo trabaja al 100% quiere decir que transmite 5v en constante, por otra parte, cuando el ciclo de trabajo está en 0% sería equivalente a conectar a tierra.

Para referirse a la cantidad de tiempo se tiene el termino ciclo de trabajo, este es medido en porcentajes y representa concretamente el porcentaje de tiempo en el que la señal digital permanece en estado “alto” dentro de un intervalo de tiempo. Para el cálculo del periodo se tiene que es el inverso de la frecuencia de la onda, se tiene que, si la señal digital pasa la mitad de tiempo en estado “encendido” y la otra mitad faltante en estado “apagado”, se tiene un ciclo de trabajo del 50% es decir la mitad que representa a una onda cuadrada ideal (Paguayo. 2019).

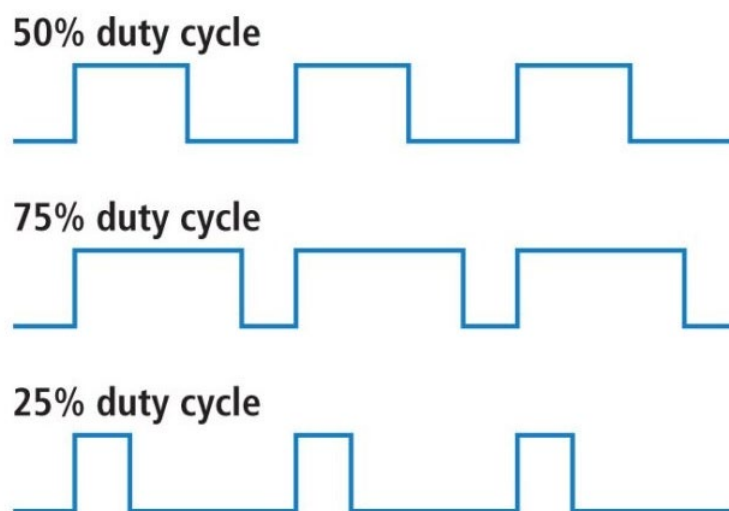


Figura 21. Ondas de ciclos de trabajo.

Tomado de (Paguayo. 2019).

4.2.1 Modulación VPPM

La utilización de la técnica PPM que significa modulación de posición de pulso ha sido propuesta para el soporte de la atenuación de las comunicaciones por luz visible VLC. Por otra parte, la modulación por posición de pulso variable es el encargado de cambiar el ciclo de trabajo de los símbolos ópticos para poder codificar los bits.

La modulación VPPM simboliza el cambio del ancho de pulso en respuesta al nivel de atenuación requerido, los símbolos ópticos de la modulación VPPM se pueden distinguir por la posición en la que se encuentre el pulso, es decir, los símbolos lógicos 1 y 0 tienen un ancho de pulso modulado según sea el ciclo de trabajo solicitado. (Rajagopal et al., 2012)

Tabla 4.

Modos de operación de la capa física II.

PHY II				
Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC	Data rate
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)	1.25 Mb/s
			RS(160,128)	2 Mb/s
		7.5 MHz	RS(64,32)	2.5 Mb/s
			RS(160,128)	4 Mb/s
OOK	8B10B	15 MHz	none	5 Mb/s
			RS(64,32)	6 Mb/s
		30 MHz	RS(160,128)	9.6 Mb/s
			RS(64,32)	12 Mb/s
		60 MHz	RS(160,128)	19.2 Mb/s
			RS(64,32)	24 Mb/s
		120 MHz	RS(160,128)	38.4 Mb/s
			RS(64,32)	48 Mb/s
			RS(160,128)	76.8 Mb/s
			none	96 Mb/s

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012)

La trama de transmisión en modulación VPPM se muestra en la figura 22, en la cual consiste en que la entrada se envía por medio de un codificador RS FEC para de esa manera evitar errores es decir, es una protección contra los errores, posteriormente un código 4B6B es seguido para generar equilibrio de CC como también la mitigación del parpadeo, este tipo de codificación 4B6B realiza la toma de un símbolo al azar de 4 bits y lo cambia a un código DC de 6 bits balanceado. Los conteos de ceros y unos en cada símbolo codificado por VPPM siempre darán como resultado 3 porque la velocidad de bits es constante independientemente del nivel que tenga la atenuación requerida.

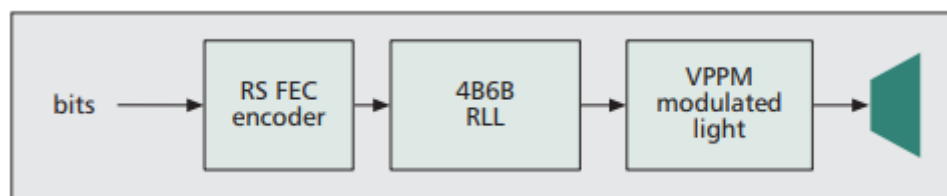


Figura 22. Diagrama de transmisión VPPM.

Tomado de (Rajagopal, Roberts, & Lim, 2012).

4.2.2 M-ary PPM OCDMA

Esta modulación como OOK-OCDMA, es parte de la comunicación en sistemas IM/DD (modulación de intensidad / detección directa), en la que los pulsos ópticos son transmitidos en periodos de tiempo más cortos y en distintos símbolos que se diferencian al separar el dominio del tiempo.

La modulación M-ary PPM es bastante eficiente en energía, pero, por otra parte, no lo es en ancho de banda comparándolo con OOK. Para la implementación de esta modulación en un sistema OCDMA, cada intervalo de símbolo de usuario llamado "slot" es dividido en "M" intervalos de distribución donde cada intervalo podría tener el código OOC correspondiente (Arnon et al., 2012. p. 75).

Para poder enviar un símbolo "mth" del usuario OOC, el mismo se debe ubicar en el intervalo "mth" correspondiente y tendrá un estado de "encendido" y los restantes permanecen en estado "apagado", en el lado de la recepción se captura la energía correlacionada durante la duración de cada símbolo, al máximo es considerado como el símbolo transmitido.

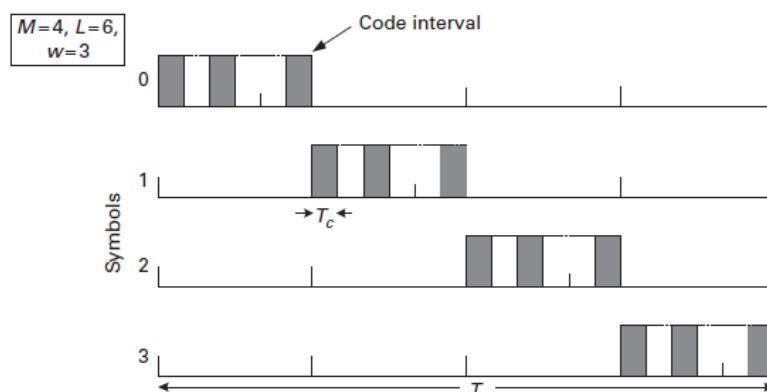


Figura 23. Símbolos transmitidos en M-ary PPM OCDMA con 4 símbolos.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012).

4.3 Modulación CSK

La modulación CSK, que significa modulación por desplazamiento de color es usada en sistemas de iluminación de tipo LED RGB, al realizar mezclas de diferentes colores los datos que son emitidos pueden ser transportados con el mismo color generado para de esa manera poder mantener la intensidad de salida constante, el uso de los LED's multicolor son el principio de la modulación CSK.

Este tipo de modulación de cambio de color se asemeja al cambio de frecuencia en el que los patrones de bits son codificados en combinaciones de color lo cual sería un símil con la longitud de onda. Para poder realizar la definición de varios colores para la comunicación por luz visible VLC, el estándar 802.15.7 ha dividido el espectro en 7 bandas de color para de esa manera poder proporcionar soporte a múltiples opciones de color para el LED. (Rajagopal et al., 2012)

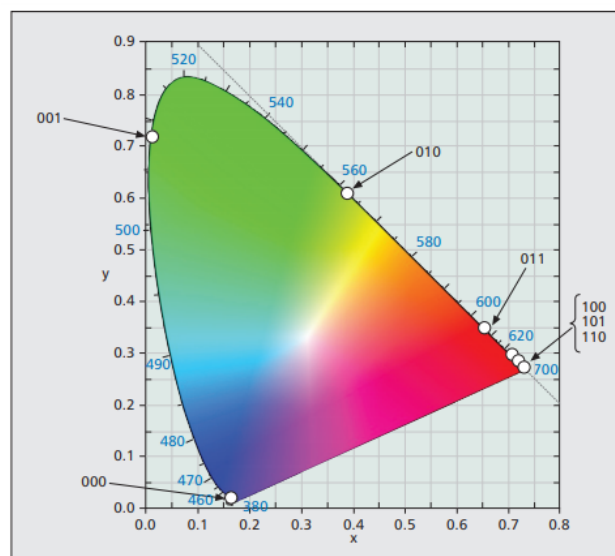


Figura 24. Modulación CSK, ubicación de coordenadas en el plano x, y.

Tomado de (IEEE Computer Society, 2011).

En la figura 24 se puede observar el centro de las siete bandas de color en las coordenadas X y Y según lo definido por las coordenadas de color CIE 1931, por lo cual se puede observar que los valores de 3 bits representan cada una de las siete bandas para poder generar la señal modulada en CSK haciendo uso de tres distintas fuentes de luz con color pertenecientes a las siete bandas de color definidas. Al observar la figura 5 se tienen 3 vértices los cuales representan la longitud de onda central de las tres bandas de color en las coordenadas X y Y.

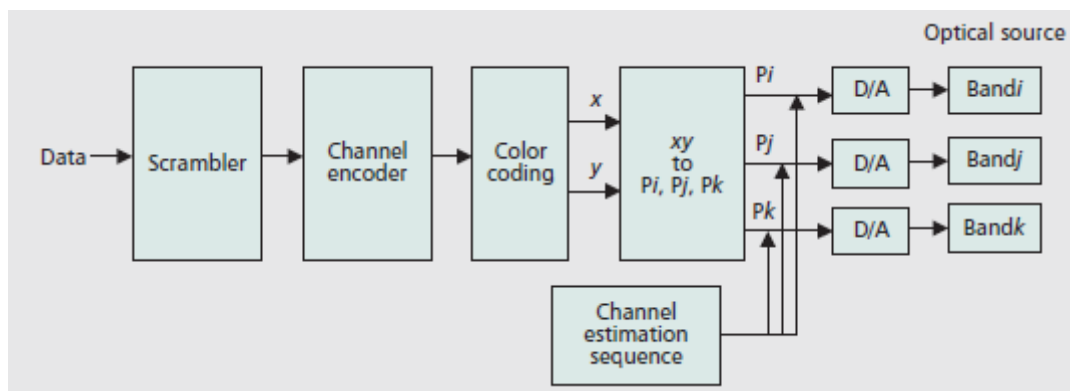


Figura 25. Diagrama de transmisión CSK.

Tomado de (IEEE 802.15.7 Comunicación por luz visible. 2012).

Las características que presenta este tipo de modulación son los siguientes:

- El o los canales CSK están definidos por la composición de los colores que están asignados en el plano que definen los colores como está en la figura 24.
- La potencia resultante de las distintas fuentes de luz con CSK es constante debido a que la atenuación que maneja esta modulación asegura que la potencia óptica de las fuentes de luz se mantenga

constante y también mantiene la intensidad que requiere el color central de la constelación de color.

- La modulación CSK permite cambios de amplitud mediante el uso de conversores de digital a analógico el cual proporciona soporte para la variación de velocidad de datos y brindar un orden para atenuar datos de alta frecuencia a más baja frecuencia de reloj óptico.

Tabla 5.

Modos de operación de la capa física PHY III.

PHY III				
4-CSK	none	12 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
8-CSK	none		RS(64,32)	18 Mb/s
4-CSK	none	24 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
8-CSK	none		RS(64,32)	36 Mb/s
16-CSK	none		RS(64,32)	48 Mb/s
8-CSK	none		none	72 Mb/s
16-CSK	none		none	96 Mb/s

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012)

En cada modo de operación de las capas físicas (PHY), se tiene una frecuencia de reloj óptico asignado, al cual se le divide para los distintos esquemas de codificación previamente mencionados, que en este caso son: RS, Manchester, 4B6B pertenecientes a los *RLL codes*, para los cuales tienen valores predefinidos para ser divididos dependiendo si será para aplicaciones internar (*Inner code CC*) o si serán para aplicaciones externar (*Outer code RS*) y de esa manera poder obtener las velocidades de datos finales según se muestran en las tablas 3, 4 y 5. (Rajagopal et al., 2012)

4.4 Modulación QAM

La QAM, que significa modulación de amplitud en cuadratura (QAM), se considera como una práctica que traslada dos señales distintas y las modula en amplitud como también en fase de una señal portadora, su proceso de modulación consiste en modular de forma independiente dos señales portadoras que están en la misma frecuencia, pero con la diferencia de estar desfasadas entre sí a 90° .

El resultado obtenido de modular la señal en QAM, es mediante la suma lineal de las dos señales mencionadas, estas por otra parte, pueden operar en el mismo canal sin generar interferencia entre sí debido a que sus portadoras cuentan con el desfase y se considera en cuadratura. Estas dos ondas por lo general tienen una forma sinusoidal en las cuales, una es la portadora y la otra es la señal que tiene los datos.

El flujo de los datos es en binario y estos ingresan en serie los cuales posteriormente serán distribuidos en M símbolos, para los cuales cada uno de estos símbolos tienen un número representado como K que representan el creciente número de entrada, que se irán ordenando en una matriz y cada símbolo está a una distancia equitativa uno del otro. (Hanzo, Ng, Keller, & Webb)

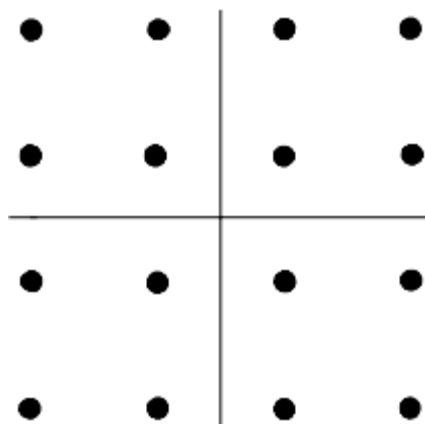


Figura 26. Constelación cuadrada QAM.

Tomado de (L. Hanzo, T. Keller, W.T. Webb, s. f).

La forma que se construye en el plano es conocida como constelaciones, para poder formar constelaciones ordenadas se lo realiza con la formula $M = 2^m$, donde se puede denotar a “m” como un número entero positivo y da como resultado a constelaciones conocidas como 4-QAM, 16-QAM, entre otras.

La modulación QAM se tienen dos tipos: la modulación analógica y la modulación digital. En la modulación digital, la entrada de datos es dividido en dos tramos, para el primero, un convertidor el cual es en Serie-Paralelo (S/P) que es seguido por dos conversores digital-analógico (D/A), las señales atraviesan posteriormente por filtros de pasa-baja (LPF) para posteriormente ser multiplicadas por la misma portadora con frecuencia denominada como “Fsc” que, a su vez, esta es desfasada a 90° .

Posteriormente como ocurre también en la modulación analógica de QAM, se generan dos señales las cuales serán enviadas, a dichas señales se suman linealmente y son enviadas hacia el canal de transmisión. (Hanzo et al., s. f)

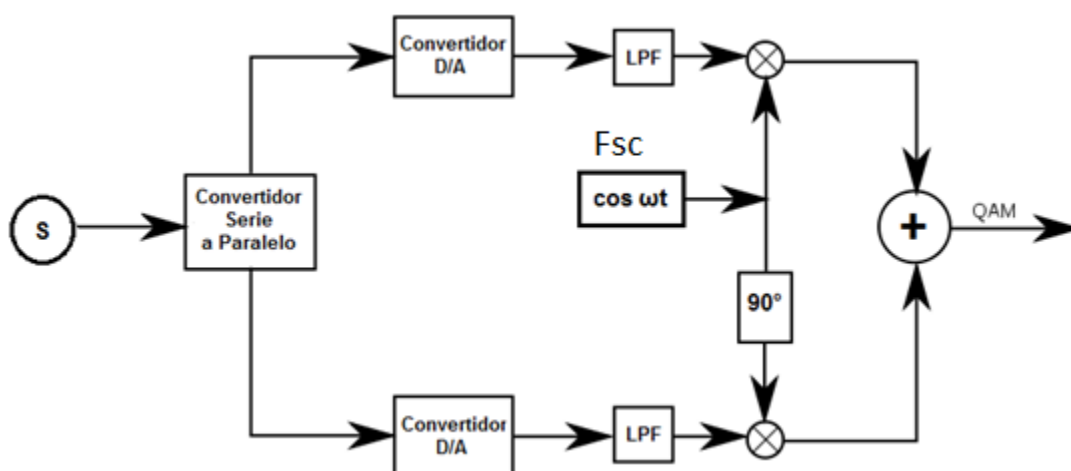


Figura 27. Modulador digital QAM.

Tomado de (Técnicas de modulación digital, 2013).

En la parte del demodulador QAM se tiene que la señal se recibe en dos caminos, con la ayuda del divisor de potencia (DIV), cada camino cuenta con un demodulador de la operación de multiplicación que está sustentado por la señal de un oscilador local, además está sincronizado por un circuito de recuperación de portadora, dicha señal tiene un desfase de 90° .

Se tiene que, en la salida de los demoduladores, las señales son tratadas mediante el uso de filtros pasa-bajo para de esa manera poder mermar los múltiplos de los armónicos que produce la señal producida por el oscilador local para posteriormente pasar a ser convertidas a digital y por último combinar los flujos digitales de los datos en el convertidor Paralelo-Serie (P/S).

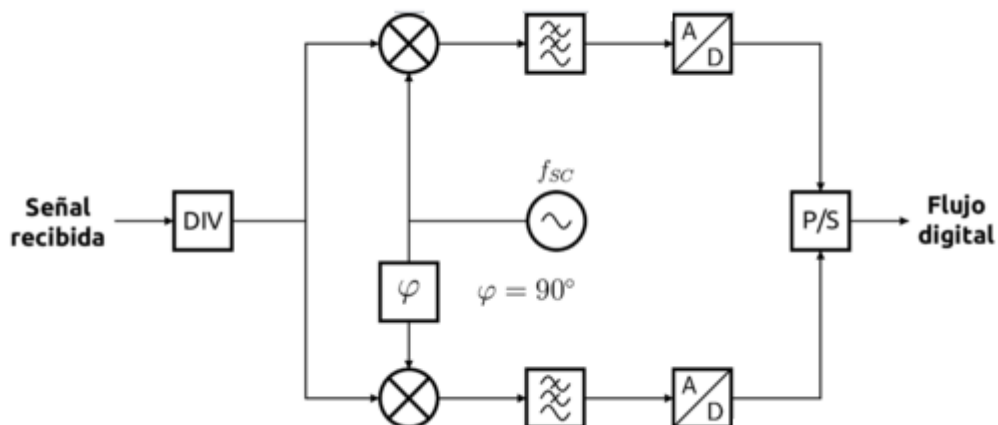


Figura 28. Demodulador digital QAM.

Tomado de (Técnicas de modulación digital, 2013).

4.5 Modulación espacial (SM-OFDM)

La modulación espacial OFDMA, es utilizada en sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), para poder mejorar el rendimiento del sistema, también se identifican por realizar un mapeo el cual se coloca previo al proceso OFDM y, además son usados como guías para notificar al sistema la cantidad de antenas por el cual se produce la transmisión de los datos.

A los símbolos transmitidos se les realiza un mapeo, a partir de este mapeo se forma la matriz $[m' \times N]$, donde "m'" representa el número de bits en cada símbolo más el número de transmisores, "N" representa el número de subportadoras que el sistema obtendrá (Meslesh R, Ganesan S, Hass H. 2007).

Cuando la matriz esté formada, se continua a realizar el mapeo para la modulación espacial, un proceso en el cual se determina el número de elemento transmisor por el cual se manda la información y se asigna un símbolo para posteriormente realizar la combinación de bits.

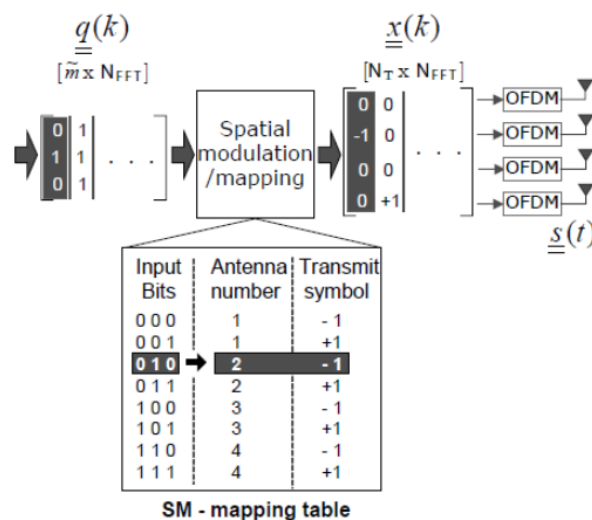


Figura 29. Modulación SM-OFDM

Tomado de (Melesh R, Ganesan. S, Haas. H. 2007).

Al finalizar el proceso de combinación binaria, se asigna un valor específico el cual permitirá obtener el número de elemento por el cual se enviará como también el valor del símbolo de cada bit. A partir de ello, se obtendrá una nueva matriz la cual según la figura 29 es $x(k)$ formada por $[NT \times N]$, para la cual NT representa el número de transmisores que serán usados en el sistema, mientras que N indica el número de subportadoras.

La matriz mencionada, se irá llenando de valores que fueron mapeados como se mencionó previamente y se obtendrá el valor de símbolo como también el número de elemento transmisor.

Tomando como referencia la figura 29, la combinación 010 el cual tiene el símbolo -1 y como antena transmisora 2 entonces, el valor del símbolo se coloca en la columna 1 y en la fila 2 y para las restantes columnas se rellena con ceros y ese mismo método se usará en los siguientes valores a mapear. Como último paso en el proceso de modulación es completado mediando la multiplicación por división de frecuencia ortogonal.

La demodulación SM-OFDM ubicada en la parte de la recepción, se debe considerar el análisis del canal y la respuesta al impulso. Para pasar a formar la matriz representada como " $y(k)$ " perteneciente a $[NR, N]$, se tienen los parámetros como: el número de antenas receptoras y las de subportadoras, " NR " representa el número de receptores mientras que " N " es el número de subportadoras.

Deben ser implementados procesos inversos para el sistema OFDM y poder conseguir los símbolos proporcionados al ser emitidos, realizar el mapeo inverso y formar la matriz $x'(k)$, permitirá obtener los valores "1" y "0" los cuales forman

la matriz $q'(k)$ y de esa manera recuperar los datos enviados. (Zhang, Dimitrov, Sinanovic, & Haas, 2012)

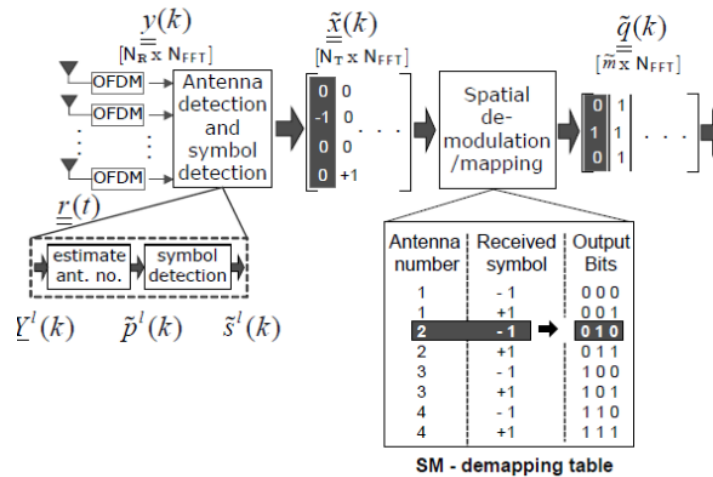


Figura 30. Demodulación SM-OFDM

Tomado de (Melesh R, Ganesan. S, Haas. H. 2007).

4.6 (O-SM-OFDM) Modulación espacial óptica OFDM

La modulación espacial, tiene un esquema para implementar en sistemas de múltiples entradas con múltiples salidas (MIMO), también hace uso de los transmisores para poder enviar bits que con información adicional.

Este tipo de modulación es perfectamente combinable con la técnica de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), utilizada en sistemas inalámbricos en el dominio de la radiofrecuencia (RF). (Zhang et al., 2012)

Mediante experimentos, se ha podido demostrar que mediante la explotación de la alta relación de potencia pico a promedio en los sistemas OFMA, es factible

mejorar considerablemente las velocidades de transmisión de datos en los sistemas ópticos inalámbricos, es posible esta combinación debido a que la detección de bits en el dominio espacial, solo es necesario una señal de potencia.

Al combinar la modulación espacial con la óptica, se puede hacer uso de más de un dispositivo transmisor LED, para de esa forma poder transmitir información a mayores velocidades, lo cual es lo que pretende Li-Fi.

En el proceso de modulación, el flujo de bits en la entrada es restaurado y colocado en una nueva matriz $Q(p) = [N \times m]$, para la cual "N" representa el número de subportadoras en OFDM y $m = \log_2(MN_t)$, donde: "M" es el tamaño de la constelación M-QAM, "N_t" representa el número de transmisores, recordando que este sistema es para sistemas MIMO.

Con esta primicia, los bits colocados en la primera columna de la matriz $Q(p)$, indican el índice de transmisores, entonces, para poder identificar que LED será el que transmite se tiene un arreglo en la matriz que indican las combinaciones; cuando el primer bit de la primera columna es cero, esto indica que los bits restantes serán enviados a través del primer LED, por otra parte, cuando dicho valor es igual a uno, entonces esto quiere decir que los bits serán enviados por el segundo LED.

Para los bits restantes en las otras columnas, serán transformados en símbolos complejos que forman la constelación M-QAM, por ejemplo, basándose en la figura 31 se puede observar en la primera fila de la matriz $Q(p)$ se tienen los bits [1 | 01], lo que esto indica es que la parte "0 1" será un símbolo de la constelación QAM dando como resultado $-1 + i$ esto mediante el mapeo de Gray, dicho

símbolo será ubicado en la primera posición de la matriz $X_2(n)$ que representa el segundo LED y $X_1(n)$ es el primer LED.

Cuando se ha determinado por cual LED se va a transmitir, la otra matriz del LED transmisor se le dará un valor de cero, como resultado final de este mapeo se tienen dos vectores complejos, representados en la figura 31 como $X_1(n)$ y $X_2(n)$, posterior a este proceso, se trasladan los vectores hacia un modulador óptico OFDM, para ello se pueden aplicar las técnicas de ACO-OFDM y DCO-OFDM con la finalidad de determinar símbolos positivos y de valor real.

Para entender de mejor manera las técnicas de ACO-OFDM y DCO-OFDM, se tiene que, para la primera técnica, los símbolos $(N/4)$ QAM son asignados a la mitad de las subportadoras que en este caso sean impares, mientras que las subportadoras pares se les asigna en cero. Por otra parte, para DCO-OFDM los símbolos $(N/2-1)$ son colocados en la mitad de las subportadoras, mientras que la primera subportadora (subportadora DC) es asignada cero.

Para la parte receptora, mediante el bloque de conversión analógica a digital, la señal de los fotodiodos pasa a formar parte de las matrices $Y_1(n)$ y $Y_2(n)$, donde serán demodulados por el demodulador O-OFDM, el cual implica que a los símbolos OFDM receptados deben pasar por una operación de la transformada rápida de Fourier (FFT) el cual como resultado da una conversión de símbolos en el dominio de la frecuencia. Los símbolos resultantes serán ubicados en las nuevas matrices de recepción $Y_1(n)$ y $Y_2(n)$.

Una vez formados los vectores $Y_1(n)$ y $Y_2(n)$, el bloque de *Zero Forcing* (ZF), es usado para poder revertir los desvanecimientos del canal MIMO para poder recuperar los símbolos transmitidos en $X_1(n)$ y $X_2(n)$. Por último, paso se tiene

que el demodulador espacial realiza una comparación de los valores absolutos de las subportadoras para poder recuperar la señal transmitida.

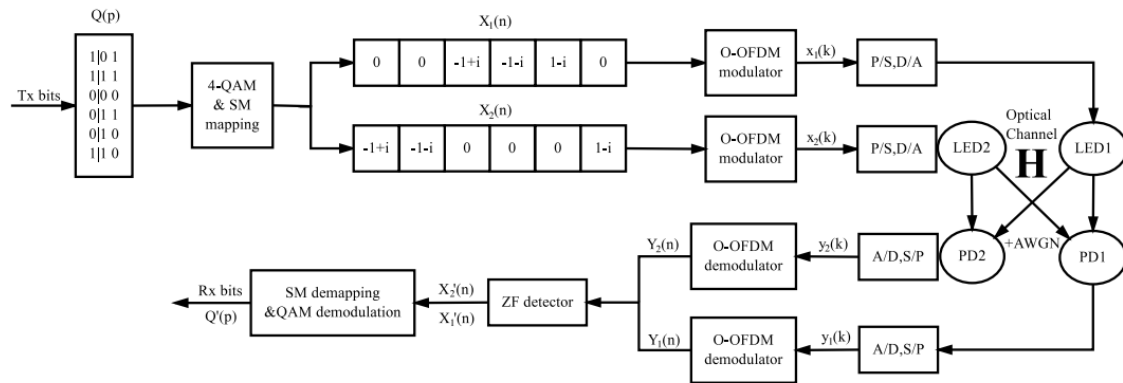


Figura 31. Proceso de modulación y demodulación de O-SM-OFDM.

Tomado de (Li. Y, Tsonev. T, Hass. H. 2014).

4.7 (SIM-OFDM) Modulación por índice de subportadora OFDM

La principal característica de esta modulación es que al flujo de bits transmitido normalmente en los sistemas OFDM en un solo vector, lo divide en dos vectores de igual tamaño, los cuales son: B-OOK y B-QAM, para B-OOK el número de bits es igual al tamaño de la transformada rápida de Fourier (FTT) (Abu-alhiga. R, Haas. H. 2009).

Este sistema implementa un bloque el cual es el modulador de índice de subportadora, este módulo cumple con dos funciones esenciales. La primera, se basa en el valor que tiene cada bit en la matriz B-OOK en donde, este modulador forma dos subconjuntos de unos y ceros, en este caso se determina el bit que más es transmitido sea el 1 o el 0 dependiendo del caso.

La segunda función consiste en que una vez determinado el bit de mayor transmisión, en la posición que se encuentre dicho bit con mayor frecuencia de transmisión se selecciona y pasan a ser modulados por el segundo vector B-QAM la cual es de subtransmisión de bits y estos están en estado activo. Por otra parte, los bits restantes son suprimidos antes de la modulación, es decir, están desactivados. B-OOK es usado como un sistema OOK para poder activar las subportadoras que contengan el mayor bit de transmisión que en otras palabras es denominado como bit mayoritario.

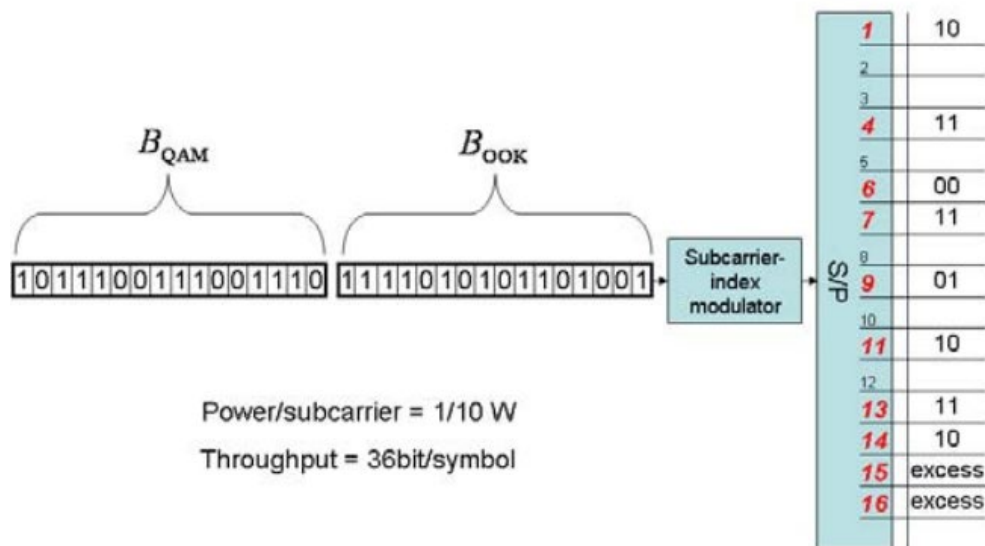


Figura 32. Modulación por índice de subportadora OFDM.

Tomado de (Abu-alhiga. R, Haas. H. 2009).

En la parte del demodulador, la señal es recibida y pasa el bloque del marco de sincronización, posteriormente al bloque donde se realiza la operación de la transformada rápida de Fourier para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, los datos pasan por el demodulador SIM-OFDM en donde se realizan los procesos inversos al de transmisión que en este caso eran los de

OOK y M-QAM para posteriormente ir al conversor paralelo a serial y obtener la señal de salida resultante.

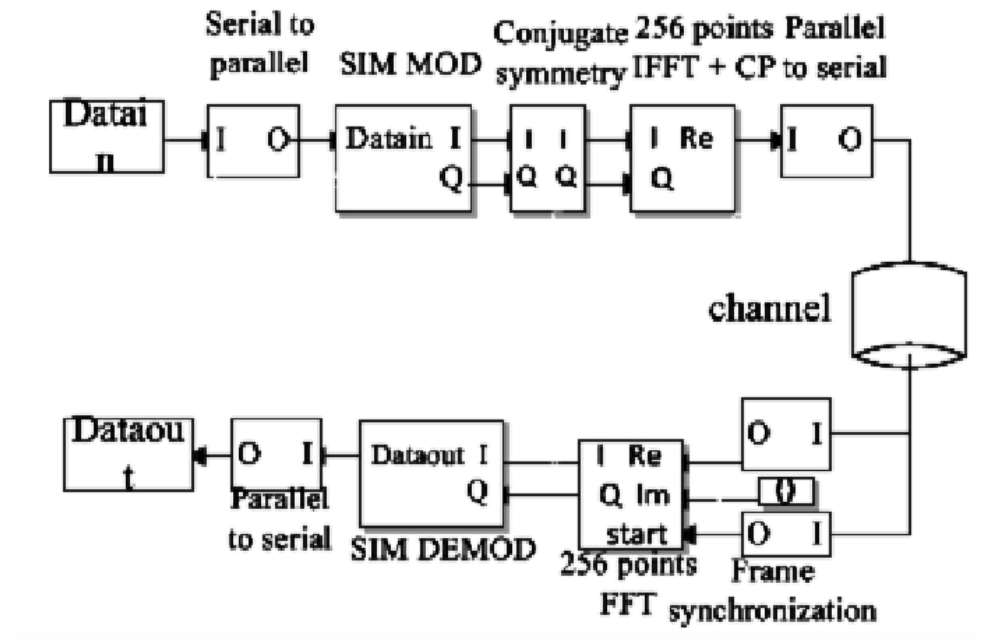


Figura 33. Diagrama de bloques para SIM-OFDM

Tomado de (Mefenza. M, Bobda. C. 2013).

5 CAPÍTULO V. Técnicas de multiplexación para Li-Fi

5.1 Sistema CDMA

El sistema *Code division Multiple Access* (CDMA) es basado en la técnica de *spread spectrum* que en español es el espectro ensanchado, esta técnica consiste en utilizar un ancho de banda superior todo el tiempo, al que se necesita normalmente para transmitir datos.

En este tipo de tecnología, se multiplexan una cantidad determinada de usuarios y acceden al medio de manera simultánea y de manera asíncrona a un canal y se modulan como también se expanden todas sus portadoras de las señales en sucesiones asignadas previamente.

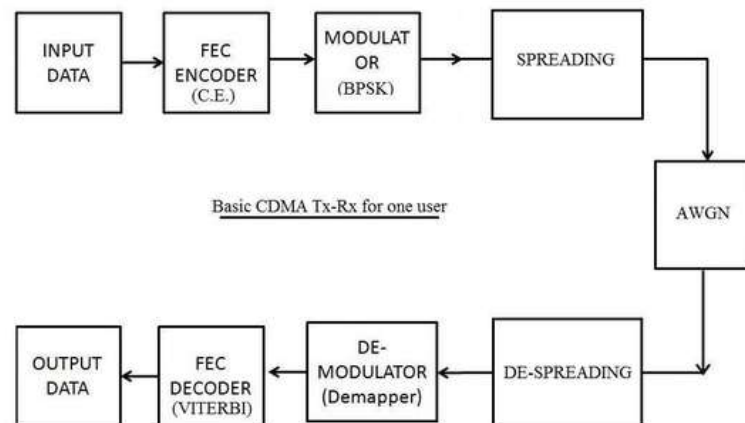


Figura 34. Transmisión y recepción de datos CDMA.

Tomado de (*RF Wireless Word*, s. f.-a).

En cuestiones de probabilidad de error, se considera como ruido blanco al tener que la señal que interfiere posee un ancho de banda más alto que la de la señal ensanchada resultante, por ende, en este tipo de sistemas CDMA que tienen el espectro ensanchado, se tiene que poseen la misma probabilidad de error que se tiene en un canal de ruido blanco Gaussiano AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

5.1.1 Sistema óptico inalámbrico OCDMA

En este sistema al igual que en el tradicional CDMA, cada usuario envía sus datos mediante su código propio, dichos códigos pueden estar compuestos de

distintos dominios, por ejemplo, en el tiempo, en longitud de onda, polarización, espacio o mediante la combinación de ellos. (Arnon et al., 2012. p 56)

Para las comunicaciones ópticas inalámbricas, es considerado el dominio del tiempo para la asignación de los códigos de los usuarios. Para la transmisión de bits en este sistema, se asigna en secuencia de “1” y “0” en el dominio del tiempo para así poder construir el código pertinente para cada usuario. Dichos códigos son considerados como “semi-ortogonales”, lo que quiere decir que la correlación en la parte receptora, es capaz de distinguir los bits pertenecientes a los diferentes usuarios.

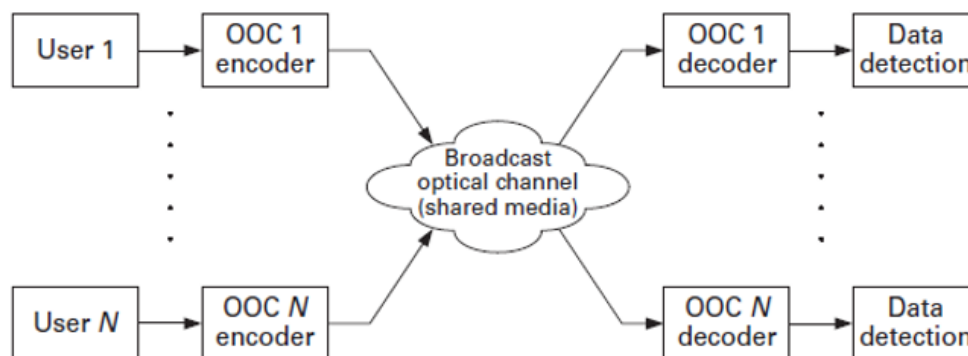


Figura 35. Diagrama de bloques de transmisión del sistema OCDMA.

Tomado de: (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012)

Los códigos ortogonales ópticos (OOC), son considerados como los generadores de los códigos para los usuarios, el flujo de datos de los “N” usuarios son multiplexados y enviados a través del canal de medios compartidos, por otra parte, en la parte receptora existe un decodificador para cada uno de los “N” usuarios, el cual regenerará el bit de datos transmitido del usuario de entre todos los demás bits transmitidos de los otros usuarios.

El transmisor OCDMA inalámbrico utiliza la codificación OOC, es decir, los usuarios pertenecientes a esta red, podrán enviar los bits de información de manera asíncrona, pero en la parte receptora antes de captar el bit transmitido, es fundamental que primero logre una sincronización a nivel de bits entre el par transmisor-receptor correspondiente. (Arnon et al., 2012. p 60)

La implementación de la parte receptora en este tipo de sistemas de comunicaciones inalámbricas es más compleja que la parte transmisora debido a su módulo de sincronización, la sincronización es posterior a la etapa de detección de datos y es aplicada en dos etapas: adquisición y seguimiento.

En la primera etapa, los datos recibidos entran a la fase de adquisición, donde posteriormente de ser captados, el receptor se sincroniza con el código de propagación con una exactitud estimada dentro de la mitad de la duración del chip, el cual quiere decir que, cada tiempo de bit es subdividido en intervalos cortos de tiempo denotados como "m".

En la segunda etapa, de seguimiento se realiza una sincronización mucho más precisa al hacer uso en la entrada de datos, el código sincronizado del bloque anterior. La primera etapa de adquisición está activa únicamente en la fase de inicio o posterior de la etapa de sincronización, mientras que la segunda etapa de seguimiento permanece activa todo el tiempo.

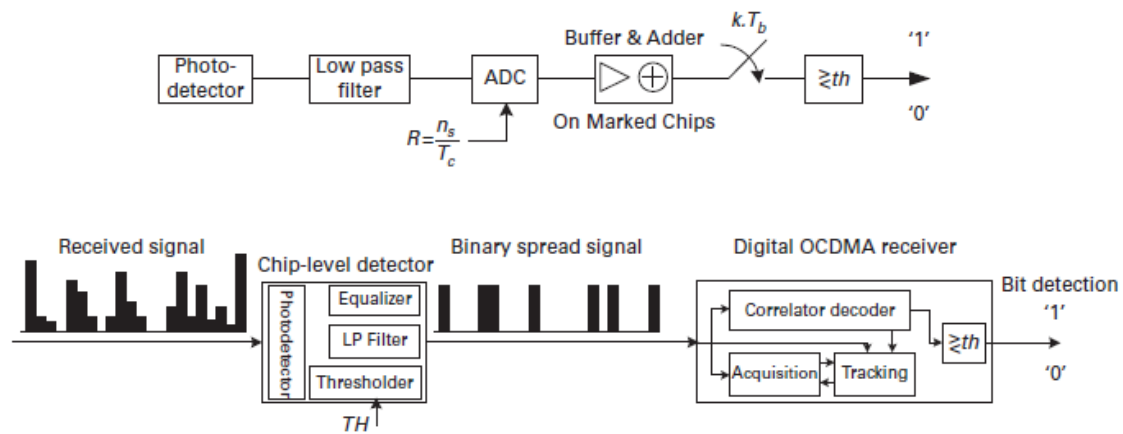


Figura 36. Estructura para un receptor OCDMA.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012)

Existe también el receptor correlacionador, el cual es el más propuesto para sistemas OCDMA, este receptor es capaz de tomar una decisión basada en la suma de energía recibida de todos los chips marcados por OOC, implementa, además, un filtro adaptado que corresponde a su patrón de código, un integrado y un muestreador.

En la implementación de este sistema para ambientes *indoor*, se tiene que la correlación puede ser implementada seguida de la fotodetección por parte del receptor, una vez la señal es detectada, es muestreada por un convertidor análogo-digital (ADC) con una velocidad de “ns” la velocidad del chip OOC, que representa el valor n_s/T_c como se puede ver en la figura 36, donde “ns” es la frecuencia de muestreo por chip y T_c representa la duración del chip.

El bloque del “Buffer” es el encargado de guardar los resultados obtenidos de la adicción en cada instante del muestreo y se reinicia al finalizar el tiempo del bit, una vez culminado el tiempo del bit, dicho valor resultante es almacenado en la memoria intermedia que posteriormente será comparada con un umbral óptimo.

5.1.2 Sistema OCDMA de espacio libre

La comunicación que se genera en estos sistemas, es de tipo asíncrona en la transmisión, existen dos maneras de poder enviar la señal óptica, mediante fibra óptica o de forma inalámbrica que es un enlace óptico de espacio libre (FSO).

Los tipos de arquitectura en los enlaces FSO pueden ser de tipo punto a punto, tipo malla o de tipo anillo. El distanciamiento entre el transmisor y receptor puede ser de entre unos cientos de metros hasta pocos kilómetros, para el caso de distanciamiento de kilómetros, se deben implementar como transmisores los diodos láser como también hacer uso de los amplificadores ópticos de potencia alta, el uso de un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) en el transmisor es una implementación muy acertada para este tipo de sistemas.

Para la parte receptora, se incorpora un telescopio con una abertura lo suficientemente amplia para poder cubrir la mayor parte del haz de luz y así poder mermar las pérdidas del canal a causa de la divergencia del haz transmitido. (Arnon., 2012. p. 68).

Es muy importante implementar un control de potencia adaptativo (APC) en los sistemas ópticos de espacio libre CDMA, debido a que garantiza que el presupuesto de energía del enlace este en un rango óptico. El amplificador EDFA en condiciones climáticas optimas transmite un nivel de energía más bajo.

El rendimiento del receptor será menos sensible al umbral establecido, esto con el fin de poder detectar los chips ópticos o los bits del correlacionador. Por otra parte, la implementación de un APC se dará al asignar un código OOC dedicado

para de esa manera poder transmitir la potencia recibida ya digitalizada y a su vez muestreada a baja velocidad de cada nodo en el otro nodo del enlace de espacio libre.

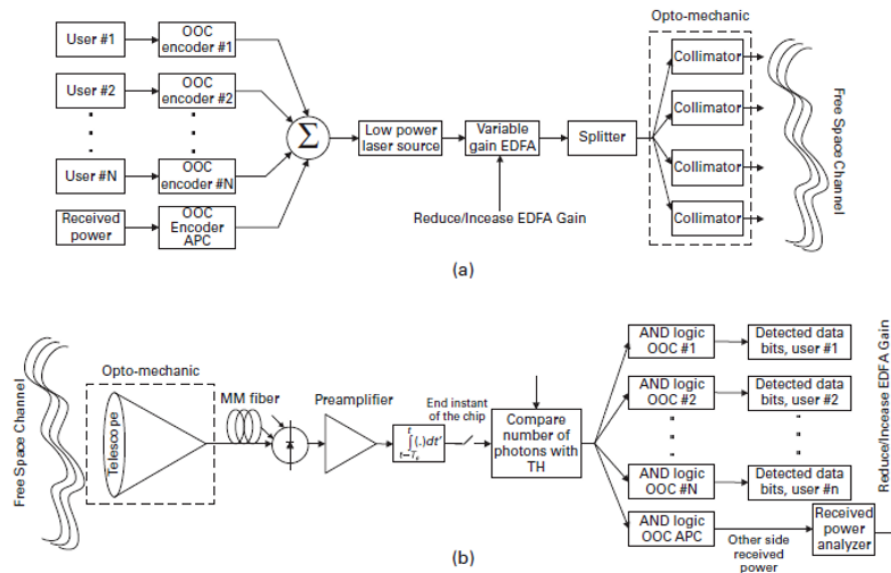


Figura 37. Sistema transmisor y receptor en FSO-CDMA.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012)

5.2 Sistema OFDM

El método de OFDM admite la multiplexación por división de frecuencias, haciendo uso de la modulación de multiportadoras digitales para de esa manera poder realizar la transmisión de símbolos. La gran ventaja de este sistema multiportadora en comparación a los otros esquemas que son de multiplexación por una sola portadora, es que hace uso eficiente del espectro, permitiendo que al canal se divida en subcanales de banda estrecha dando como resultado mayor robustez ante caídas de frecuencias selectivas.

La ortogonalidad que presenta este sistema, permite la transmisión simultánea dentro de un angosto rango de frecuencias sin que estas causen interferencias entre sí, permitiendo que las subportadoras puedan coexistir en el canal al estar este también subdividido, para lo cual se puede considerar que a mayor número de portadoras se obtendrá una mayor eficiencia.

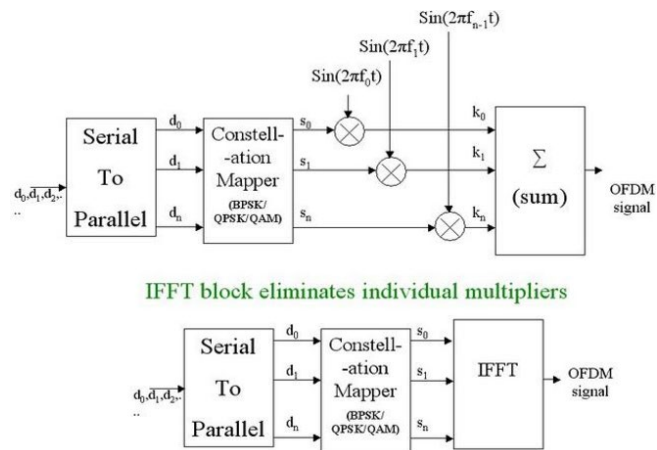


Figura 38. Flujo de los datos a transmitir en OFDM

Tomado de (Chide. N, Deshmukh. S, Borole. P. 2013).

Al enviar un conjunto de subportadoras ortogonales simultáneamente, se tiene el símbolo completo de OFDM transmitido, al enviar subportadoras se tiene como inconveniente el ISI (interferencia intersimbólica) causado por las múltiples rutas generadas, una manera de mitigar este problema es separar a los símbolos OFDM mediante el uso de bandas de guarda, permitiendo así ser resistente a los problemas de múltiples rutas. (Chide. N, Deshmukh. S, Borole. P, 2013).

5.2.1 Sistema O-OFDM

Las señales ópticas a transmitir deben ser de valor real y no negativas, esto se restringe debido a la propiedad que tienen los sistemas VLC que es la de

modulación de intensidad con detección directa (IM / DD). (Wang. Z, Mao. T, Wang. Q. 2017).

Una vez finalizado el proceso de salidas de las señales con la inversa rápida de la transformada de Fourier (IFFT), dichas salidas deben ser con valor real y para ello se debe realizar la simetría hermitiana en los símbolos del fotodetector, para dichos símbolos, se los puede modelar mediante la ecuación 7 tomada de: (Wang, et, al. 2017):

$$X_k = X_{N-k}^*, \quad 0 < k < N/2, \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde X_k representa la simetría hermitiana, X_{N-1} son los símbolos del fotodiodo y N es el tamaño de la transformada rápida inversa de Fourier, al agregar una polaridad DC la señal se ve forzada a que no sea negativa en la modulación DCO-OFDM. Para poder contrarrestar un defecto de DCO-OFDM que es la ineficiencia de potencia óptica y por ello no poder transportar información, se propone otro modelo a implementar que es el ACO-OFDM.

Si en ACO-OFDM se utilizan las subportadoras impares para la modulación, se presenta como resultado una onda de tipo antisimétrica una vez finalizado el proceso de IFFT, tomando en cuenta la parte negativa de las señales, puede ser recortada sin riesgos a tener perdidas de información al ser transmitido. Este proceso de recorte generará por otra parte, una distorsión únicamente en las subportadoras pares culminado el proceso de la transformada rápida de Fourier (FFT), siendo estas ortogonales a la información de las subportadoras impares.

Para realizar mejoras en los sistemas ópticos de OFDM, se ha propuesto esquemas como el de ADO-OFDM, el cual comprende una combinación de las señales ACO-OFDM y DCO-OFDM, para el cual, funciona modulando la parte de DCO-OFDM en las subportadoras pares, produciendo que las señales de ACO-OFDM no sean interferidas por los componentes de la otra. Bajo esta

consideración se puede decir que este nuevo esquema ADO-OFDM óptico es más eficiente en términos de energía que los dos anteriores esquemas mencionados.

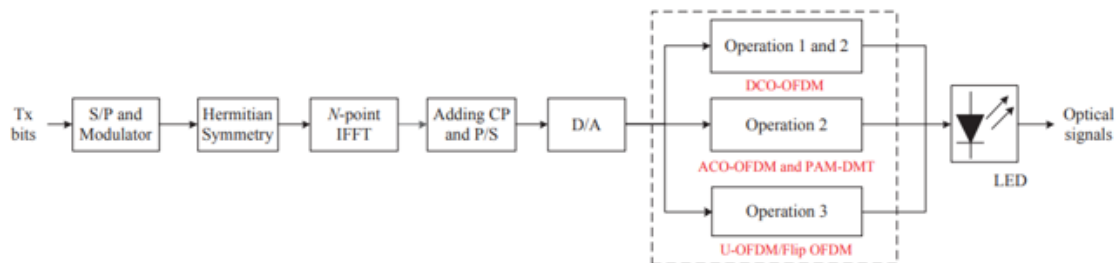


Figura 39. Diagrama de bloques de transmisión de esquemas O-OFDM.

Tomado de (Wang. Z, Mao. T, Wang. Q. 2017).

El proceso de la simetría hermitiana hace referencia a una función compleja la cual tiene una característica de que al tener su función conjugada, se le puede igualar a la función originaria con la particularidad de que se le cambia el signo, una vez culminado el siguiente proceso a este que es el de la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT), las señales generadas por otro esquema óptico que propone O-OFDM, PAM-DMT, la cual hace uso de la parte imaginaria de las subportadoras totales para su modulación la cual se encuentra en el dominio del tiempo, estas señales son antisimétricas, en las cuales se realiza el corte o *clipping* asimétrico para de esa manera evitar la polarización DC.

Los efectos de dicho recorte recaen directamente en la parte real de las subportadoras después de realizar al proceso de FFT, el esquema óptico U-OFDM el cual tiene procesos similares al de DCO-OFDM en la parte de la transmisión de símbolos al ser transformados al dominio del tiempo mediante la operación de IFFT. Una vez finalizados estos procesos, se tiene como resultado señales positivas y negativas, las cuales están separadas y son enviadas de

manera consecutiva en dos periodos de tiempo, siendo de esta manera la parte positiva enviada en primer lugar y la negativa en segundo lugar.

En la figura 39, se puede apreciar como son tratados los bits en la transmisión de camino al esquema O-OFDM, para la cual en la operación 1 se realiza una adición de la polarización DC, en la operación 2 es considerada como el *zero clipping* el cual es un proceso que consiste en una forma de distorsión la cual limita la señal al superar el umbral establecido, mientras que la operación 3 es un proceso en el cual se transmiten las muestras tomadas es decir, las positivas y negativas en dos marcos consecutivos.

Tabla 6.

Comparación de rendimiento de los esquemas ópticos de OFDM expuestos.

Esquemas OFDM	Ópticos Eficiencia espectral (Bits/Hz)	Eficiencia energética
DCO-OFDM	$\frac{N-2}{2N} \log_2 M$	Baja
ACO-OFDM	$\frac{1}{4} \log_2 M$	Alta
PAM-DTM	$\frac{N-2}{4N} \log_2 M$	Alta
U-OFDM / FLIP-OFDM	$\frac{N-2}{4N} \log_2 M$	Alta

Adaptado de (Wang. Z, Mao. T, Wang. Q. 2017).

Para la tabla 6, “N” representa el número de subportadoras y “M” el número de la constelación usada.

5.2.2 Sistema O-OFDM de espacio libre

Este tipo de sistema óptico permite velocidades de transmisión de datos muy altas al dividir todo el flujo entrante de datos a alta velocidad, en varios flujos de datos a baja velocidad y estos datos son transmitidos mediante una serie de subportadoras de banda estrecha.

Los flujos de las subportadoras de banda estrecha, presentan distorsiones mucho más pequeñas a comparación de todo el flujo a alta velocidad sin división y por ende no se requiere el proceso de ecualización. Por otra parte, gran parte del procesamiento de la señal es tratada en el dominio de las radiofrecuencias, lo que implica una ventaja debido a que los dispositivos microondas están más desarrollados que los sistemas ópticos y presentan una mejor estabilidad de frecuencia en los osciladores.

El proceso para transmitir los datos, es demultiplexado en flujos de datos con una menor velocidad de transmisión y cada uno es codificado por LDPC iguales para cada uno. La codificación LDPC comprende en códigos que corrigen los errores lineales los cuales dejan enviar un mensaje a través de un canal de comunicaciones con ruido, comprenden de al menos una matriz de paridad de baja intensidad como indica su nombre *Low density parity check*, dicha matriz está conformada por una cantidad mínima de elementos que sean diferentes de cero.

A la salida de la codificación LDPC, se demultiplexan nuevamente y son analizados en grupos de bits, estos grupos son subdivididos en "K" subgrupos y son mapeados en una señal de valor complejo de una constelación como la de QAM. En el fotorreceptor se genera una distorsión, la cual es causada por la cuadratura y es suprimida exitosamente mediante el uso de un filtro.

Al considerar un sistema de óptico de espacio libre OFDM *point to point*, El haz de luz proyectado y modulado en dirección al fotorreceptor utiliza un telescopio que expande el área de detección del mismo, posteriormente la señal captada es enfocada en el detector el cual dará como consecuencia una señal eléctrica que es igual a la potencia óptica entrante. (Arnon et al., 2012. p. 41).

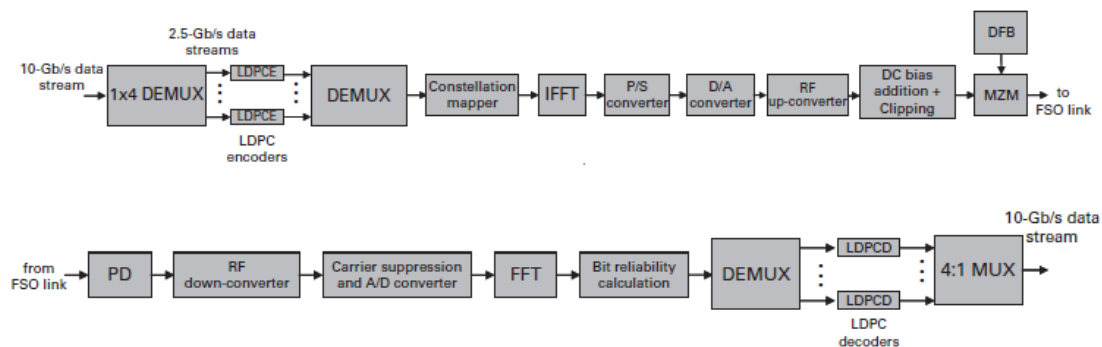


Figura 40. Transmisión y recepción del sistema FSO-OFDM.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012).

Para la parte receptora, el uso de los fotodiodos PIN o APD previamente mencionados, son muy comunes para la implementación de estos sistemas con el uso de un preamplificador y así generar los detectores ópticos, cuando la señal se está transmitiendo a través del espacio libre, es decir, en el aire, el haz óptico sufre de fluctuaciones en amplitud y fase a causa de la dispersión, refracción, absorción que son típicamente los que atenúan una señal al ser transmitida.

Una vez finalizado el proceso de conversión descendente de radiofrecuencias, se realiza la conversión análogo-digital (A/D) y con ello se elimina el prefijo cíclico, la señal demodulada por FFT es utilizada para evaluar la confiabilidad de los bits transmitidos, siendo este el siguiente paso.

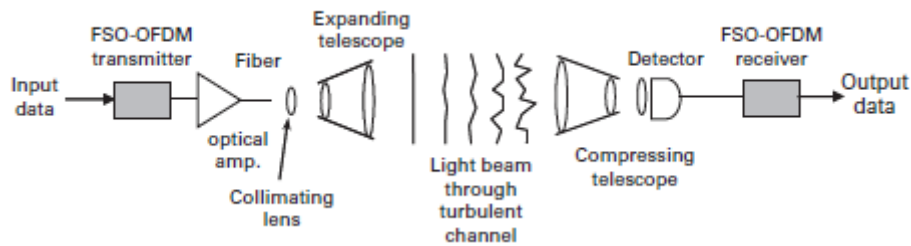


Figura 41. Enlace óptico de espacio libre.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012).

6 CAPÍTULO VI. Sistematización de las tecnologías analizadas

6.1 Factores que interfieren en el canal

Los factores influyentes en el procedimiento de un canal, tienen varias características para las cuales, las principales son por las fuentes emisoras de luz externas a la fuente del Diodo transmisor o Láser. Por otra parte, existen factores que interfieren en la dispersión del canal, para las cuales se consideran como superficies reflectantes y los obstáculos que se tienen en un sistema de transmisión de línea directa.

El uso adecuado de filtros en la parte receptora, minimiza o discrimina las fuentes de luz externas a la de la fuente transmisora del sistema, para ellos se han propuesto esquemas como: la combinación de filtro-detector y filtro de película delgada.

Para el esquema filtro-detector, es perfecto para aplicaciones que requieran una gran cantidad de reducción de ruido como también para alta velocidad de

transmisión las cuales requieran el uso de un espectro óptico estrecho. Por otra parte, el esquema filtro de película delgada, se sugiere como una alternativa a la anterior mencionada, pero a diferencia de la anterior, tiene inconvenientes al momento de captar el ángulo que proyecta el receptor y también se pueden implementar varias películas o capas de este tipo en el receptor.

Al hacer uso de estos esquemas de filtro se pueden evitar factores externos de luz como lo son: la luz solar, fuentes de luz artificiales como por ejemplo un foco fluorescente, entre otras. El filtro a escoger dependerá mucho del tipo de aplicación, mientras sea más exigente el esquema adecuado será el de filtro-detector y para aplicaciones no tan demandantes será el de filtro de película delgada con la posibilidad de aumentar capas para mejorar el rendimiento.

Para generar una mejor respuesta a las dispersiones que se tienen en el canal existen modelos que interpretan los trayectos por los que el rayo emitido pasa y corregir los errores de transmisión.

El primero es el canal de dispersión por rayos ultra violeta, el cual es perfecto en aplicaciones donde existen propagación de corto alcance, en este modelo, se considera la dispersión y la absorción molecular, es caracterizado por no necesitar una línea de visión directa, hace uso de la dispersión para poder establecer la comunicación.

El algoritmo de Monte Carlo, al integrarlo al modelo TRM-B, abarca los trazados de los rayos reflectantes y hace una combinación eficiente de las técnicas parabólicas y determinísticas, una vez que el rayo emitido por el emisor choca con distintas superficies reflectantes, estas se convierten en nuevas fuentes emisoras y el receptor realiza una suma de todas estas para poder capturar la señal, estas tienen un límite de reflexiones y de tiempo para llegar al receptor, lo cual a diferencia del anterior modelo que hace uso de la dispersión para generar la comunicación, este modelo hace uso de las superficies reflectantes para poder

enviar la señal, es ideal también para ambientes interiores donde se tienen muchas superficies reflectantes.

6.2 Comparativa entre técnicas de modulación y demodulación para Li-Fi.

Las tecnologías analizadas para la modulación parten de tres principales, las cuales posteriormente se han ido modificando en base a las necesidades de transmisión de datos y para ello se han considerado las modulaciones definidas por el estándar IEEE 802.15.7, las cuales han sido definidas previamente que son:

- Modulación OOK
- Modulación VPPM
- Modulación CSK

6.2.1 Modulaciones definidas en el estándar 802.15.7

Mediante la tabla 7, se presentan datos acerca de las velocidades de datos para cada una de las modulaciones en su máxima expresión en las tres distintas capas PHY en las que se maneja.

Tabla 7.

Tasa de datos máxima en cada modulación en las capas físicas PHY I, PHY II y PHY II.

Capa	Modulación	Código RRL	Velocidad del reloj óptico	FEC	Tasa de datos
PHY I	OOK	Manchester	200 kHz	RS (15,11)	73.3 kb/s
				-	100 Kb/s
	VPPM	4B6B	400 kHz	RS (15,7)	124.4 kb/s
				-	266.6 kb/s
PHY II	OOK	8B10B	120 MHz	RS (160,128)	76.8 Mb/s
				-	96 Mb/s
	VPPM	4B6B	7.5 MHz	RS (160,128)	4 Mb/s
				-	5 Mb/s
PHY II	8-CSK	-	12 MHz	RS (64, 32)	12 - 18 Mb/s
	16-CSK	-	24 MHz	RS (64, 32)	48 Mb/s
				-	72 - 96 Mb/s

Adaptado de (Rajagopal. S, Roberts. R, Lim. S. 2012).

En la tabla 7, se puede notar que al no usar un FEC que es el que corrige errores, se puede obtener una mayor tasa de transmisión en las capas PHY I, PHY II y PHY III, pero lo cual conlleva consecuencias debido a que se tendrán mayores transmisiones con errores.

Se puede comprobar que a mayores frecuencias también se obtiene una mayor tasa de transmisión de datos, por otra parte, al hacer uso de un FEC en su máxima relación, se pueden obtener valores aceptables para una tasa de transmisión correcta evitando errores en los datos a transmitir, pero para la modulación de colores CSK si se tiene una amplia diferencia de velocidades.

Estas tres capas físicas son propuestas por la IEEE para las aplicaciones VLC, para las cuales, las primeras dos capas son utilizadas para aplicaciones que tengan una sola fuente de luz en las cuales operan las modulaciones OOK y VPPM. Por otra parte, para aplicaciones para las cuales se necesiten más de una fuente de luz, la modulación CSK es utilizada, en la cual se consideran diferentes frecuencias las cuales están representadas por los rangos de colores.

Las modulaciones propuestas por la IEEE, admiten compensaciones de parámetros como los de velocidad de datos y rangos de atenuación, en la modulación OOK al estar en situaciones de atenuación, suministra un rango constante con una velocidad de datos variables al introducir el tiempo de compensación, por otra parte, VPPM provee una velocidad de datos constante con un rango variable al ajustar el ancho de pulso. (Rajagopal et al., 2012).

6.2.2 Modulaciones ópticas OCDMA, O-OFMD

La facilidad de la implementación de los sistemas OCDMA es de gran interés por el cual ha sido propuesto para poder ser usado en sistemas de transmisiones ópticas de espacio libre, además, al ser implementados en un canal de Poisson el cual es un canal óptico común, estas modulaciones presentan ser óptimas.

Al utilizar los sistemas de OCDMA, se asigna un código al usuario para que tenga un orden de transmisión y también se hace uso de todo el espectro ensanchado

para transmitir los datos, mientras que al utilizar los sistemas O-OFDM se optimiza el espectro al usar solamente lo necesario, por otra parte, se subdividen las portadoras para poder enviar con mayor velocidad los datos pero a comparación de los sistemas OCDMA, esto implica mayor tiempo de procesamiento y tratamiento de la información a transmitir debido a que implican más procesos al subdividir las portadoras y enviarlas mediante el canal.

Al considerar una aplicación para ambientes interiores, OCDMA presenta dificultades debido a la falta de infraestructura porque se requieren varias estaciones bases como también las limitaciones que se tiene al propagar una onda óptica, la necesidad de implementar estaciones base es tal para actuar como un conector de una red local hacia una red global, por ende, lo hace ideal para aplicaciones exteriores, pero también es posible su implementación en una red LAN.

Los usuarios pertenecientes a la red de OCDMA transmiten los bits de información mediante el canal común con la particularidad de que esa transmisión es asíncrona, lo que resulta en la parte receptora para poder recuperar la señal transmitida realiza una suma analógica de todas estas.

Los sistemas OCDMA pretenden baja probabilidad de interferencia, esto es permitido por el uso del ensanchamiento del espectro lo cual hace difícil la interceptación de las señales que se transmiten por un usuario externo a la red.

En sistemas O-OFMD se tienen varios esquemas para mitigar errores y deficientes en las transmisiones, para aplicaciones en interiores, se debe tener en cuenta que la iluminación y la comunicación deben estar y mantenerse en el mismo tiempo, es importante recalcar que en un sistema O-OFDM convencional, está orientado a la transferencia de datos y esto es limitado por el rango dinámico

de los LED, para ello se implementan variaciones de O-OFDM como se mencionó.

Al hacer uso del esquema DCO-OFDM se puede mitigar el problema anteriormente mencionado debido a que al polarizar las señales en DC se distribuyen simétricamente, al estar atenuada la señal muy alta o muy baja, la señales en DCO-OFDM se escalan a gran medida causando un bajón del rendimiento y por lo que se vale de otros esquemas que permiten ser implementados para comunicaciones VLC.

La eficiencia espectral es explotada en su totalidad gracias al uso de un sistema híbrido de O-OFDM que es el AHO-OFDM compuesto por ACO-OFDM y PAM-DTM, el cual genera señales asimétricas y permite hacer uso del rango dinámico del LED.

La ortogonalidad es una característica importante a resaltar en los sistemas OFDM, el cual permite que las bandas laterales de las portadoras se superpongan sin causar interferencias por adyacencias, lo cual permite eficiencia en el ancho de banda, por otra parte, este sistema presenta un mejor rendimiento ante el desvanecimiento selectivo de frecuencias a diferencia de sistemas que transmiten una sola portadora como es el caso del sistema CDMA.

Los sistemas OFDM son muy sensibles ante los errores de sincronización al momento de transmitir como también en los errores de frecuencia, por lo que comparándolo con CDMA es mucho más sensible al desplazamiento de las frecuencias portadoras causado por la transformada discreta de Fourier.

En la demodulación del sistema óptico OFDM, se presentan más procesos que en un sistema de transmisión de una sola portadora. Al subdividir las portadoras, se tiene también una subdivisión del canal de transmisión dando como resultado dos modulaciones con dos demodulaciones en la parte receptora, además también cuenta en la recepción con el AWGN, que es el ruido blanco Gaussiano aditivo, como adicional cuenta con un bloque del proceso *Zero Forcing* encargado de revertir los desvanecimientos del canal MIMO y recuperar los símbolos transmitidos.

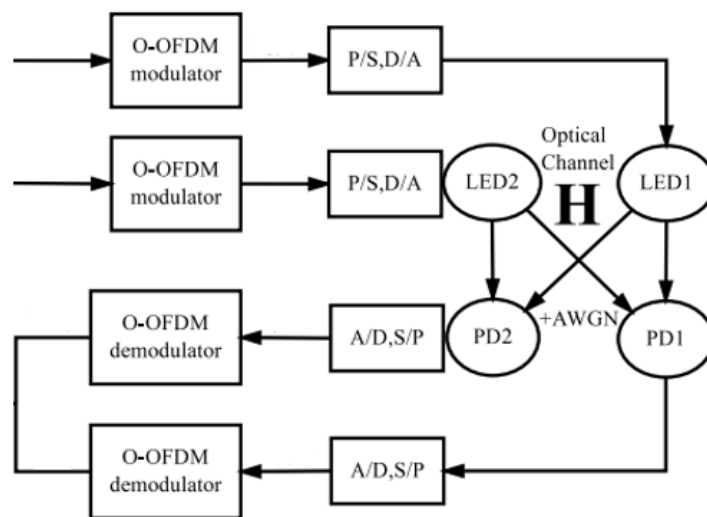


Figura 42. Proceso modulador, demodulador del sistema O-SM-OFDM.

Tomado de (Li. Y, Tsonev. T, Hass. H. 2014).

En la parte receptora del sistema OOK-OCDMA, se tiene como diferencia al del sistema O-OFDM un solo canal sin subdivisiones por el cual los usuarios envían sus datos de forma asíncrona y con un código OOC asignado a cada uno, se tienen menos procesos a realizar para la demodulación.

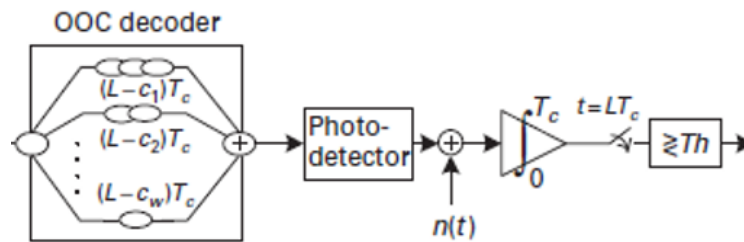


Figura 43. Demodulador para el sistema OCDMA.

Tomado de (Arnon, Barry, Karagiannidis, Schober, & Uysal, 2012).

6.3 Comparativa entre técnicas de multiplexación para Li-Fi.

Los esquemas establecidos son los de O-OFDM y OCDMA, mismos que están basados en los principios de los originales, OFDM y CDMA. Los esquemas con más aceptación para la multiplexación en la tecnología Li-Fi son:

- Sistema óptico inalámbrico OCDMA
- Sistema óptico O-OFDM

Los cuales, tienen particularidades que aportan a la transmisión y recepción de datos en esta tecnología dependiendo del tipo de implementación que se requiera implementar.

En los sistemas de OCDMA, se considera la asignación de un código a cada usuario para que pueda ingresar al canal y se transmitan sus bits de forma asíncrona siendo estos multiplexados con forme a la capacidad que tenga el sistema, los códigos a asignar a los usuarios deben ser considerados en el dominio del tiempo.

La técnica del espectro ensanchado, no hace uso eficiente del ancho de banda, debido a que transmiten en un ancho de banda mucho más amplio de lo requerido, por otra parte, al utilizar esta técnica, se tiene una mayor eficiencia contra el ruido al recibir la señal en el receptor.

En los sistemas OFDM y sus derivados, son caracterizados por su transmisión multiportadora digital de símbolos, a diferencia de los sistemas que transmiten una sola portadora, estos sistemas trabajan con anchos de banda estrechos, al considerar su baja tasa de símbolos, hacen uso de un intervalo de guarda entre símbolos lo que permite eliminar la interferencia intersimbólica (ISI), ganando así una mejor relación Señal-Ruido.

En términos de eficiencia espectral, OFDM presenta una mejoría gracias a la implementación de su sistema MIMO a comparación de los sistemas CDMA que hacen uso de un receptor RAKE. OFDM presenta mayor eficacia al combatir la interferencia causada por los trayectos múltiples.

El sistema OFDM presenta mayores facilidades de adaptación cuando el canal presenta condiciones de atenuación, por lo cual no hace falta la integración de algoritmos complejos para solucionar dichos problemas en el canal.

6.3.1 Sistemas ópticos de espacio libre O-OFDM, OCDMA

La tecnología VLC hace utiliza la modulación de intensidad y detección directa (IM/DD) en la parte receptora como en la transmisora, es por ello que se puede fácilmente modular la amplitud de la señal. OCDMA incoherente hace uso de la codificación unipolar representados por "0" y "1", estos códigos funcionan bien para VLC, pero, sin embargo, para poder alcanzar una mejora en este sistema,

es preciso utilizar códigos bipolares y para ello el esquema debe cambiar a OCDMA coherente, cuyo proceso consiste en modular la fase de la señal óptica.

Los procesos para un sistema OCDMA coherente resultan ser muy complejos utilizados en fibra óptica y no serían muy apropiados para el sistema VLC, para ello se precisa agregar una polaridad DC en el transmisor y quitarla de la parte receptora.

Al partir como punto de comparación un sistema de comunicación para ambientes interiores, las señales en OCDMA emitidas por los *LED's*, constan de un nodo móvil el cual debe decodificar la señal para de esa manera poder reconocer la posición del usuario, es por ello que es necesario que los códigos de dirección posean buenas características de correlación para obtener una precisa sincronía y por ende baja interferencia de acceso múltiple (MAI).

Los sistemas O-OFDM clásicos en ambientes interiores, no pueden hacer uso eficiente del rango dinámico de los *LED* debido a que se enfocan más en la transmisión de datos, es por ello que precisa de variaciones como las de DCO-OFDM para hacer uso de la polarización DC y así poder adecuarse para los requisitos de iluminación, pero aplicar esto puede causar degradado en el desempeño del sistema, es por esa razón que se deben aplicar más procesos que en OCDMA y se deben implementar esquemas de O-OFDM para poder ajustar y ser regulable para el rango dinámico de los *LED's*.

El procesamiento de la señal transmitida para ser modulada en un sistema O-OFDM es mucho mayor que la de una sola portadora como OCDMA, debido a que las portadoras en O-OFDM son subdivididas y colocadas en dos matrices para poder ser enviadas por el canal que de igual manera es subdividido, por otra parte esto permite un gran ancho de banda al hace uso de lo necesario al

contrario de OCDMA que utiliza todo el ancho de banda para poder transmitir aun cuando no es necesario tanto ancho de banda.

Considerando el esquema OOK-OCDMA, su funcionamiento es basado en chips secuenciales que están dadas por la estructura del código mientras su estado sea encendido, por otra parte, un sistema O-SM-OFDM basan la modulación según sean sus subportadoras pares o impares, es importante también que sean de valor real y no negativo, una gran ventaja de considerar este sistema, es que se pueden utilizar varios transmisores con varios receptores para poder incrementar las velocidades de transmisión en lo que está basado Li-Fi.

Los esquemas de O-OFDM, están en condiciones de poder explotar todas sus subportadoras como también todo el rango dinámico que ofrece el LED con diferentes tipos de atenuación, por lo cual es el mejor pretendiente para los sistemas VLC regulables.

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

La información propuesta en este documento, han sido obtenidos de varias fuentes teóricas que pueden ser útiles en futuros desarrollos prácticos, considerando que se han expuesto varios conceptos multiplexación, modulación, demodulación y el canal.

La tecnología Li-Fi, pretende ser una alternativa a la comunicación inalámbrica Wi-Fi, ambas tecnologías pueden coexistir para mejorar las prestaciones de servicio, considerando que Li-Fi puede tener más alcance que Wi-Fi mientras que Wi-Fi puede traspasar obstáculos poder agrandar su alcance.

Las superficies reflectoras pueden llegar a convertirse en nuevas fuentes transmisoras para enviar datos a través del canal, pero al tener muchos rebotes el rayo emitido puede llegar a presentar atenuaciones en la señal, para ello en el sistema a implementar se configura un número máximo de rebotes en un determinado tiempo de espera y se suman las señales que residen en el receptor dentro de ese intervalo definido.

Las fuentes de interferencia son fáciles de eliminar con el debido uso de los distintos tipos de filtros que se pueden implementar en el receptor, el uso de los filtros dependerá del tipo de aplicación a implementar, el uso del filtro-detector es ideal para aplicaciones que demanden alta velocidad y gran reducción del ruido, como alternativa a esta solución se tiene el esquema de filtro de película delgada, para el cual según sea la demanda se irán aumentando capas para reducir el ruido en el receptor.

Los esquemas derivados de los tradicionales OFDM y CDMA, sustentan su tecnología en una mejora en parámetros como los del BER, eficiencia espectral, espectro ensanchado, ancho de banda, entre otros, en el uso de la tecnología Li-Fi.

Al considerar una modulación elevada en M-QAM, se puede producir una tasa de transmisión de errores bastante elevada, debido a que están situados muy cerca en el plano de cuadratura como de amplitud.

Los sistemas O-OFDM, precisan de la combinación de sus esquemas para poder optimizar la comunicación inalámbrica, por lo cual si se utiliza un solo esquema presentará varias deficiencias en la implementación, pero al combinar sus esquemas se obtienen mejores resultados la transmisión de datos.

Los sistemas de O-OFDM, realizan una mejora en velocidades de transmisión debido a que estos esquemas trabajan con MIMO, lo cual permite utilizar varias fuentes emisoras con varias fuentes receptoras, brindando así una transmisión de datos mucho más elevada que una que utiliza el esquema OCDMA.

El uso del espectro ensanchado en los sistemas OCDMA, hace que el ancho de banda del sistema no sea correctamente aprovechado debido a que transmite datos con más ancho de banda de lo que se necesita, a diferencia que los esquemas O-OFDM hacen un mejor uso de los recursos para aprovechar y optimizar el ancho de banda.

Para poder transmitir los datos a través del canal, los sistemas OCDMA asignan un código a cada usuario para realizar una transmisión asíncrona, pero en el receptor se precisa la sincronía de los datos transmitidos, por otro lado, los

sistemas O-OFDM subdividen las portadoras y el canal para poder realizar su transmisión y multiplexación, pero para lo cual, se precisan más procesamientos y codificación de datos para poder tratar los datos subdivididos y enviarlos al igual en la parte receptora.

7.2 Recomendaciones

Es recomendable tener en cuenta que para implementar una aplicación que requiera el uso del Diodo Láser, se tomen las debidas precauciones para poder precautelar la seguridad del ojo humano debido a que afecta a la vista.

En aplicaciones para interiores, se recomienda el uso del LED debido a que tiene un bajo consumo energético y una larga durabilidad como también es seguro para el ojo humano, al igual que su propagación es propicie al tipo de necesidad que requieren estos ambientes.

Al querer implementar la tecnología Li-Fi, se recomienda revisar las superficies reflectantes como también los obstáculos, puesto que las superficies pueden llegar a ser nuevas fuentes emisoras como también generadoras de ruido o interferencia que fácilmente son discriminadas en el receptor con el uso de filtros, por otra parte, como bien es conocido, los rayos emitidos no pueden traspasar objetos físicos.

Al momento de escoger una tecnología de modulación y demodulación, se deben definir los requisitos previos a la implementación debido a que cada esquema expuesto presentan sus ventajas y desventajas y pueden ser aprovechadas dependiendo el aplicativo a implementar.

Si el aplicativo a implementar no requiere tanta demanda de recursos, un sistema OCDMA sería propicio debido a que el tratamiento de datos es mucho menor que un sistema O-OFDM puesto que en este implican más procesos a tratar para enviar y recibir la información.

Es recomendable utilizar Li-Fi en lugares sensibles a la interferencia electromagnética (EMI) debido a que las comunicaciones por radiofrecuencia no se pueden desplegar debido al espectro que emiten.

Para poder realizar el uso de Li-Fi en las ciudades, es decir, en ambientes exteriores, se pueden implementar AP (*Access points*) y poder reducir la congestión del espectro de radiofrecuencia.

REFERENCIAS

- Abu-alhiga, R., & Haas, H. (2009). *Subcarrier-Index Modulation OFDM*. Edinburgh.
- Afgani, M., Haas, H., Elgala, H., & Knipp, D. (2006). *“Visible Light Communication*. Barcelona, España: TRIDENTCOM.
- Areitio, J. (1 de Abril de 2013). *Identificación y análisis de la tecnología VLC/Li-Fi desde la perspectiva de su ciberseguridad-ciberprivacidad*. Recuperado el 10 de abril de 2020 de <https://www.conelectronica.com/tecnologia/seguridad/identificacion-y-analisis-de-la-tecnologia-vlcli-fi-desde-la-perspectiva-de-su-ciberseguridad-ciberprivacidad>
- Arnon, S., Barry, J., Karagiannidis, G., Schober, R., & Uysal, M. (2012). *Advanced Optical Wireless Communication Systems*. Cambridge University Press.
- Biosca Rojas, D., Cárdenas Barroso, A., & León Morales, J. (2017). Caracterización del canal óptico para la planificación de redes Li-Fi en entornos virtuales enriquecidos. *RIELAC*, 94-106.
- Cherif, A., Yagoubi, B., Bouazza, B., & Dahman, A. (2016). *Performance analysis of Optical CDMA System Based on Zero Cross Correlation (ZCC) Code using OFDM Modulation*. International Journal of Signal Processing .
- Chide, N., Deshmukh, S., & Borole, P. (2013). *Implementación del sistema OFDM utilizando IFFT y FFT*.
- Código CDMA MATLAB. (s.f.). Recuperado el 22 de abril de 2020 de <https://www.rfwireless-world.com/source-code/MATLAB/CDMA-MATLAB-code.html>
- De Lausnay, S., De Strycker, L., Goemaere, J., Stevens, N., & Nauwelaers, B. (2014). *Optical CDMA Codes for an Indoor Localization System using VLC*.

- Del Risco, A., & Cruz, J. (2013). *Diseño de un Modulador/Demodulador OOK con portadora y tasa de transmisión configurable para el estándar de baja frecuencia de dispositivos RFID*. Habana, Cuba.
- Ghassemlogy, Z., . Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2012). *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with Matlab*. CRC Press.
- Hanzo, L., Ng, S., Keller, T., & Webb, W. (s.f.). *Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems*.
- Hass, H. (2015). *LiFi Technologies*. Recuperado el 20 de mayo de 2020 de: http://www.homepages.ed.ac.uk/hxh/LiFi_PAPERS/LiFi_Workshop_Haas.pdf
- Kabli, A., & Faqih, M. (2018). *Optical OFDM (O-OFDM) for Intensity Modulated/Direct Detection Optical Systems*. IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat).
- Khan, L. U. (2016). *Visible Light Communication: Applications, Architecture, Standardization and Research Challenges*. Digital Communications and Networks.
- Khandal, D., & Jain, S. (2014). *Li-Fi (Light Fidelity): The Future Technology in Wireless Communication*. Jaipur: International Research Publications House.
- Leguizamón-Páez, M., Rojas-Pineda, J., & Rodríguez-Sánchez, E. (2019). Luz visible y su integración con la internet de las cosas. *Revista Vínculos*, XX-XX.
- Mefenza, M., & Bobda, C. (2013). *Implementación de FPGA de transceptor OFDM de modulación de índice de subportadora*.
- Mesleh, R., Haas, H., Ahn, C., & Yun, S. (2014). *Spatial Modulation – OFDM*.
- Mesleh, R., Haas, H., Chang, A., & Yan, S. (2014). *Spatial Modulation - OFDM*.

- Muriel, M. (s.f.). Recuperado el 10 de junio de 2020 de [http://oa.upm.es/42859/1/Fotodetectores%20\(PIN,%20APD\)-Matriz.pdf](http://oa.upm.es/42859/1/Fotodetectores%20(PIN,%20APD)-Matriz.pdf)
- Paguayo. (2019). *Modulación por ancho de pulsos*. Recuperado el 15 de julio de 2020 de <https://cursos.mcielectronics.cl/2019/06/18/modulacion-por-ancho-de-pulsos/>
- Rajagopal, S., Roberts, R., & Lim, S. (2012). *IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support*. IEEE Communications Magazine.
- Rajbhandari, S., Chun, H., Faulkner, G., Cameron, K., Aravind, Henderson, R., . . . O'Brien, O. (2015). *High-Speed Integrated Visible Light Communication System: Device Constraints and Design Considerations*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications.
- Sarbazi, E., & Uysal, M. (2013). *PHY Layer Performance Evaluation of the IEEE 802.15.7 Visible Light Communication Standard*. Istanbul.
- Serafimovski, N., Jungnickel, V., Min Jang, Y., & Li Qiang, J. (2017). *An overview on high speed optical wireless/light communications*.
- Tsonev, D., Sinanović, S., & Haas, H. (2011). *Enhanced Subcarrier Index Modulation (SIM) OFDM*. Houston, Texas, USA: IEEE GLOBECOM .
- Tsonev, D., Videv, S., & Haas, H. (2014). *Light Fidelity (Li-Fi): Towards All-Optical Networking*. Edinburgh, UK: SPIE.
- Wang, Z., Mao, T., & Wang, Q. (2017). *Optical OFDM for Visible Light Communications*. 13a. Conferencia internacional de comunicaciones inalámbricas e informática móvil (IWCMC).
- Yin, H., & Richardson, D. (2007). *Optical Code Division Multiple Access Communication Networks*. Springer.
- Ying, C., Lul, H., Cheng, C., Peng, P., & Ho, W. (2015). *20-Gbps optical LiFi transport Systems*. Optics letters.

Zapata, M. (2020). *Modulación QAM*. Obtenido de SYSCOM:
<https://soporte.syscom.mx/es/articles/2334170-modulacion-qam>

Zhang, X., Dimitrov, S., Sinanovic, S., & Haas, H. (2012). *Optimal Power Allocation in Spatial Modulation OFDM for Visible Light Communications*. Edinburgh, UK.

