



**Evaluación del desempeño de una red IEEE 802.15.7, basada en la implementación de escenarios y simulación de técnicas de modulación DCO-OFDM, ACO-OFDM en ambientes indoor**

Benavides Muzo, Karina Elizabeth

Departamento de Eléctrica, Electrónica y

Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y

Telecomunicaciones

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en

Electrónica y Telecomunicaciones









Ing. Aguilar Salazar, Darwin Leonidas

04 de agosto del 2021

### Document Information

<b>Analyzed document</b>	Tesis_KB_Completo_Karina Benavides_Corregido.docx (D110994537)
<b>Submitted</b>	8/4/2021 11:35:00 PM
<b>Submitted by</b>	
<b>Submitter email</b>	dlagular@espe.edu.ec
<b>Similarity</b>	4%
<b>Analysis address</b>	dlagular.espe@analysis.orkund.com

### Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="https://library.co/document/zgw0nx2y-estudio-simulacion-tecnicas-ofdm-ofdm-tecnologia-ambientes-indoor.html">https://library.co/document/zgw0nx2y-estudio-simulacion-tecnicas-ofdm-ofdm-tecnologia-ambientes-indoor.html</a> Fetched: 8/4/2021 11:34:00 PM	 19
<b>W</b>	URL: <a href="https://iinet.upv.es/bitstream/handle/10251/124615/L%C3%83pez%20-%20Desarrollo%20de%20una%20herramienta%20software%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20una%20red%20de%20comunicaciones%20e%20lum...pdf?sequence=1">https://iinet.upv.es/bitstream/handle/10251/124615/L%C3%83pez%20-%20Desarrollo%20de%20una%20herramienta%20software%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20una%20red%20de%20comunicaciones%20e%20lum...pdf?sequence=1</a> Fetched: 5/19/2020 7:40:36 AM	 4
<b>W</b>	URL: <a href="https://core.ac.uk/download/pdf/51410427.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/51410427.pdf</a> Fetched: 7/14/2020 2:28:11 AM	 8
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UNA RED IEEE 802.15.7 EN MODO INFRAESTRUCTURA PARA AMBIENTES INDOOR.docx</b> Document EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UNA RED IEEE 802.15.7 EN MODO INFRAESTRUCTURA PARA AMBIENTES INDOOR.docx (D47260173) Submitted by: dlagular@espe.edu.ec Receiver: dlagular.espe@analysis.orkund.com	 9
<b>SA</b>	<b>Jorge_Diaz_TT_2018.docx</b> Document Jorge_Diaz_TT_2018.docx (D48338847)	 1
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis Completa Modelo Rapp_Daniel Alvear.docx</b> Document Tesis Completa Modelo Rapp_Daniel Alvear.docx (D32233383) Submitted by: dari_alvear@hotmail.com Receiver: ndespinosa.espe@analysis.orkund.com	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/26344/TFG_Paula_Garcia_Garcia_2014.pdf">https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/26344/TFG_Paula_Garcia_Garcia_2014.pdf</a> Fetched: 2/23/2020 4:03:50 AM	 2
<b>W</b>	URL: <a href="https://rdu.luj.edu.ar/bitstream/123456789/379/1/LIF%20en%20las%20comunicaciones%20de%20Argentina.pdf">https://rdu.luj.edu.ar/bitstream/123456789/379/1/LIF%20en%20las%20comunicaciones%20de%20Argentina.pdf</a> Fetched: 2/28/2020 3:55:43 PM	 1
<b>SA</b>	<b>ROMERO_L7PEZ_CP48746_20200630_1403_c033.pdf</b> Document ROMERO_L7PEZ_CP48746_20200630_1403_c033.pdf (D75842262)	 1



ANÁLISIS DOCUMENTAL  
DARWIN LEONIDAS  
AGUILAR SALAZAR

Ing. Darwin Leónidas Aguilar Salazar

CI: 1103036826



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación “Evaluación del desempeño de una red IEEE 802.15.7, basada en la implementación de escenarios y simulación de técnicas de modulación DCO-OFDM, ACO-OFDM en ambientes indoor”, fue realizado por la señorita **Benavides Muzo, Karina Elizabeth** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 10 de Agosto del 2021**



**DARWIN LEÓNIDAS  
AGUILAR SALAZAR**

**Ing. Aguilar Salazar, Darwin Leónidas**

**C. C: 1103036826**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Benavides Muzo, Karina Elizabeth**, con cédula de ciudadanía n° 1718720095, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Evaluación del desempeño de una red IEEE 802.15.7, basada en la implementación de escenarios y simulación de técnicas de modulación DCO-OFDM, ACO-OFDM en ambientes indoor”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 10 de Agosto del 2021**

**Benavides Muzo, Karina Elizabeth**

C.C.: 1718720095



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Benavides Muzo, Karina Elizabeth**, con cédula de ciudadanía n° 1718720095, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Evaluación del desempeño de una red IEEE 802.15.7, basada en la implementación de escenarios y simulación de técnicas de modulación DCO-OFDM, ACO-OFDM en ambientes indoor”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 10 de Agosto del 2021**

**Benavides Muzo, Karina Elizabeth**

C.C.: 1718720095

## Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre por su esfuerzo y apoyo durante toda su vida a Rosario Muzo, Edgar Muzo y Juliette Burbano por hacer las veces de madre y padre cuando los dos faltaron, por ser el sostén necesario para culminar una de mis metas propuestas. A Andrés por su brindarme su apoyo incondicional durante todo momento.

## Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme las fuerzas necesarias para terminar la carrera, a mi madre por todos los valores inculcados, a Rosario, Pablo, Laura y Edgar por enseñarme a no desfallecer ante cualquier adversidad, agradezco a mis abuelitos Dolores y Andrés por enseñarme que el trabajo duro es necesario para cumplir cualquier meta.

Agradezco a Andrés por el apoyo brindado en cada momento, y a toda su familia por todo el ánimo brindado.

Agradezco a mi Jefe Rodrigo Cajo por todo el apoyo brindado antes y durante la ejecución de este trabajo y a mis compañeros del NOC por cada cambio de turno realizado.

Agradezco a mi tutor, Darwin Aguilar, por sus consejos y soporte en todo este proceso.

Agradezco a mis compañeros Xavier, Danna y Juan por el apoyo brindado durante toda la carrera.

## Índice de contenido

Urkund .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen .....	14
Abstract.....	15
Capítulo 1 .....	16
Introducción.....	16
Antecedentes .....	16
Justificación e Importancia .....	17
Alcance del Proyecto.....	18
Objetivos .....	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos .....	19
Capítulo 2 .....	20
Marco Teórico.....	20
VLC (Comunicación por Luz Visible).....	20
Tecnología Li-Fi .....	20
Intensity Modulation and Direct Detection (IM/DD).....	21
Fuentes Ópticas .....	21
LEDs.....	22
Infrarrojo.....	27
Responsividad .....	27
Fotodetectores PIN .....	28
Fotodetectores APD.....	28
Canal Óptico.....	29
Canal de Comunicación Inalámbrico Óptico Indoor. ....	30
Técnica de Modulación .....	38



Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM).....	39
Modulación Óptica.....	40
OFDM .....	43
Estándar IEEE 802.15.7 .....	49
PureLiFi en una Red IEEE 802.15.7 en Modo Infraestructura .....	49
Topología de PureLiFi.....	50
Capítulo 3.....	52
Metodología.....	52
Implementación de la Red IEEE 802.15.7 con el Sistema PureLiFi LiFi-XC.....	52
Elementos de PureLiFi LiFi-XC.....	53
Conexión del Equipo PureLiFi LiFi-XC.....	58
Descripción de Escenarios para la Red LiFi-XC.....	68
Inyección de Tráfico .....	70
Simulación en MATLAB de la Red Implementada con Equipos PureLiFi .....	71
Simulación del Sistema de Comunicación .....	71
Sistema de Comunicación en DCO-OFDM .....	85
Sistema de Comunicación en ACO-OFDM .....	86
Capítulo 4.....	88
Resultados y Análisis.....	88
Resultados Medidos.....	88
Throughput .....	88
Delay .....	89
Jitter .....	90
Paquetes Perdidos .....	91
Resultados Simulados .....	93
Throughput .....	93
Delay .....	95
Jitter .....	96
Paquetes Perdidos .....	97
Análisis de Resultados.....	98
Parámetros QoS.....	98
Análisis de modulación ACO-OFDM Y DCO-OFDM. ....	106
Capítulo 5.....	112

Conclusiones y Recomendaciones .....	112
Conclusiones .....	112
Recomendaciones .....	117
Trabajos futuros.....	118
Referencias.....	119

## Índice de Tablas

Tabla 1 Lámpara LED LuciCup II .....	54
Tabla 2 Parámetros de TX Driver .....	55
Tabla 3 Parámetros del AP LiFi-XC. ....	56
Tabla 4 Parámetros de la estación LiFi-XC (STA).....	58
Tabla 5 Características del Sistema completo .....	68
Tabla 6 Características de servidor y cliente.....	70
Tabla 7 Comandos iPerf .....	71
Tabla 8 Medición de throughput en los tres escenarios.....	89
Tabla 9 Medición de delay en los tres escenarios .....	90
Tabla 10 Medición de Jitter en los tres escenarios.....	91
Tabla 11 Medición de paquetes perdidos en los tres escenarios .....	92
Tabla 12 Parámetros medios en los tres escenarios.....	93
Tabla 13 Valores de throughput y ancho de banda en los tres escenarios para DCO y ACO .....	94
Tabla 14 Valores de delay en los tres escenarios. ....	96
Tabla 15 Valores de Jitter en los tres escenarios.....	97
Tabla 16 SLA para video telephone .....	105
Tabla 17 Valores de BER en los tres escenarios.....	111

## Índice de Figuras

Figura 1 Diagrama de bloques de un canal de comunicaciones con detección directa de intensidad óptica. ....	21
Figura 2 Espectro electromagnético de la Luz Visible.....	22
Figura 3 Estructura planar LED.....	23
Figura 4 Estructura de domo LED .....	24
Figura 5 Modelo de un sistema óptico inalámbrico que utiliza IM/DD.....	31
Figura 6 Modelo banda base de un sistema óptico inalámbrico que utiliza IM / DD.....	31
Figura 7 Forma normalizada del patrón de radiación Lambertiano generalizado. ....	33
Figura 8 Modelo de incidencia de luz en receptor .....	34
Figura 9 Reflexión Especular y Reflexión Difusa .....	35
Figura 10 Representación de una fuente y detector en un medio sin reflectores. ....	36
Figura 11 Diagrama de bloques del sistema DCO-OFDM .....	46
Figura 12 Diagrama de bloques del sistema ACO-OFDM.....	47
Figura 13 Topología de PureLiFi sistema LiFi-XC.....	51
Figura 14 Lámpara LED LuciCup II .....	53
Figura 15 LiFi-XC TX Driver .....	54
Figura 16 AP LiFi-XC.....	56
Figura 17 Estación LiFi-XC (STA) .....	57
Figura 18 Diagrama de Conexión .....	58
Figura 19 AP y lámpara LED LuciCup II en el techo.....	59
Figura 20 Conexión lámpara LED LuciCup II con AP.....	60
Figura 21 Montaje del AP.....	61
Figura 22 Adaptador de AC/DC.....	61
Figura 23 Conexiones del AP.....	62
Figura 24 Memoria USB PureLiFi-XC.....	63
Figura 25 Ubicación del instalador.....	63
Figura 26 Ventana de bienvenida .....	64
Figura 27 Ventana de finalización.....	64
Figura 28 Ventana de instalación completada.....	65
Figura 29 Conexión directa de la estación STA .....	65
Figura 30 Red LiFi-XC.....	66
Figura 31 Estado de conexión LiFi-XC .....	66
Figura 32 Propiedades de la red LiFi-XC.....	67
Figura 33 Primer escenario bajo el estándar 802.15.7 .....	68
Figura 34 Segundo escenario bajo el estándar 802.15.7 .....	69
Figura 35 Tercer escenario bajo el estándar 802.15.7.....	69
Figura 36 Sistema De Comunicación Óptico .....	71
Figura 37 Velocidad de transmisión vs Ancho de banda DCO .....	73
Figura 38 Velocidad de transmisión vs Ancho de banda ACO .....	74

Figura 39 Señales discretas en tiempo OFDM .....	76
Figura 40 Simetría hermítica en Señales discretas en tiempo OFDM.....	76
Figura 41 Señal DCO-OFDM .....	77
Figura 42 Señales discretas en tiempo OFDM .....	78
Figura 43 Señal ACO-OFDM .....	78
Figura 44 Transmisor dentro de la habitación .....	80
Figura 45 Potencia recibida.....	81
Figura 46 Delay del primer escenario .....	83
Figura 47 Jitter .....	84
Figura 48 Diagrama de bloques para Sistema de Comunicación en DCO-OFDM implementado .	85
Figura 49 Diagrama de bloques para Sistema de Comunicación en ACO-OFDM implementado .	86
Figura 50 Medición de throughput en el escenario 1.....	89
Figura 51 Medición de Delay en el escenario 2 .....	90
Figura 52 Medición de Jitter en el escenario 2 .....	91
Figura 53 Medición de Paquetes perdidos en el escenario 1 .....	92
Figura 54 Velocidad de transmisión vs ancho de banda.....	94
Figura 55 Velocidad de transmisión vs ancho de banda.....	95
Figura 56 Delay en el primer escenario .....	96
Figura 57 Jitter en el segundo escenario .....	97
Figura 58 Velocidad de transmisión en la práctica .....	98
Figura 59 Velocidad de Transmisión vs Ancho de Banda.....	99
Figura 60 Delay en la Práctica .....	101
Figura 61 Delay en la Simulación .....	101
Figura 62 Jitter en la Práctica.....	102
Figura 63 Jitter en la Simulación .....	103
Figura 64 Paquetes Perdidos en la práctica .....	104
Figura 65 Prioridades en para flujos de tráfico.....	105
Figura 66 Simulación BER vs SNR DCO-OFDM primer escenario .....	107
Figura 67 Simulación BER vs SNR DCO-OFDM segundo escenario .....	108
Figura 68 Simulación BER vs SNR DCO-OFDM tercer escenario .....	108
Figura 69 Simulación BER vs SNR ACO-OFDM primer escenario .....	109
Figura 70 Simulación BER vs SNR ACO-OFDM segundo escenario .....	110
Figura 71 Simulación BER vs SNR ACO-OFDM tercer escenario .....	110

## Resumen

En el presente trabajo se realiza el análisis de los parámetros de QoS para una red implementada con equipos de PureLiFi en modo infraestructura bajo el estándar IEEE 802.15.7 para ambientes indoor. Este análisis se realizó en base a los parámetros de Throughput, Jitter, Delay y Packet Loss en tres escenarios diferentes, para cada uno de estos escenarios se consiguió los valores medios de dichos parámetros mediante la herramienta iPerf.

Con los valores medios y los valores detallados en el datasheet de los equipos de PureLiFi se procede a realizar la simulación mediante la herramienta MATLAB de este sistema de comunicación óptica con dos técnicas de modulación DCO-OFDM (DC Clipped Optical – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), para recrear cada uno de estos escenarios y de esta manera describir el comportamiento del dispositivo basado en el estándar IEEE 802.15.7

Una vez concluido el desarrollo de la simulación se procede a realizar el análisis de los datos obtenidos tanto en la parte implementada como en la parte simulada en términos de QoS. Para evaluar la red implementada basa en el estándar IEEE 802.15.7

Para el análisis del rendimiento de las técnicas de modulación que Li-Fi admite en su capa física se realiza una comparación entre términos de *BER* (*Bit Error Rate*) y *SNR* (*Signal to Noise Ratio*) de la señal obtenida con cada una de las modulaciones mencionadas anteriormente, esto con el fin de conocer cuál de estas técnicas de modulación presenta mejores resultados para el sistema PureLiFi LiFi-XC.

### Palabras clave:

- **Li-Fi**
- **ACO-OFDM**
- **DCO-OFDM**

## Abstract

In this paper, the analysis of QoS parameters for a network implemented with PureLiFi equipment in infrastructure mode under the IEEE 802.15.7 standard for indoor environments is performed. This analysis was performed based on the parameters of Throughput, Jitter, Delay and Packet Loss in three different scenarios, for each of these scenarios the average values of these parameters were achieved using the iPerf tool.

With the average values and the detailed values in the datasheet of the PureLiFi equipment, we proceed to perform the simulation using the MATLAB tool of this optical communication system with two modulation techniques DCO-OFDM (DC Clipped Optical – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) and ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), to recreate each of these scenarios and in this way describe the behavior of the device based on or in the IEEE 802.15.7 standard

Once the development of the simulation is completed, the analysis of the data obtained in both the implemented part and the simulated part in terms of QoS is carried out. To evaluate the deployed network based on the IEEE 802.15.7 standard.

For the analysis of the performance of the modulation techniques that Li-Fi supports in its physical layer, a comparison is made between terms of BER (Bit Error Rate) and SNR (Signal to Noise Ratio) of the signal obtained with each of the modulations mentioned above, this in order to know which of these modulation techniques presents better results for the PureLiFi LiFi-XC system.

### **Keywords:**

- **Li-Fi**
- **ACO-OFDM**
- **DCO-OFDM**

## Capítulo 1

### Introducción

#### Antecedentes

El dispositivo precursor de las comunicaciones inalámbricas fue el fotófono desarrollado en el año 1880 pues desde éste se realizó el primer mensaje de teléfono inalámbrico, usando como medio de transmisión del sonido un haz de luz (Bellis, 2020); Para el año 1955 se implementó el primer mando a distancia inalámbrico para televisión Flash Matic Tuning su funcionamiento era simple, se disponía de un botón en una linterna y esta debía apuntar a la fotocelda colocada en las cuatro esquinas del televisor para poder apagarlo, encenderlo o cambiar de canal (Corcoran, 2012), después de dicho invento las comunicaciones inalámbricas no se han desarrollado durante varios años por falta de investigación.

En el año de 1997 aparece el primer estándar para redes inalámbricas IEEE 802.11 y desde entonces las comunicaciones inalámbricas fueron tomando auge entre los usuarios por la movilidad que presta esta tecnología (Cruz M., 2013), debido al dominio de las redes inalámbricas en las comunicaciones se produce la saturación del espectro radioeléctrico lo que conlleva a que las interferencias sean una problemática cada vez más común (Rojas L., 2018), es entonces que gracias a la industria de los LEDs se fundó el consorcio de comunicaciones por luz visible (VLCC), que estableció utilizar LEDs como fuente de datos e iluminación donde se utilizan longitudes de onda del espectro visible para establecer la comunicación, esta tecnología ha dado lugar a la creación en el estándar IEEE 802.15 al grupo 7 que trabaja en los estándares de redes inalámbricas de área personal dedicado a VLC. (Muñoz A., 2019), en este estándar IEEE 802.15.7 se describen los protocolos que se utilizan para transmisión de información inalámbrica usando frecuencias de luz visible, este establece dos características principales, la capa de acceso (MAC) que proporciona



el direccionamiento y control de acceso al canal cuyas funciones y servicios son el establecimiento del enlace y la terminación de una conexión a un medio de comunicación. Y la capa física (PHY) con una velocidad de datos que es capaz de soportar audio, vídeo y multimedia. (Balas, 2016).

### Justificación e Importancia

Actualmente el número de dispositivos móviles crece de manera exponencial, existen todo tipo de ordenadores, smartpone, tablet, smartwatch, así como aplicaciones móviles capaces de transmitir grandes cantidades de datos, estos dispositivos se utilizan de forma cotidiana por la mayoría de las personas, causando que el espectro radio eléctrico cada vez se encuentre más saturado.

Una alternativa de comunicaciones del espectro radio eléctrico (3KHz hasta 300GHz), es el uso de la comunicación por luz visible (VLC), en este tipo de comunicación se pueden utilizar frecuencias desde los 400THz hasta los 800THz, es decir aproximadamente 400THz de ancho de banda disponibles para VLC, con mencionado ancho de banda es poco probable que exista interferencia entre frecuencias mucho menos saturación del canal. Al utilizar este rango de frecuencias la velocidad de transmisión podría alcanzar el orden de los Gbps.

Los sistemas de VCL tienen una gran ventaja en cuanto a su implementación pues se puede utilizar la misma infraestructura de iluminación para la transmisión de datos, adicional esta tecnología brinda mayor velocidad, seguridad, privacidad, eficiencia energética, inmunidad electromagnética ya que su uso no tiene restricción al no causara interferencia con señales de radio frecuencia (Lopez, 2018) podemos decir entonces que VLC puede ser utilizado en comunicaciones inalámbricas donde los sistemas de RF presenten un rendimiento ineficiente.

Gracias a la ayuda del Ing. Jaime Andrés Proaño Benítez, quién el año 2019 realizó su trabajo de titulación para la ESPE de “EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UNA RED IEEE 802.15.7 EN MODO INFRAESTRUCTURA PARA AMBIENTES INDOOR” quién gentilmente permitirá el uso del

sistema de LiFi-XC de PureLiFi, cuyo sistema trabaja netamente con tecnología LiFi y que harán posible experimentar el comportamiento de esta red, para continuar con la investigación de esta tecnología que aún se encuentra en desarrollo. Después de revisar y estudiar varios trabajos realizados sobre tecnología Li-Fi, surge la idea de realizar un estudio comparativo entre los parámetros obtenidos de la parte práctica implementada y la parte simulada, posteriormente se expondrán los parámetros de QoS para evaluar la red IEEE 802.15.7 y determinar la técnica de modulación en los equipos Li-Fi correspondientemente.

### Alcance del Proyecto

Esta investigación tiene el propósito de revelar información detallada respecto a la funcionalidad del sistema de transmisión utilizando equipos ópticos y el medio de luz visible, del mismo modo comprobará si aplicando las especificaciones del estándar IEEE 802.15.7 como la utilización de las técnicas de modulación y el uso de frecuencias desde los 400THz hasta los 800THz, se puede conseguir tasas de transmisión de datos más altas, para luego compararla con la implementación y validar los límites que aún se tienen a nivel de hardware para lograr estas comunicaciones. (Proaño, 2019)

Para la parte práctica (que será implementada) con el sistema LiFi-XC utilizando equipos de PureLifi, y para la sección de simulación se utilizará la herramienta de Matlab para emular un sistema de comunicaciones con diferentes técnicas de modulación ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical OFDM) y DCO-OFDM (DC biased Optical OFDM) posteriormente se compararán los resultados obtenidos tanto de la parte implementada como la parte simulada para obtener conclusiones que permitan aclarar de mejor manera cuál de estas técnicas en estudio es la más conveniente para la tecnología Li-Fi y finalmente poder realizar un análisis comparativo entre los resultados prácticos y simulados.

Al realizar la simulación del sistema completo, utilizando equipos ópticos y el medio de luz visible, se genera un nuevo punto de partida para desarrollar nuevas técnicas de transmisión a través del estándar IEEE802.15.7. Con estos resultados se espera determinar el rendimiento máximo de transmisión de datos al que los dispositivos ópticos actuales pueden trabajar.

## Objetivos

### *Objetivo General*

Evaluar el desempeño de una red en modo infraestructura bajo el estándar IEEE 802.15.7 mediante implementación con equipos de PureLiFi y simulación con dos técnicas de modulación DCO-OFDM y ACO-OFDM.

### *Objetivos Específicos*

- Realizar el análisis del estado del Arte del estándar IEEE 802.15.7.
- Implementar una red en modo infraestructura del estándar IEEE 802.15.7
- Tomar mediciones asociadas a parámetros de calidad de servicio de la red implementada.
- Analizar, describir y simular (Matlab) un sistema de comunicación basado en el estándar IEE 802.15.7 utilizando diferentes tipos de modulación (DCO-OFDM y ACO-OFDM).
- Evaluar las métricas de la red implementada y realizar una comparativa frente a los estándares de QoS requeridos para redes IEEE 802.15.7.
- Evaluar las técnicas de modulación (DCO-OFDM y ACO-OFDM) y determinar cuál es la modulación que presenta mejor desempeño en una red LiFi implementada.

## Capítulo 2

### Marco Teórico

#### VLC (Comunicación por Luz Visible)

Los últimos años el avance en las comunicaciones inalámbricas se ha desarrollado de una forma abrupta, siendo la protagonista la tecnología basada en radio frecuencia como WIFI, para descongestionar este medio se ha retomado la investigación de la de las comunicaciones ópticas y esto ha sido posible gracias a los dispositivos LED (Light-Emitting Diode) ya que por su alta velocidad de conmutación permite su uso tanto para iluminación como para la transmisión de información, esto ha dado lugar a las VLC (Visible Light Communications) (Vega, 2015)

VLC consiste de tres módulos, emisor formado por un conjunto de LEDs, receptor compuesto por un fotodiodo que puede recibir todo el espectro de luz visible y canal óptico producido por las fuentes de iluminación artificial. (Crisanto, 2013)

#### Tecnología Li-Fi

El término LiFi (Light Fidelity) se utiliza por primera vez por Harald Haas para denominar una nueva forma de comunicación en la que combinaba la transmisión de datos con la iluminación con la que se podría resolver algunos problemas de WiFi como por ejemplo capacidad, eficiencia, disponibilidad, seguridad ya que este sistema de comunicaciones permite transmitir datos mediante diodos emisores de luz LEDs, al igual que otros sistemas LiFi está compuesto por un transmisor, canal y receptor, donde el primero convierte la señal eléctrica en óptica (LEDs). La técnica de modulación más utilizada es la modulación por intensidad y detección directa IM/DD (Intense Modulation / Direct Detection) en esta señal se modula la potencia instantánea de los datos que se quieren transmitir emitidos por el led y se propaga por el canal, mientras que el

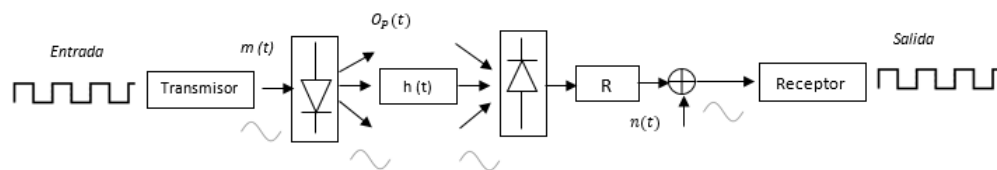
receptor toma las variaciones de intensidad y convierte la potencia óptica instantánea a corriente eléctrica para su posterior procesamiento. (Arteaga E., 2020)

### Intensity Modulation and Direct Detection (IM/DD)

Como se mencionó anteriormente las comunicaciones ópticas no guiadas utilizan frecuentemente la técnica de modulación por intensidad IM, donde la luz emitida depende directamente de la cantidad de corriente que ingresa a la fuente (LEDs), esta corriente (información) es modulada en el transmisor por una señal moduladora  $m(t)$ , la misma que genera una variación en la intensidad de la potencia  $O_p(t)$ , esta señal óptica cruza el canal representado por  $h(t)$  como respuesta impulsiva como se muestra en la Figura 1. (W Popoola, 2017), la información es recuperada en el receptor gracias a la detección directa DD, para lograr esto primero pasa por el fotodetector la luz con un rango de longitud de onda que es convertida de función de responsividad  $R$  a corriente, a la que se le agrega ruido AWGN (Additive White Gaussian Noise) figurado como  $n(t)$  debido a las características internas de fotodetector, de este modo la señal llega al receptor para recuperar la información. (W Popoola, 2017)

#### Figura 1

*Diagrama de bloques de un canal de comunicaciones con detección directa de intensidad óptica.*



*Nota:* En el diagrama se muestra el canal óptico representado por  $h(t)$ . Recuperado de (W Popoola, 2017)

### Fuentes Ópticas

Hay varios tipos de fuentes de luz, la más utilizada es la de los diodos emisores de luz (LED) usada para aplicaciones indoor en enlaces cortos. Las comunicaciones ópticas se basan en

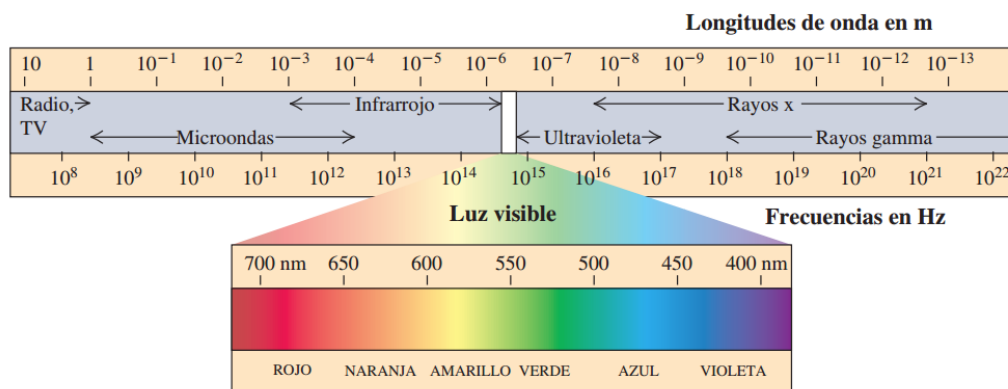
la transmisión de datos utilizando radiación lumínica sus fuentes deben tener determinadas características como la longitud de onda, ancho de línea, apertura numérica, alta eficiencia de iluminación y bajo consumo de potencia.

### LEDs

Los LEDs son dispositivos que se forman por dos junturas de un semiconductor dopado por materiales con déficit (P) o exceso (N) de electrones de valencia, al aplicar voltaje de polarización directa en la juntura P-N energiza los electrones los cuales generan un flujo de corriente liberando energía en forma de fotones, dependiendo del material pueden emitir en un rango de longitudes de onda (colores) desde la parte visible a la infrarroja (IR) del espectro electromagnético. El rango visual del ojo humano o luz visible está comprendido entre 400 nm hasta 700 nm, como podemos ver en la Figura 2. (Sanchez, 2012)

**Figura 2**

*Espectro electromagnético de la Luz Visible.*



*Nota.* En la gráfica se observa el rango de luz visible desde 400 nm hasta 700 nm. Recuperado de (Fonrouge, 2016)

### Estructuras básicas del LED.

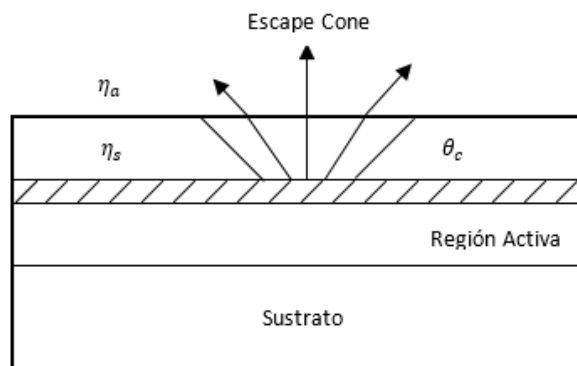
La estructura básica de un LED es una unión p – n en la que el tipo de material define su longitud de onda, hay varias estructuras, pero analizaremos, LEDs planos y de domo.

### ***Estructura planar***

La estructura planar se encuentra limitada respecto a la emisión de luz por los coeficientes de reflexión,  $\eta_a$  coeficiente de reflexión del medio externo y  $\eta_s$  el coeficiente de reflexión del material de la estructura, visibles en la Figura 3. En esta estructura la radiación de la luz tiene forma de cono condicionada por el ángulo crítico  $\theta_c$  por lo tanto también es limitada por reflexión total interna. (Z Ghassemlooy, 2017)

**Figura 3**

*Estructura planar LED*



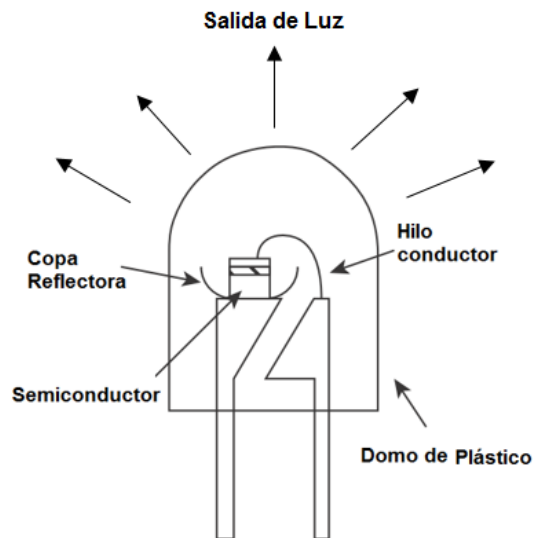
*Nota.* En el gráfico se observa la estructura planar del led, junto con el ángulo crítico y los coeficientes de reflexión de cada medio. Recuperado de: (Z Ghassemlooy, 2017)

### ***Estructura de domo***

La estructura de domo es la más utilizada y eficiente pues se descarta la limitación producida por la reflexión total colocando en el centro del domo el LED como se puede observar en la Figura 4, de igual manera los coeficientes de reflexión del semiconductor y del material del domo son bastante cercanos. Esta estructura cuenta con una capa reflectante que permite que la luz se emita en toda la forma curva del domo. (Z Ghassemlooy, 2017)

**Figura 4**

*Estructura de domo LED*



*Nota.* En el gráfico se observa la estructura tipo domo del led y cada una de sus partes Recuperado de: (Z Ghassemlooy, 2017)

### **Eficiencias Led.**

#### ***Eficiencia cuántica interna***

La eficiencia cuántica interna es la relación entre el número de fotones emitidos internamente por los electrones y el número de electrones que atraviesan la juntura P-N representada como  $\eta_{in}$  en la

Ecuación 1.

$$\eta_{in} = \frac{\text{número de fotones emitidos internamente}}{\text{número de todos los electrones que atraviesan la juntura}}$$

*Ecuación 1*

Cuando un electrón pasa de un estado excitado a un estado de menor energía, la diferencia de energía causada por la transición del electrón conduce a un proceso radiante (generación de luz) o no radiante (creación de calor), entonces eficiencia cuántica interna también



puede ser descrita en función de la relación entre la recombinación radiante y la recombinación total  $R_T$  como se puede ver en la

Ecuación 2, donde  $R_r$  recombinación radiante y  $R_{nr}$  recombinación no radiante, esta ecuación está ligada con la vida útil de la portadora donde  $\tau_r$  y  $\tau_{nr}$  son los tiempos de vida radiante y no radiante. (W Popoola, 2017)

$$\eta_{in} = \frac{R_r}{R_t} = \frac{(R_r)}{R_r + R_{nr}} = \frac{\left(\frac{1}{\tau_r}\right)}{\left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}\right)}$$

*Ecuación 2*

### ***Eficiencia cuántica externa***

La eficiencia cuántica externa mide la cantidad de fotones emitidos externamente del dispositivo, es la relación entre la recombinación radiante y la recombinación no radiante multiplicada por la absorción de la luz generada por el material semiconductor ver

Ecuación 3.

$$\eta_{ext} = \frac{\text{número de fotones emitidos externamente}}{\text{número de todos los electrones que atraviesan la juntura}}$$

*Ecuación 3*

Dicha ecuación se la puede expresar en función de la eficiencia cuántica interna  $\eta_{in}$ , donde  $\eta_t$  es la relación entre los fotones emitidos externamente y los fotones emitidos internamente como podemos ver en la

Ecuación 4. (W Popoola, 2017)

$$\eta_{ext} = \eta_{int} \times \eta_t$$

*Ecuación 4*

### ***Eficiencia de potencia.***

La eficiencia de potencia la cual será representada como  $\eta_p$  en la

Ecuación 5, es la relación entre la salida de potencia óptica y la potencia eléctrica de entrada del LED.

$$\eta_p = \frac{\text{potencia óptica de salida}}{\text{potencia eléctrica de entrada}}$$

Ecuación 5

### **Eficacia luminosa**

La eficiencia luminosa simbolizado por  $\eta_{lum}$ , es la relación entre el flujo luminoso expresado en lúmenes y la potencia eléctrica de entrada. Expresado en la

Ecuación 6, donde  $V$  es el voltaje e  $I$  es la corriente del LED.

$$\eta_{lum} = \frac{\text{Flujo luminoso}}{\text{potencia eléctrica de entrada}} = \frac{\text{Flujo luminoso} \left[ \frac{lm}{W} \right]}{VI}$$

Ecuación 6

El flujo luminoso es la potencia óptica apreciada por el ojo humano a diferentes longitudes de onda de luz, la sensibilidad del ojo se representa con  $V(\lambda)$  y el espectro de potencia de radiación óptica del LED en función de la longitud de onda con  $P_{op}(\lambda)$  en la

Ecuación 7.

$$\text{Flujo luminoso} = 683 \int V(\lambda) P_{op}(\lambda) d\lambda$$

Ecuación 7

### **Modelos de circuitos LED.**

El funcionamiento eléctrico del LED es similar a un diodo de unión PN normal.

- La característica de corriente-voltaje del dispositivo tiene la misma forma que la de un diodo de unión PN, es decir que, dependiendo de la tensión aplicada, un diodo puede operar en modo polarizado o “encendido”, o en modo inversamente polarizado es decir “apagado”.
- Los factores con más contribución para generar capacitancia intrínseca en los LEDs son la capacitancia de agotamiento debido a la presencia de una región de agotamiento entre los lados P y N, en condiciones de polarización inversa y un segundo componente debido a la carga, por los efectos de difusión y almacenamiento en condiciones de polarización directa.

- La modulación digital del LED implica dos estados: encendido/apagado, el modelo de dispositivo debe poder manejar condiciones de señal grande posiblemente cubriendo las condiciones de operación, donde los tiempos de subida y bajada están limitados por la capacitancia intrínseca del LED.
- El comportamiento lineal puede aproximarse en una pequeña señal en condiciones de polarización directa, la capacitancia de agotamiento es muy pequeña en comparación con la capacitancia de difusión. Por lo tanto, el modelo de pequeña señal incluye solo la capacitancia de difusión evaluada en la condición de polarización.
- El ancho de banda de un Led, se puede expresar de dos formas: la primera como ancho de banda óptico este es el ancho de banda al que se puede modular el LED y el segundo como ancho de banda eléctrico que es el ancho de banda eléctrico percibido por el fotodetector y estos vienen limitado por el tipo de vida medio de los portadores. (W Popoola, 2017)

### *Infrarrojo*

Existen varios tipos de LEDs que pueden emitir luz en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, presentando a los LEDs en tres categorías infrarrojo (IR), luz visible y ultravioletas. Los sistemas de luz infrarroja usan altas frecuencias, tiene una longitud de onda cercana a la de la luz y se comporta como ésta, no puede atravesar objetos sólidos como paredes, por lo que es seguro contra receptores no deseados.

### *Responsividad*

La Responsividad es la medida de eficiencia de conversión del fotodetector, se expresa como la relación entre la corriente de salida de un fotodetector y la potencia óptica recibida, representada como  $R(\lambda)$ , en la

Ecuación 8, donde  $M$  es factor de multiplicación,  $q$  es la carga del electrón,  $h$  es la constante de Plack,  $c$  es la velocidad de la luz,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $\eta$  es la eficiencia de fotodetector. (W Popoola, 2017)

$$R(\lambda) = \eta \left( \frac{q\lambda}{hc} \right) M$$

*Ecuación 8*

#### *Fotodetectores PIN*

Los fotodetectores tipo PIN consta de materiales semiconductores de tipo p y n separados por una región intrínseca, semi-aislante que aumenta el número de fotones que puede absorber, de igual forma aumenta la eficiencia cuántica del fotodiodo y reduce las capacitancias intrínsecas. (Sanchez, 2012)

#### *Fotodetectores APD*

Los fotodetectores tipo APD o avalancha proporciona una mejor responsividad ya que tiene un factor de multiplicación también llamada ganancia del flujo de electrones en su interior, representado en la

Ecuación 9, donde  $I_T$  es el valor promedio de la corriente de salida total e  $I_P = RP_r$  es la fotocorriente primaria no multiplicada, estos fotodetectores son usados cuando la potencia óptica de la señal recibida es limitada.

$$M = \frac{I_T}{I_P}$$

*Ecuación 9*

Entonces  $M$  para los fotodetectores PIN es igual a la unidad, ya que carece de factor de multiplicación. La corriente instantánea producida por un fotodetector viene dada por la  $MR(\lambda)P_{op}(t)$

Ecuación 10. Donde  $R(\lambda)$  es la potencia óptica recibida y  $P_{op}(\lambda)$  es la potencia de radiación óptica del LED en función de la longitud de onda. (W Popoola, 2017)

$$i(t) = MR(\lambda)Pop(t)$$

*Ecuación 10*

## Canal Óptico

La caracterización de un canal de comunicación se realiza mediante su respuesta al impulso del canal, que se utiliza para analizar los efectos de las distorsiones del mismo.

Las pérdidas de potencia se relacionan directamente con el canal, se consideran los tipos de configuraciones en un canal óptico inalámbrico dependiendo de dos parámetros:

- Línea de vista: LOS (Line Of Sight) y Non-LOS
- Dirección del receptor al transmisor: Directa (directed) o no directa (non-directed).

La primera depende de la existencia de obstáculos que bloquee la transmisión de luz entre transmisor y receptor, mientras que la segunda depende de que el transmisor tenga dirección hacia el receptor, dependiendo de estos parámetros se pueden describir los siguientes tipos de configuraciones:

- **Directed LOS:** Donde transmisor está dirigido al receptor por lo que el haz de luz es más pequeño por ende consume poca energía, tampoco existe obstáculo entre ellos, por lo que tiene alta velocidad de transmisión, la señal no sufre distorsión y el ruido de las fuentes de luz es rechazado cuando el campo de visión FOV (Field Of Vision) es estrecho. La velocidad está limitada por la pérdida de trayectoria en el espacio libre en lugar de por la dispersión multitrayecto. (Lorenzo, 2016)
- **Non-directed LOS:** El transmisor no está en dirección hacia el receptor, para ello se usan transmisores con un haz de luz más grande y receptores con un FOV amplio lo que genera costos más altos y sería necesaria una potencia de transmisión alta. (Lorenzo, 2016)

- **Directed non-LOS:** El transmisor está dirigido al receptor, también existe presencia de obstáculos, para ello se intenta que el receptor apunte a una superficie reflectante que permita superar el obstáculo. (Lorenzo, 2016)
- **Non-directed non-LOS:** El transmisor no está dirigido al receptor, de igual forma existen obstáculos, para solventar estos factores se crean trayectorias alternativas entre el transmisor y el receptor. (Lorenzo, 2016)

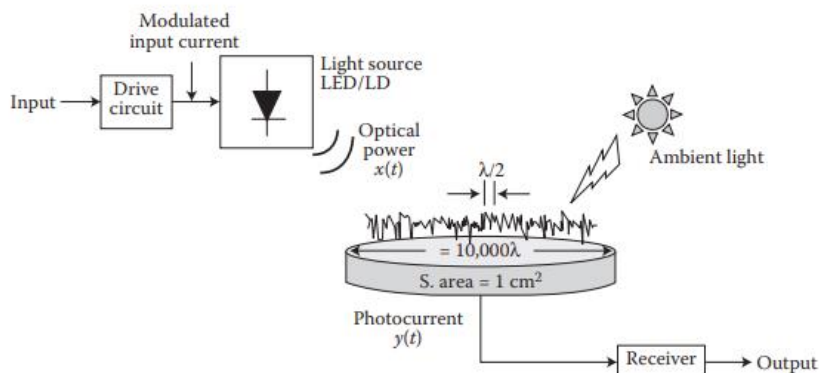
#### *Canal de Comunicación Inalámbrico Óptico Indoor.*

El modelo de canal con intensidad con detección directa (IM/DD) es usado para el modelado de canales infrarrojo sin embargo también se puede utilizar para un canal de comunicación de luz en general. (León, 2018)

En este modelo nos muestra que la señal transmitida es la potencia óptica instantánea emitida por el LED representada como  $x(t)$ , la cual cruza el canal  $h(t)$  y en función de la responsividad ( $R$ ) del fotodetector y al aumentar el ruido gaussiano blanco aditivo  $n(t)$ , se obtiene finalmente la señal  $y(t)$  que es la corriente instantánea recibida como se puede observar en la Figura 5.

**Figura 5**

Modelo de un sistema óptico inalámbrico que utiliza IM/DD.

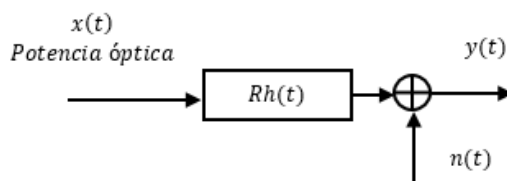


*Nota.* En el gráfico se observa el sistema de un canal de comunicación de luz Recuperado de: (W Popoola, 2017)

$$Y(t) = RX(t) \otimes h(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} RX(\tau)h(t - \tau)d\tau + n(t)$$

Ecuación 11

De la misma forma el canal puede ser modelado como un sistema lineal en banda base como se puede observar en la Figura 6 y la Figura 7 de la que obtenemos el valor de la señal eléctrica recibida en el fotodetector, donde  $\otimes$  representa la convolución. (W Popoola, 2017)

**Figura 6** Modelo banda base de un sistema óptico inalámbrico que utiliza IM / DD.

*Nota.* En el gráfico se observa el sistema óptico donde el canal se representa como  $Rh(t)$ , Recuperado de: (W Popoola, 2017)

Como se había comentado en el ítem anterior para el diseño de un sistema de comunicación óptica inalámbrica se debe tomar en cuenta, los sistemas LOS donde se asume que

el trayecto entre el transmisor y el receptor no está obstruido, además de los sistemas difusos que se basan en los reflejos del reflector, en ambos sistemas la señal transmitida sufre dispersión por trayectos múltiples causado por los reflejos de las paredes y otros reflectores. La dispersión por trayectos múltiples se caracteriza por una respuesta de impulso  $h(t)$ , definida de tal forma que la intensidad de la señal óptica recibida es la convolución de  $h(t)$  con la intensidad de la señal óptica transmitida.

### **Modelo de fuente y receptor.**

La intensidad de iluminancia se adopta para definir el brillo o intensidad del LED o una superficie iluminada, asumiendo que la fuente tiene un patrón de radiación Lambertiano, esto se presenta en términos del ángulo espacial  $\Omega$  y el flujo luminoso  $\varphi$  donde (Z Ghassemlooy, 2017):

$$R = \frac{d\varphi}{d\Omega}$$

*Ecuación 12*

Ahora para representar una fuente óptica y su haz se utilizará un  $\vec{r}_s$  como vector posición,  $\vec{n}_s$  vector unitario o normal,  $P_s$  la potencia de emisión y  $R_s(\varphi, \theta)$  patrón de intensidad de radiación o potencia óptica por unidad de ángulo sólido, emitida desde la fuente a una posición  $(\varphi, \theta)$  con respecto a  $\vec{n}_s$ . Entonces para el modelamiento de la fuente se usa el patrón de radiación Lambertiano que es independiente de  $\theta$ . (Barry, 1993)

$$R_s(\varphi) = \frac{n+1}{2\pi} P_s \cos^n(\varphi) , \quad \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$

*Ecuación 13*

De la Ecuación 13 se obtiene distribución de potencia, donde  $n$  es el número de modo del lóbulo de radiación, que explica la direccionalidad de la fuente, en la Figura 7 se puede observar que mientras mayor el número de modo la fuente tendrá mayor direccionalidad.

En la Ecuación 14 se muestra  $n$ , modo del lóbulo de radiación en función del ángulo de media potencia  $\varphi_{\frac{1}{2}}$  que es el semiángulo a la mitad de la iluminancia emitido.

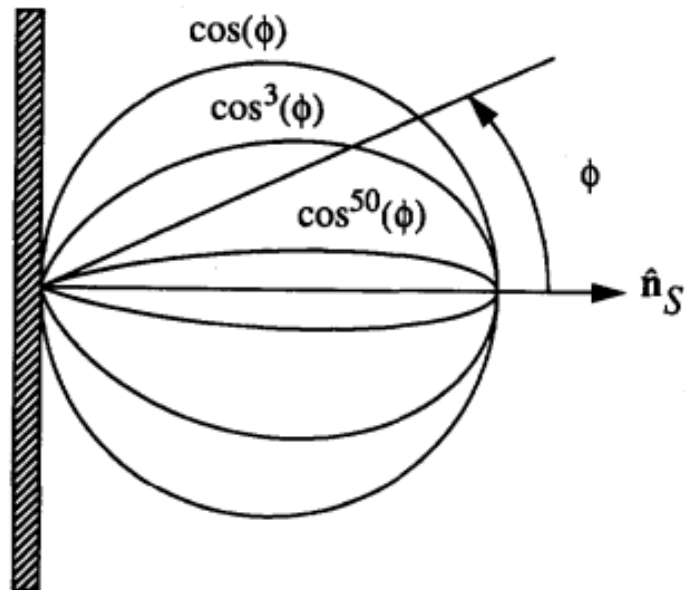


$$n = -\frac{\ln(2)}{\ln\left(\cos\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)\right)}$$

Ecuación 14

**Figura 7**

Forma normalizada del patrón de radiación Lambertiano generalizado.



*Nota.* En el gráfico se observa el patrón de radiación dependiendo del número de modo.

Recuperado de: (Barry, 1993)

También se puede escribir en términos de potencia como podemos verificar en la Ecuación 15.

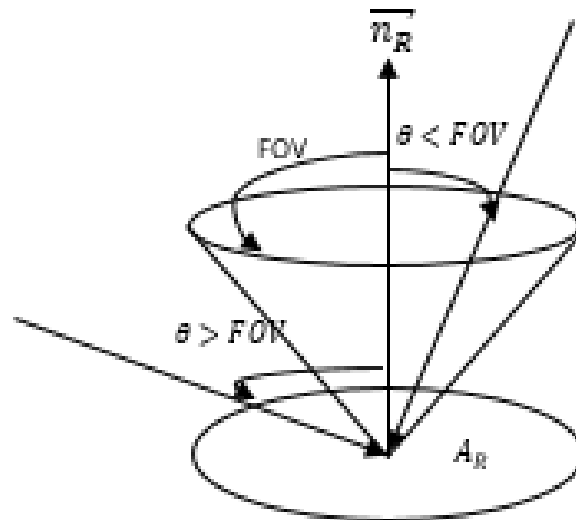
$$R_s(\varphi) = \rho \frac{n+1}{2\pi} P_s \cos^n(\varphi)$$

Ecuación 15

De la misma forma que al transmisor representaremos el receptor óptico con el vector posición  $\vec{r}_R$ , vector normal o unitario  $\vec{n}_R$ , área efectiva de recepción  $A_R$ , y el campo de visión FOV que es ángulo escalar respecto  $\vec{n}_R$ , de manera que un receptor detecta la luz cuyo ángulo de incidencia sea menor que FOV, como podemos apreciarlo en la Figura 8.

**Figura 8**

*Modelo de incidencia de luz en receptor*

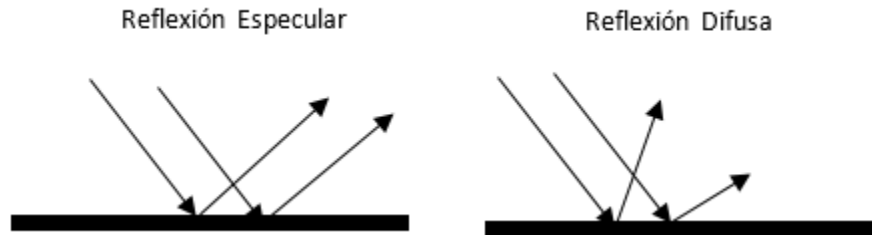


*Nota.* En el gráfico se observa la discriminación de la luz dependiendo del FOV. Recuperado de:

*(Barry, 1993)*

#### **Modelo de reflector.**

Las reflexiones pueden ser especulares cuando los rayos que inciden sobre la superficie, se reflejarán paralelos unos con otros y reflexiones difusas donde los rayos que inciden sobre la superficie como se pueden observar en la Figura 9, se reflejarán en diferentes direcciones, varios materiales como paredes, baldosas, alfombrase se aproximan a los reflectores lambertianos, por ellos se asumirá que todos los reflectores son lambertianos ideales puramente difusivos, donde el número de nodo es igual a uno.

**Figura 9***Reflexión Especular y Reflexión Difusa*

*Nota. En el gráfico se observa los tipos de reflexiones que se pueden presentar. Recuperado de: (García, 2020)*

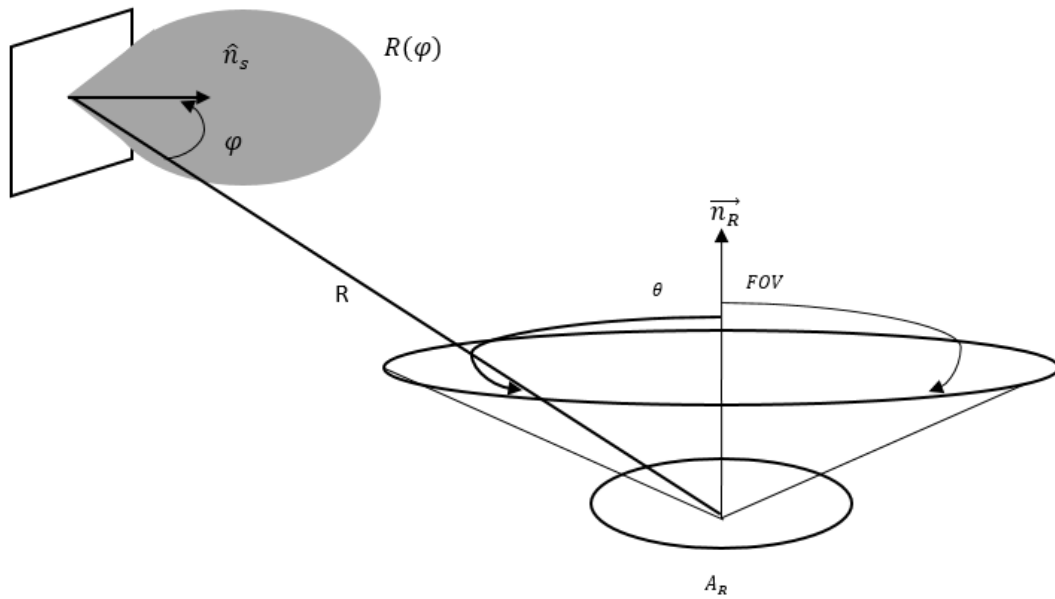
El patrón de intensidad de radiación  $R(\varphi)$  emitido por un reflector es independiente del ángulo de la luz incidente, para modelar la reflexión de un elemento reflectante diferencial con área  $dA$  y reflectividad  $\rho$ , primero se considera el receptor con área  $dA$  y se calcula la potencia  $dP$  que recibe, luego se modela el reflector diferencial como una fuente con potencia total  $P = \rho dP$  y un patrón de intensidad de radiación Lambertiano ideal, como lo indica la Ecuación 13 con  $n = 1$ .

**Respuesta Impulso.**

Si tomamos como referencia la fuente  $S$  y al receptor  $R$ , en un medio sin reflectores y la distancia ( $R$ ) entre  $S$  y  $R$  es grande respecto al tamaño del receptor como podemos apreciar en la Figura 10, con ello podemos describir que la distancia  $R^2 \gg A_R$ , por lo tanto la radiación recibida en el detector se aproxima a una constante, entonces la respuesta al impulso para este tipo de sistemas se considera como una función delta de Dirac escalada y desplazada en el tiempo, expresada en la Ecuación 16. (Barry, 1993)

**Figura 10**

Representación de una fuente y detector en un medio sin reflectores.



*Nota.* En el gráfico se observa la señal emitida desde el transmisor y como ingresa en caso en encontrarse dentro del FOV. Recuperado de: (Barry, 1993)

$$h^{(0)}(t; S, R) \approx \left( \frac{n+1}{2\pi} \right) \cos^n(\phi) d\Omega \operatorname{rect} \left( \frac{\phi}{FOV} \right) \delta \left( t - \frac{D}{c} \right)$$

Ecuación 16

En la Ecuación 16,  $h^{(0)}$  es la respuesta al impulso sin reflexiones,  $d\Omega$  es el ángulo sólido formado por el área diferencial asumiendo que ( $R^2 \gg A_R$ ), como se puede observar en la Ecuación 17.

$$d\Omega \approx \cos(\theta) \left( \frac{A_R}{R^2} \right)$$

Ecuación 17

La distancia que existe entre la fuente y el receptor es representada como R en la Ecuación 18.

$$R = \|\vec{r}_S - \vec{r}_R\|$$

Ecuación 18

$\theta$  Es el ángulo entre  $\vec{n}_R$  y  $(\vec{r}_S - \vec{r}_R)$  y mientras que el ángulo  $\varphi$  está comprendido entre  $\vec{n}_S$  y  $(\vec{r}_R - \vec{r}_S)$ , representados en la Ecuación 19 y Ecuación 20 respectivamente.

$$\cos(\theta) = \frac{\vec{n}_R \cdot (\vec{r}_S - \vec{r}_R)}{R}$$

Ecuación 19

$$\cos(\varphi) = \frac{\vec{n}_S \cdot (\vec{r}_R - \vec{r}_S)}{R}$$

Ecuación 20

La función rectangular está definida por la Ecuación 21,  $\text{rect}\left(\frac{\varphi}{\text{FOV}}\right)$  limita la incidencia de luz cuando se tiene un ángulo mayor a FOV y  $C$  es la velocidad de la luz.

$$\text{rec}(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{for } |x| > 1 \end{cases}$$

Ecuación 21

### Respuesta De Impulsos De Múltiple Rebote.

Al hablar de múltiples rebotes se hace referencia a la luz que le llega al receptor después de varias reflexiones, las cuales se representan mediante a la sumatoria que se observa en la Ecuación 22 , donde  $h^{(k)}(t)$  es la respuesta de la luz que experimenta  $k$  reflexiones, cuando se tiene línea de vista entonces  $h^{(0)}(t)$  se expresa con la ecuación 14, mientras que cuando  $k > 0$  se puede calcular de forma recursiva. (Barry, 1993)

$$h(t; S, R) = \sum_{k=0}^{\infty} h^{(k)}(t; S, R)$$

Ecuación 22

En la Ecuación 23 se puede representar la respuesta impulsiva de alto orden calculado de forma recursiva respecto a orden de reflexión anterior  $k - 1$ .

$$h^{(k)}(t; S, R) = \int_S h^{(0)}\left(t; S, \left\{\vec{r}, \vec{n}, \frac{\pi}{2}, dr^2\right\}\right) \otimes h^{(k-1)}(t; \{\vec{r}, \vec{n}, 1\}, R)$$

Ecuación 23

Al sustituir la Ecuación 16 en Ecuación 23 y realizar la convolución da como resultado la Ecuación 24, para integrar la Ecuación 22 y Ecuación 23 se realiza respecto a  $r$  en la superficie  $S$  de todos los reflectores.

$$h^{(k)}(t; S, R) = \left( \frac{n+1}{2\pi} \right) \int_S \left( \frac{(\rho_r \cos^n(\varphi) \cos(\theta))}{R^2} \right) \text{rec} \left( \frac{2\theta}{\pi} \right) h^{(k-1)}(t; \{\vec{r}, \vec{n}, 1\}, R) dr^2 \quad \text{Ecuación 24}$$

Entonces con la Ecuación 23 se obtendrá la respuesta del impulso de una única fuente  $S$  y un número  $k$  de reflexiones, si se obtiene la distribución y sincronización de la energía de  $S$  en las paredes y después usando las paredes como una fuente de luz distribuida, también se obtendrá la respuesta al impulso ( $K - 1$ ), por lo tanto es posible discretizar las superficies reflejantes en función de  $\Delta A$  (diferencial de área), y  $h^{(k)}(t)$  se aproxima a la Ecuación 25.

$$h^{(k)}(t; S, R) \approx \sum_{i=1}^N h^{(0)}(t; S, \xi_i) \otimes h^{(k)}(t; \xi_i, R) = \left( \frac{n+1}{2\pi} \right) \sum_{i=1}^N \left( \frac{(\rho_i \cos^n(\varphi) \cos(\theta))}{D^2} \right) \text{rec} \left( \frac{2\theta}{\pi} \right) h^{(k-1)} \left( t - \frac{D}{c}; \{\vec{r}, \vec{n}, 1\}, R \right) \Delta A \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde  $\xi_i$  es el elemento  $i$ -ésimo y  $N$  es el número total de superficies. Esta discretización espacial provocará también una discretización temporal, convirtiendo a la respuesta impulso una suma finita de funciones delta y desplazadas en el tiempo por lo que se obtiene un resultado más real cuando  $\Delta A$  y  $\Delta t$  se acercan a cero.

### Técnica de Modulación

Existen varias técnicas de modulación, para Li-Fi es necesario que estas técnicas sean acorde con IM/DD entre ellas tenemos:

- On-Off Keying (OOK): Es una modulación de encendido y de apagado, mientras mayor es la corriente se enviará un "1", caso contrario se emitirá una "0" lo que lo hace muy sensible a interferencias por ruido eléctrico.

- Pulse Amplitude Modulation (PAM): Esta modulación es eficaz respecto al ancho de banda, los datos son modulados en función de la amplitud del pulso emitido con una frecuencia constante en distintos tipos de intensidad.
- Color Shift Keying (CSK): La modulación CSK se basa al modificar las intensidades de color rojo, verde y azul de acuerdo a la sucesión de bits que se transmiten, por lo tanto es adecuada usarla con a RGB LEDs, ya que se puede enviar diversos colores paralelamente.
- Carrier-Less Amplitude and Phase Modulation (CAP): Se compone de dos señales ortogonales sin portadora. Como característica principal tiene una gran eficiencia espectral y es usada para aumentar la capacidad de enlaces VLC con ancho de banda limitado.
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM): Este tipo de modulación consiste en emplear múltiples subportadoras ortogonales que transportan información en diferentes frecuencias de manera simultánea, permitiendo así el envío de varios mensajes sobre un mismo canal, por lo tanto se produce una optimización del ancho de banda, con lo que se consigue sistemas más eficientes con mejor velocidad de transmisión y disminución de interferencia entre símbolos (ISI) respecto al uso de una sola portadora.

De estas modulaciones la que será objeto de estudio en este documento es OFDM por su alta eficiencia espectral así como la robustez ante el desvanecimiento por múltiple trayectoria.

#### *Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM)*

OFDM consiste en dividir un canal de frecuencias en varias bandas de frecuencias, permitiendo que cada una de ellas transporte información es decir se puede emitir múltiples mensajes en un mismo canal. La transmisión de las portadoras se encuentra solapadas para mejorar la eficiencia espectral y mediante la ortogonalidad de OFDM se controla la interferencia

interportadora (ICI) causada por este solapamiento. Las subportadoras con señal OFDM deben estar sincronizadas tanto en tiempo como en frecuencia. (Morales, 2017)

### *Modulación Óptica*

La modulación óptica mediante luz visible se realiza mediante la modulación de intensidad y detección directa (IM/DD). La modulación se realiza en la potencia óptica es decir a la intensidad luminosa (IM), por lo tanto, para usar OFDM debe ser adaptado al sistema óptico, ya que OFDM produce salidas positivas, negativas y complejas. Al utilizar un receptor que realiza detección directa (DD) es preciso convertir esta salida a una señal con valores netamente positivos y reales para poder ser transmitidos por los componentes ópticos (Lorenzo, 2016). Por esta razón nace la multiplexación por división de frecuencia ortogonal óptica (O- OFDM) la cual se divide en:

- DCO-OFDM (DC Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Multiplexación por división de frecuencia ortogonal con adición de señal DC óptica.
- ACO-OFDM (Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing) multiplexación por división de frecuencias ortogonales con recorte óptico asimétrico.

Para obtener la señal deseada se debe trabajar con la transformada inversa de Fourier con simetría hermítica.

#### **Transformada inversa de Fourier.**

La Transformada de Fourier (FT), permite cambiar una señal que se encuentra en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia sin alterar la información de dicha señal como se puede validar en la Ecuación 26.

$$f(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2j\pi st} dt$$

*Ecuación 26*



Lo que se requiere es transformar la señal que se encuentra en el dominio de la frecuencia pase a valores en dominio del tiempo para lo que se tiene la Ecuación 27 transformada inversa de Fourier (IFT).

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) e^{2j\pi st} ds$$

*Ecuación 27*

### **Simetría hermítica.**

Para poder trabajar con OFDM en medios ópticos la señal que se va a transmitir debe tener valores reales, para lo cual es necesario trabajar con la transformada de Fourier con simetría hermítica.

Generalmente la transformada inversa de Fourier tiene una salida compleja, pero en caso de que la señal de entrada presente simetría hermítica, es decir que su parte real debe ser una función par

Ecuación 28 y la parte imaginaria impar

Ecuación 29, se puede obtener una señal real con componente imaginaria igual a cero.

Entonces:

Una función  $f$ , es par o simétrica cuando:

$$f(s) = f(-s)$$

*Ecuación 28*

Una función  $f$ , es impar (o anti simétrica) cuando:

$$f(s) = -f(-s)$$

*Ecuación 29*

Ahora bien la transformada de Fourier presenta cuatro teoremas de Simetría

1. La FT de la parte par  $f_e$  de una función real es real:

$$f_e(s) = \text{Re}(f_e(s))$$

*Ecuación 30*

2. La FT de la parte par es par:

$$f_e(s) = f_e(-s)$$

*Ecuación 31*

3. La FT de la parte impar  $f_o$ , de una función real es imaginaria:

$$f_o(s) = \text{Im}(f_o(s))$$

*Ecuación 32*

4. La FT de la parte impar es impar:

$$f_o(s) = -f_o(-s)$$

*Ecuación 33*

Estas cuatro simetrías se las puede resumir de tal forma que representa la simetría hermítica, donde  $f(s)$  es una función continua compleja de  $s$  y  $\overline{f(-s)}$  es una la función de  $-s$  conjugada.

$$f(s) = \overline{f(-s)}$$

*Ecuación 34*

Cualquier función se puede representar como la suma en sus componentes reales  $\text{Re}(f(s)) = a(s)$ , e imaginarias  $\text{Im}(f(-s)) = jb(s)$ , entonces  $f(s)$ , se pue representar con la Ecuación 35.

$$f(s) = a(s) + jb(s)$$

*Ecuación 35*

Aplicando la definición de simetría hermítica, reemplazando la Ecuación 31 y Ecuación 33 en la Ecuación 35 obtenemos la Ecuación 36.

$$a(s) + jb(s) = a(-s) - jb(-s)$$

*Ecuación 36*

Entonces al emplear la IFFT Ecuación 27 en la identidad de Euler se obtiene la  $f(t) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)$

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(s) \cos(st) ds - j \int_{-\infty}^{\infty} F(s) \sin(st) ds$$

Ecuación 37.

$$f(t) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} F(s) \cos(st) ds - j \int_{-\infty}^{\infty} F(s) \sin(st) ds \right]$$

*Ecuación 37*

Utilizando la Ecuación 36 en la Ecuación 37 obtendremos:

$$f(t) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} [a(s) + jb(s)] \cos(st) ds - j \int_{-\infty}^{\infty} [a(-s) - jb(-s)] \sin(st) ds \right]$$

*Ecuación 38*

Desarrollando la Ecuación 38 se consigue la Ecuación 39 :

$$f(t) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} a(s) \cos(st) ds + j \int_{-\infty}^{\infty} b(s) \cos(st) ds - j \int_{-\infty}^{\infty} a(s) \sin(st) ds - j^2 \int_{-\infty}^{\infty} b(s) \sin(st) ds \right]$$

*Ecuación 39*

Al aplicar las propiedades de las funciones pares e impares en integrales en la Ecuación 39 se obtiene la Ecuación 40.

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a(s) \cos(2\pi st) ds + \int_{-\infty}^{\infty} b(s) \sin(2\pi st) ds$$

*Ecuación 40*

Como se puede verificar en la Ecuación 40 ya no existen componentes imaginarias y se pueden representar en sus componentes par e impar como en la Ecuación 41.

$$f(t) = f_e(t) + f_o(t)$$

*Ecuación 41*

### OFDM

La técnica de modulación OFDM consiste en transmitir un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias de tal manera que sean ortogonales entre sí, permitiendo enviar información de forma simultánea sobre un mismo medio.

Para aplicar OFDM en comunicaciones ópticas se requieren varias operaciones complejas por lo que se usa generalmente la transformada rápida de Fourier (FFT) y la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), entonces para transmitir la señal por un canal óptico se requiere que dicha señal sea real y positiva, al usar OFDM se debe eliminar la componente imaginaria en el dominio del tiempo así como la información que está componente lleva, como observamos en el inciso anterior esto se puede realizar al ingresar las portadoras a la IFFT y aplicando la simetría hermítica. (Lorenzo, 2016)

Teniendo esto claro los valores complejos que se obtienen a partir de modulación digital como modulación de amplitud en cuadratura (QAM) o modulación por desplazamiento de fase (QPSK), que son los valores que representan la ortogonalidad entre las subportadoras, por ende es una señal discreta, compleja en el dominio de la frecuencia, al ingresar dicha señal en la Ecuación 42 IFFT se convertirá en una señal discreta en el dominio del tiempo  $x_n$  un solo valor de la señal OFDM en función del tiempo. (León, 2018)

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\left(\frac{2\pi}{N}kn\right)}$$

*Ecuación 42*

Donde  $n$  es el índice de tiempo y  $k$  es el índice de la frecuencia,  $N$  el número de portadoras,  $X_k$  es la  $k$ -ésima subportadora compleja en función de la frecuencia, por lo que la señal discreta  $X$  al modulador OFDM no posee simetría hermítica. La simetría en forma discreta se presenta en la Ecuación 43.

$$X_k = \overline{X_{-k}} \quad 0 \leq k < N$$

*Ecuación 43*

Por ejemplo, si tenemos  $k = 0$ , se valida que el valor de  $k = -1$ , no existe entonces para evitar valores negativos en la Ecuación 43, se cambia la ecuación de la simetría haciendo referencia a la primera muestra cómo se puede observar en la Ecuación 44.

$$X_k = \overline{X_{N-1-k}} \quad , \quad 0 \leq k < \frac{N-1}{2}$$

*Ecuación 44*

### **Modulación DCO-OFDM.**

La modulación DCO-OFDM consiste en que los datos que ingresan como bits binarios son mapeados en un vector de  $N$  símbolos complejos  $S(k) = \{S_0, S_1, S_2, \dots, S_{N-1}\}$  y se transforma de serial a paralelo, al aplicar la conjugada de número complejo se ordenan obteniendo una señal discreta compleja en dominio de la frecuencia ver Ecuación 45.

$$S(k) = \{S_0, S_1, S_2, \dots, S_{\frac{N}{2}-1}, S_{\frac{N}{2}}, S_{\frac{N}{2}+1}, \dots, S_{N-1}\}$$

*Ecuación 45*

La siguiente fase tiene como objetivo cambiar del dominio de las frecuencia al dominio del tiempo, entonces la componente DC sería nula en el vector  $S$  con  $N$  número de subportadoras y en este caso se puede aplicar la Ecuación 44 ya que cumple con la simetría Hermítica, al utilizar la IFFT la salida será una señal real en función del tiempo, esta señal nuevamente pasa de paralelo a serial y para solucionar la interferencia entre símbolo (ISI) causada por la interferencia generada por el símbolo anterior cuando este se sobrepone, así como también la interferencia entre portadora (ICI), se añade el prefijo cíclico. Entonces la señal transita por el conversor digital analógico, así como de un filtro pasa bajos y por último para obtener una señal unipolar se agrega una componente DC de valor moderado la cual está expresada en la Ecuación 46 y con ello se reduce la señal a cero (zero clipping), es decir se realiza un recorte (clipping) en el caso de que la señal siga teniendo valores negativos. (Gil, 2013)

$$\beta_{DC} = \mu \sqrt{E\{x(t)^2\}}$$

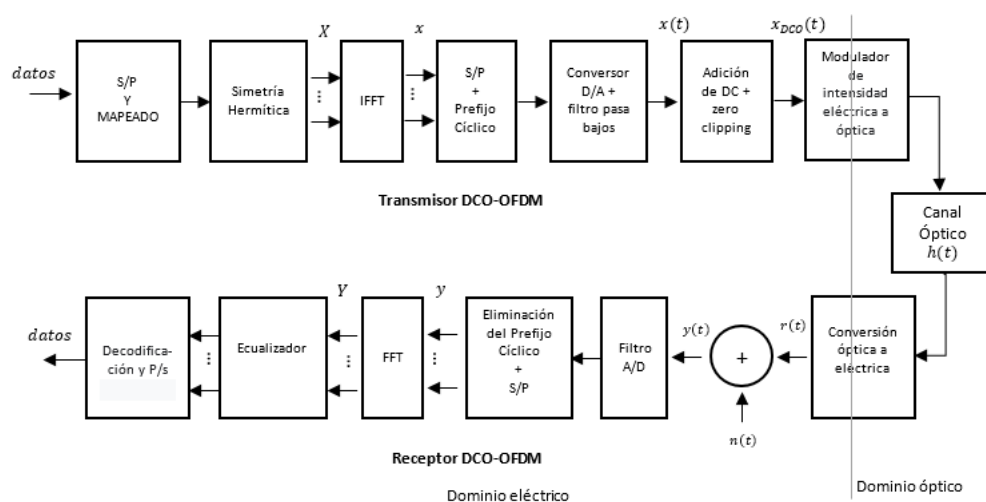
*Ecuación 46*

Donde  $\beta_{DC}$  es la varianza de niveles en función del tiempo  $x(t)$  en dB  $\mu$  es un valor constante, al introducir el DC los valores que se encuentren bajo el nivel de conducción del LED se recortan formando el ruido de recorte. (Gil, 2013)

Para el receptor la señal óptica se transforma en eléctrica, y la primera fase es eliminar el prefijo cíclico y los símbolos nuevamente cambiamos a paralelo estos se encuentra en función del tiempo al pasar por la FFT transforma la señal discreta en tiempo a discreta en frecuencia, cada una de estas subportadoras tanto pares como impares contienen la información por lo que deben pasar por un ecualizador para frenar los efectos del canal, la misma se decodifica y demodula hasta obtener la información en bits. Está representación se la puede observar en la Figura 11 (Gil, 2013)

**Figura 11**

*Diagrama de bloques del sistema DCO-OFDM*



*Nota.* En el diagrama se observa el proceso para realizar una modulación en DCO-OFDM.

Recuperado de: (León, 2018)

Como se puede observar en la *Ecuación 45* Ecuación 47 la información se encuentra desde  $S_1$  hasta  $S_{\frac{N}{2}-1}$ , mientras que las otras subportadoras llevan la señal real, entonces mediante la *Ecuación 47* se obtendrá el valor de la velocidad de transmisión para un sistema DCO-OFDM, donde el valor de  $B$  es el ancho de banda,  $M$  es el grado de modulación en cuadratura,  $N$  es el

número de elementos contenidos en  $S$ , y  $N_g$  el número de elementos los cuales se agregan de intervalo de guarda en el prefijo cíclico. (León, 2018)

$$R_{DCO-OFDM} = \left( \frac{\frac{N}{2} - 1}{N + N_g} \right) B \log_2(M) \frac{\text{bits}}{s}$$

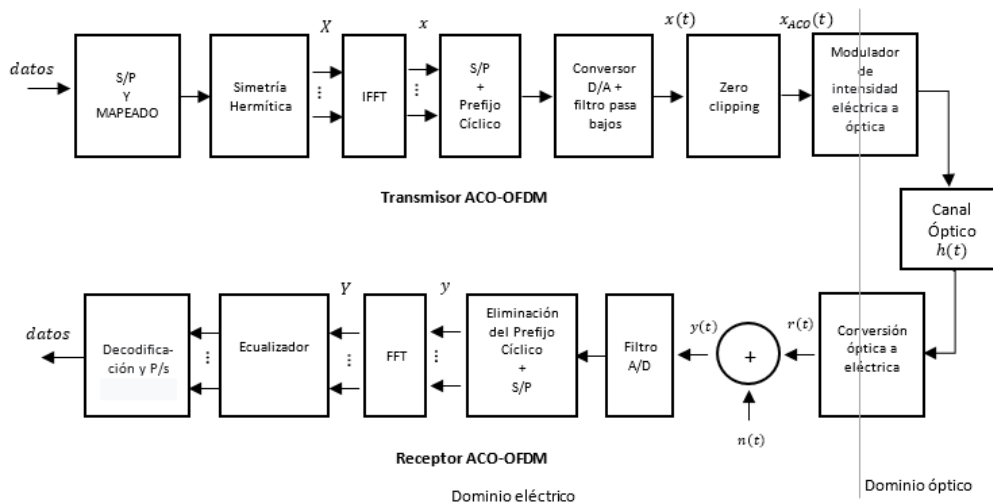
Ecuación 47

### Modulación ACO-OFDM.

La modulación ACO-OFDM utiliza la simetría hermitica con ella se puede extraer una señal real en el dominio del tiempo, para esto es necesario recortar la parte negativa, adicional está modulación lleva la información en las portadoras impares, esto debido al recorte que se realiza a la parte negativa de la señal, en la Figura 12, se puede observar el diagrama de bloques de la modulación. (León, 2018)

**Figura 12**

*Diagrama de bloques del sistema ACO-OFDM*



*Nota.* En el diagrama se observa el proceso para realizar una modulación en ACO-OFDM.

Recuperado de: (León, 2018)

Como se puede observar en la primera parte los datos ingresan al modulador en cuadratura en forma de bits los cuales son mapeados, pasando de serie a paralelo es esta sección

es donde se va a conseguir los números complejos de cada subportadora denominada  $S_k$  como se puede validar en la Ecuación 48, de esta manera se llegará a tener una simetría hermítica con la información solo en las subportadoras impares.

$$\begin{aligned}
 S &= \{0, X_0, 0, X_1, 0, \dots, 0, X_{M-1}, 0, \overline{X_{M-1}}, 0, \dots, 0, \overline{X_1}, 0, \overline{X_0}\} \\
 &= \{0, S_1, 0, S_3, 0, \dots, 0, S_{\frac{N}{2}-1}, 0, S_{\frac{N}{2}+1}, \dots, S_{N-1}\}
 \end{aligned}$$

*Ecuación 48*

Entonces la señal que se obtiene será una señal discreta en el dominio de la frecuencia de simetría hermítica denominada  $S$ , esta señal debe ser transformada al dominio del tiempo gracias a la IFFT, de esta manera se obtendrá una señal real, después se debe convertir la señal de paralela a serie y pasar por un conversor digital a analógico y un filtro pasa bajos, posteriormente se procede a seccionar la parte negativa de la señal pasando por un bloque reductor a cero (Zero clipping), cuya distorsión sólo afecta a la componentes pares. Por tanto, la información queda libre de ruido para que pueda ser transmitida por el canal. (Gil, 2013)

Para el receptor la señal óptica se transforma a corriente debido a los fotodetectores agregando el AWGN, con ello la señal es filtrada, ahora que se tiene una señal digital se procede a quitar el prefijo cíclico y pasar la señal de serie a paralelo, entonces la señal discreta en el dominio del tipo al pasar por la FFT, se tendrá la señal en dominio de la frecuencia, la misma pasa por el ecualizador para anular los efectos del canal, finalmente a la señal se le extraen tan solo las subportadoras impares que son las que llevan la información, son estas señales las que son decodificadas y demodulada en cuadratura para obtener la información en forma de bits. (León, 2018)

Si  $S$  es un conjunto de  $N$  elementos tal que  $s = \{S_0 S_1 \dots S_{N-1}\}$  entonces en un total de  $N$  subportadoras donde la información solo es transmitida por las subportadoras impares es decir  $\frac{N}{4}$  subportadoras. Las demás subportadoras ayudaran para tener una señal real en tiempo y



contrarrestar el ruido de recorte, dando como resultado la obtención de la Ecuación 49 en la que describe la velocidad de la transmisión en un sistema ACO-OFDM.

$$R_{ACO-OFDM} = \left( \frac{\frac{N}{4}}{N - Ng} \right) B \log_2(M) \frac{(bits)}{s}$$

Ecuación 49

#### Estándar IEEE 802.15.7

El IEEE 802.15.7 es un estándar donde se describen los protocolos utilizados para Li-Fi, es decir comunicaciones inalámbricas de corto alcance mediante luz visible, ofreciendo alta velocidad de transmisión y que es capaz de soportar audio, vídeo y multimedia, combinando la iluminación con la comunicación de datos a la par, adicionalmente en este estándar se define la capa física (PHY) y la capa de acceso medio (MAC). (Tixi, 2016)

La capa MAC, acceso al medio es la encargada de suministrar los mecanismos necesarios para el direccionamiento y el acceso al canal como comunicación multicast, unicast o brocadas.

La capa PHY, física realiza la selección del canal, la transmisión, recepción de datos y la corrección de errores, dentro de la capa física.

#### *PureLiFi en una Red IEEE 802.15.7 en Modo Infraestructura*

Varios investigadores se encuentran trabajando para el desarrollo de dispositivos que sean compatibles con Li-Fi, entre ellos PureLiFi, una empresa co-fundada por el conocido como “padre de Li-Fi” el profesor Haas. PureLiFi promete acceso inalámbrico con alta velocidad de transmisión, así como mayor seguridad de datos al denegar acceso a redes externas no deseadas, brindando la integración de servicios de iluminación y datos utilizando la misma infraestructura. (Lorenzo, 2016)

En la tecnología Li-Fi a través de las luces LED permite que la fuente de luz transmita datos de forma inalámbrica, para ello se debe configurar dicha fuente con un punto de acceso (AP) para

poder acceder a la red. Entonces PureLiFi implementa un equipo LiFi-XC que es una solución netamente en Li-Fi la cual brinda acceso múltiple, movilidad y facilidad de uso, por lo que la experiencia de un usuario es comparable al de las tecnologías inalámbricas existentes. (Proaño, 2019)

#### **Características del sistema PureLiFi.**

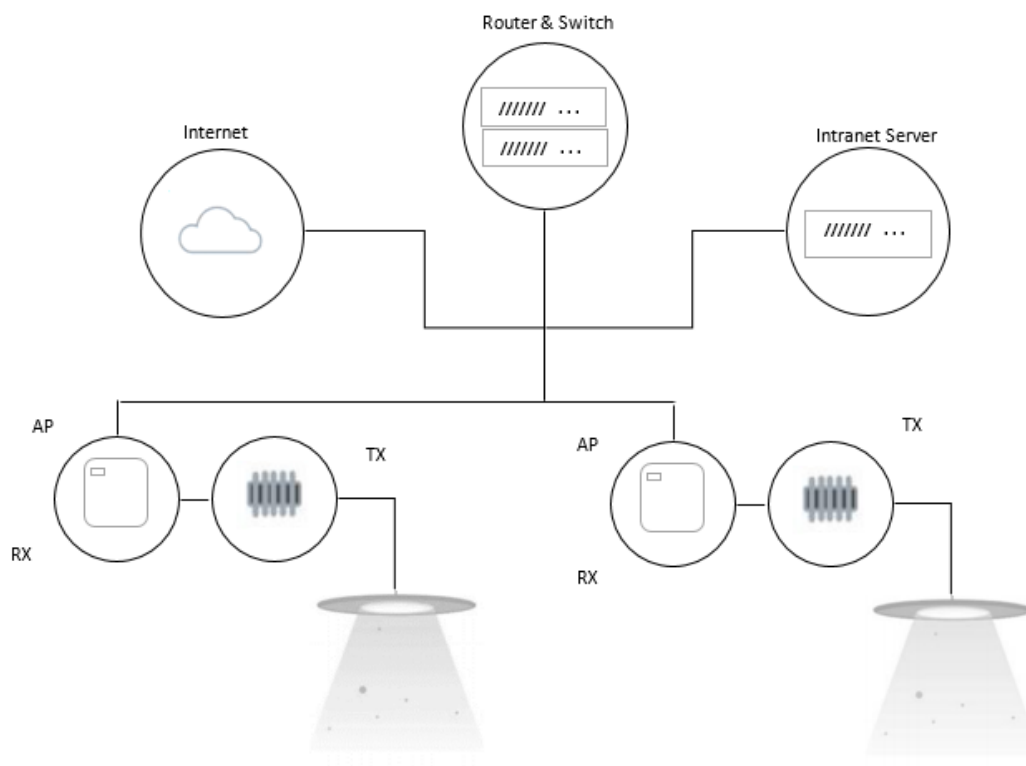
- Sistema Li-Fi completamente en red proporciona conectividad tanto en IPv4 como en IPv6 de un extremo a otro
- Enlace inalámbrico dúplex completo que proporciona hasta 43 Mbps en enlace descendente y ascendente
- Un solo (AP) admite hasta 8 estaciones (STA) unidad LiFi-XC Station
- Debido a que la luz no puede atravesar las paredes, la señal Li-Fi proporciona seguridad en un determinado espacio.
- Li-Fi puede definir el área de iluminación y no presenta interferencia con otras fuentes de luz, de igual forma LiFi puede trabajar en zonas hostiles de RF ya que no provoca interferencia a nivel de radiofrecuencia.
- Li-Fi utiliza la infraestructura de la iluminación LED para brindar otro servicio, el acceso a la red.

#### ***Topología de PureLiFi***

En la Figura 13, se puede observar la topología de modo infraestructura del sistema de PureLiFi, el punto de acceso (AP) es el encargado de la transmisión y recepción de las señales, el punto de acceso LiFi-XC permite el acceso hasta 8 usuarios a la vez, de igual forma es posible cambiar de AP adyacentes sin necesidad de realizar una nueva conexión de forma manual lo que hace que este cambio de AP sea imperceptible para el usuario. (Proaño, 2019)

**Figura 13**

*Topología de PureLiFi sistema LiFi-XC*



*Nota.* En el gráfico se muestra la conexión del equipo PureLiFi desde el acceso al internet hasta la transmisión por luz visible. Recuperado de: (Proaño, 2019)

## Capítulo 3

### Metodología

En el presente trabajo se emplea una metodología comparativa entre implementación y simulación de una red basada en el estándar IEEE 802.15.7.

Para la implementación se utiliza el equipo de PureLiFi LiFi-XC, se aplica el método explicativo, para la descripción de cada uno de los dispositivos que conforman la red y el método cuantitativo, para valorar las métricas obtenidas al realizar una inyección de tráfico mediante el software iPerf sobre la red basada en el estándar IEEE 802.15.7 en modo infraestructura.

En la simulación se trabaja con el método experimental para cada una de las modulaciones utilizadas, DCO-OFDM y ACO-OFDM, diseñando una red basada en el estándar IEEE 802.15.7 a través del software MATLAB, una vez obtenido los resultados, se aplica el método cuantitativo para evaluar las diferentes métricas de QoS.

Con los datos obtenidos, utilizando los métodos antes descritos, finalmente se realiza la comparación entre la implementación y simulación.

#### Implementación de la Red IEEE 802.15.7 con el Sistema PureLiFi LiFi-XC

La tecnología Li-Fi utiliza la luz LED para realizar la transmisión de datos, realizando una modulación a velocidades que son indetectables para el ojo humano, pero pueden ser detectadas por el receptor de PureLiFi.

El sistema Li-Fi de PureLiFi indica que una vez conectada a la red brinda IPv4 y conectividad IPv6, el enlace inalámbrico full dúplex ofrece 43Mbps, puede trabajar a una distancia mínima de 0,60m y máxima de 6m, un solo AP permite conectar hasta 8 estaciones STA, trabaja con gran variedad de luminarias LED con las que se puede controlar la intensidad de iluminación mediante el control patentado DALI, 0-10V y COAP. (PureLifi, 2017)

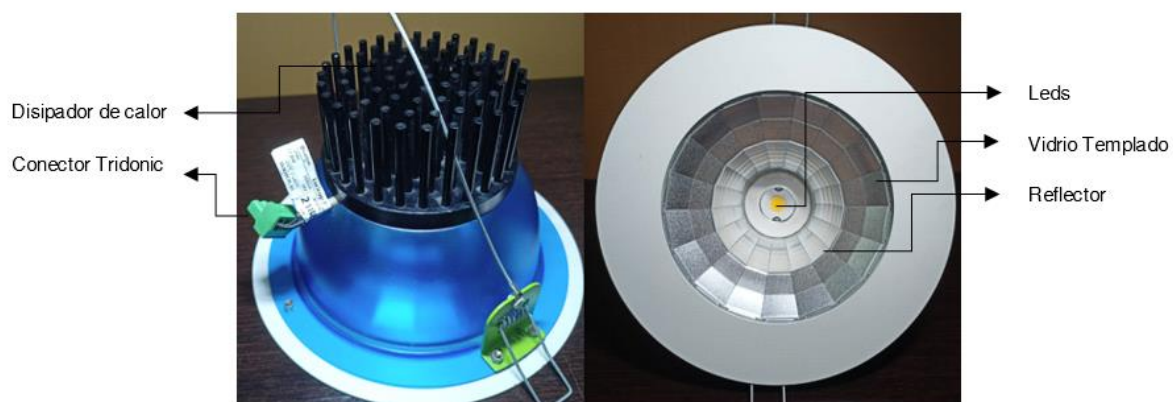
### *Elementos de PureLiFi LiFi-XC*

Para la implementación de la red LiFi en modo infraestructura se usan los componentes del sistema PureLiFi LiFi-XC, que permite implementar un sistema Li-Fi.

#### **Lámpara LED.**

**Figura 14**

*Lámpara LED LuciCup II*



*Nota.* En el gráfico muestra la imagen de la lámpara desde la parte superior e inferior.

La lámpara LED LuciCup II brinda luz constante con brillo de alto rendimiento, se encuentra diseñada con un LED con un disipador de calor para proveer grandes rendimientos en potencia, tiene una vida útil de 50000 horas, posee un controlador Tridonic precableado con conector de empuje para conexión, cuenta con un reflector de aluminio que provoca una luz homogénea, los cuales están protegidos por vidrio templado, como se detalla en la Figura 14, adicional las descripciones de la lámpara se encuentran en Tabla 1 (Lucibel, 2016)

**Tabla 1***Lámpara LED LuciCup II*

Parámetros	Valor	Unidades
Voltaje de alimentación	34	VDC
Corriente	500	mA
Potencia de entrada	17.8	W
Temperatura de Operación	-25 - +45	°C
Vida Útil	50000	H

*Nota.* En la tabla se encuentran los valores a los que trabaja la lámpara LED. Fuente: (Lucibel, 2016)

### TX Driver (TX).

**Figura 15***LiFi-XC TX Driver*

*Nota.* En grafico se muestra el dispositivo TX en la primera cara se observa la conexión hacia el AP y en la segunda la conexión a la lámpara LED.

En la Figura 15 se observa el controlador LiFi-XC TX el cual consta del conector 3-way push-in, que permite la conexión con la lámpara LED, así como del Conector MicroFit-3.0 para la comunicación con el AP, por ello los controladores LiFi-XC TX permiten una fácil adaptación a varias luminarias LED. Los parámetros del TX se las detallan en la Tabla 2. (PureLifi, 2017)

**Tabla 2***Parámetros de TX Driver*

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Voltaje para la lámpara</b>	2-55	VDC
<b>Corriente máxima para lámpara</b>	700	mA-DC
<b>Consumo de potencia máxima.</b>	4.2	W
<b>Temperatura de Operación</b>	0 – 35	°C
<b>Humedad sin condensación</b>	20 – 95	%
<b>Interfaz AP</b>	Conector MicroFit-3.0 de 10 hilos	-
<b>Conector de lámpara</b>	3-way push-in	-
<b>Calibre del alambre de la lámpara</b>	30-16	AWG

*Nota.* En la tabla se encuentran los valores a los que trabaja el TX Driver del sistema PureLiFi LiFi-XC. Recuperado de: (PureLiFi, Snapshot, 2017)

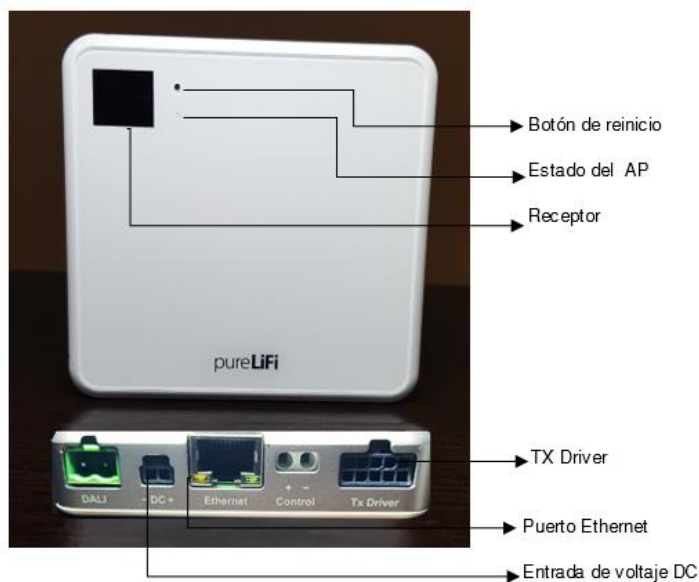
**Punto de acceso**

El Access Point (AP) es el dispositivo encargado de realizar tanto transmisión como recepción de señales, cada AP LiFi-XC permite trabajar simultáneamente con múltiples usuarios, también brinda movilidad al usuario ya que puede pasar de un AP a otro adyacente sin necesidad de conexión manual. Los parámetros del sistema del AP LiFi-XC se las puede observar en la Tabla 3. (PureLifi, 2017)

El AP o Access Point consta de las siguientes partes enumeradas en la Figura 16, el LED indica el estado del AP, este depende del color en caso de ser rojo indica que el controlador está en modo carga, de ser rojo intermitente indica avería, naranja se encuentra en modo de espera y verde encendido, de igual forma cuenta con el Conector Micro-Fit 3.0 para la conexión con el TX Drive, la conexión hacia internet y la alimentación.

Figura 16

AP LiFi-XC.



*Nota.* En grafico se muestra el AP con cada una de sus partes de la cara frontal, así como su cara lateral con los puertos para las conexiones con el TX, la conexión hacia internet y la alimentación.

Tabla 3

Parámetros del AP LiFi-XC.

Parámetros	Valor	Unidades
<b>Voltaje de alimentación</b>	27 – 57	VDC
<b>Temperatura de Operación</b>	0 – 35	°C
<b>Consumo de potencia en Stand-by</b>	4	W
<b>Interfaz de datos</b>	Gigabit Ethernet	-
<b>Interfaz de controlador</b>	Conector Micro-Fit 3.0 de 10 hilos	-
<b>Potencia de entrada</b>	Conector Microfit 3.0 de 2 hilos	-
<b>Indicador de estado LED</b>	Tri-estado – rojo, naranja, verde	-

*Nota.* En la tabla se encuentran los valores a los que trabaja el AP del sistema PureLiFi LiFi-XC.

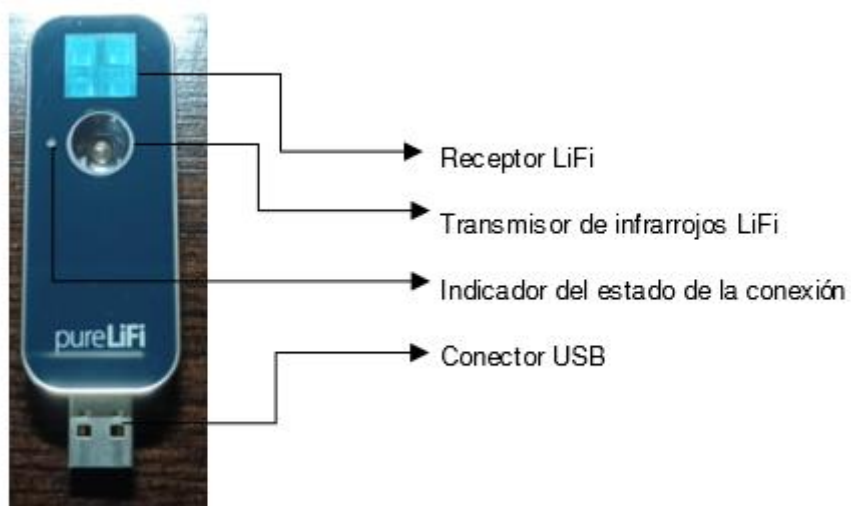
Recuperado de: (PureLiFi, Snapshot, 2017)



### Estación LiFi-XC (STA).

**Figura 17**

*Estación LiFi-XC (STA)*



*Nota.* En grafico se muestra la Estación LiFi-XC (STA) con cada una de sus partes de la cara frontal, así como el puerto para las conexiones con la PC.

En la

se observa la estación LiFi-XC (STA) y sus partes. La unidad LiFi-XC Station (STA) se encuentra alimentada por USB 2.0, esto permite al usuario tener movilidad y facilita el uso de este sistema, ahora para la conexión hacia el AP LiFi-XC utiliza las herramientas que ya existen en los sistema operativos como Windows, Linux y Mac OS adicional tiene un indicador del estado de la conexión que depende del color del LED para identificar si la estación está recibiendo la señal del AP (color verde) o si la estación no puede recibir la señal del AP (color naranja). Los parámetros de la estación LiFi-XC (STA) se las puede observar en la Tabla 4. (PureLiFi, 2017).

Tabla 4

Parámetros de la estación LiFi-XC (STA)

Parámetros	Valor	Unidades
Interfaz de Datos	USB 2.0	-
Consumo de potencia máxima.	2.5	W
Temperatura de Operación	0 – 35	°C
Humedad sin condensación	20 – 95	%

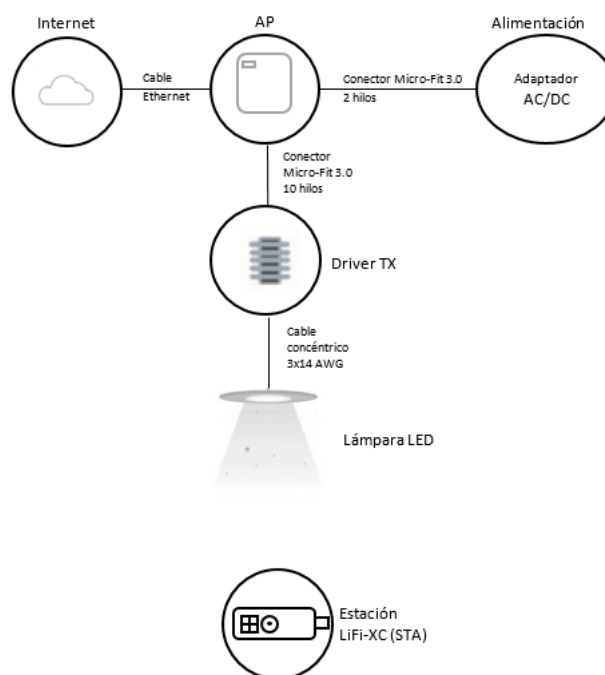
Nota. En la tabla se encuentran los valores a los que trabaja la estación LiFi-XC. Recuperado de:

(PureLiFi, Snapshot, 2017)

Conexión del Equipo PureLiFi LiFi-XC

Figura 18

Diagrama de Conexión



Nota. En el gráfico se muestra la conexión del equipo PureLiFi desde el acceso al internet hasta el receptor. Recuperado de: (Proaño, 2019)

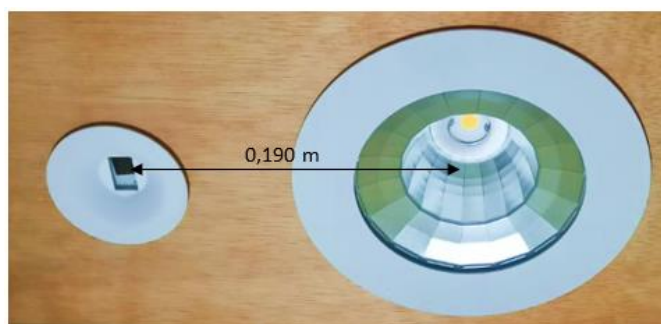
Para la implementación de una red IEEE 802.15.7 con el equipo PureLiFi LiFi-XC, se realizó una conexión DC al AP, el cual proporciona alimentación a la lámpara mediante el Driver TX, como se muestra en la Figura 18.

Teniendo en cuenta el diagrama anterior se detalla el montaje de los equipos paso a paso, para su funcionamiento.

Primero es necesario adecuar el lugar donde se va a colocar la lámpara LED, realizando dos incisiones en el techo, el primero para la lámpara LED de 0.185m de diámetro y el segundo de 0.065m de diámetro para colocar el AP, es importante recordar que se debe tener acceso a la parte superior para la instalación del AP, de igual manera las especificaciones del equipo indica que la lámpara LED debe estar máximo a 0,20m de distancia del AP como se muestra en la Figura 19, esto se realiza para la estación LiFi-XC tenga línea de vista tanto para la lámpara LED así como con el receptor que se encuentra en el AP.

### Figura 19

*AP y lámpara LED LuciCup II en el techo.*

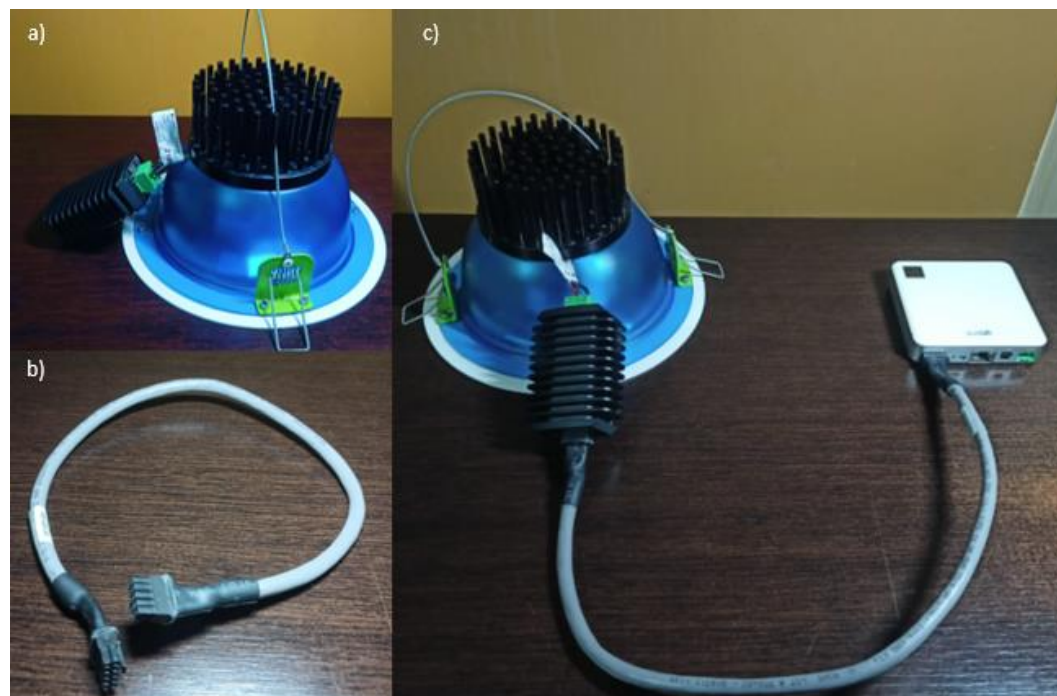


*Nota.* Distancia entre AP y La lámpara LED LuciCup II instaladas en el techo.

A continuación, para la conexión del punto de acceso se conecta la lámpara desde el conector Tridonic al TX Driver (TX), luego se procede a conectar el TX con el AP mediante el cable concéntrico de Conector Micro-Fit 3.0 de 10 hilos estas conexiones las podemos validar en la Figura 20.

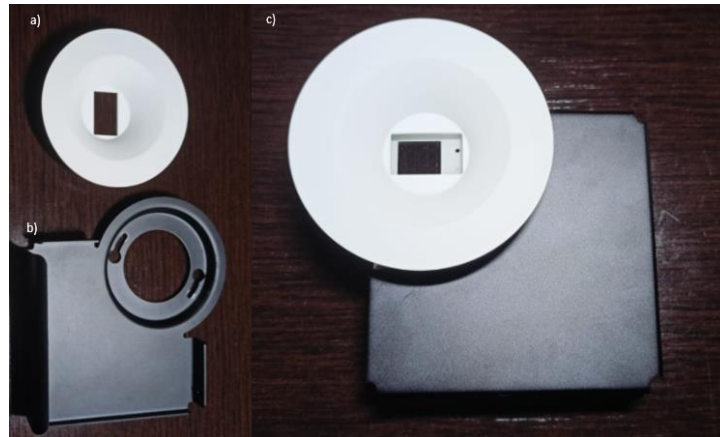
**Figura 20**

*Conexión lámpara LED LuciCup II con AP*



*Nota. En la figura a) se puede observar el Conector Tridonic al TX Driver, en la figura b) se observa el cable concéntrico 3x14 AWG con conector Micro-Fit 3.0 de 10 hilos y en la figura c) se observa la conexión total desde la lámpara hasta llegar al AP*

Posteriormente se realiza la instalación del circuito mostrado en la Figura 20 sección c) en el techo en las incisiones mostradas en la Figura 19, para ello se utilizan los soportes que se muestran en la Figura 21 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** inciso a) y b) necesarios para estabilizar el AP, mientras que en c) se puede observar el montaje de los dos soportes el tray que es la protección entre el techo y el AP, y el funnel protege el receptor del AP. Para instalar el AP en el techo se debe colocar la bandeja desde la parte superior del techo en el orificio del AP realizado anteriormente, seguido se coloca el funnel desde la parte inferior asegurando el tray y el funnel, sobre el tray se coloca el AP boca abajo dejando que el receptor se muestre por el funnel.

**Figura 21***Montaje del AP*

Nota. En la figura a) se observa el Funnel o embudo para AP, en la figura b) se muestra el Tray o bandeja AP y en la figura c) se muestra el montaje completo del soporte para el AP.

Luego se realiza la conexión a internet con cable Ethernet categoría 5, una vez completadas todas las conexiones mencionadas anteriormente se realiza la alimentación desde el adaptador AD/DC puesto que si se alimenta el AP sin tener conectada la lámpara LED puede provocar daños al equipo. En la Figura 22 se puede observar el Adaptador de AC/DC con conector 2 hilos Microfit 3.0

**Figura 22***Adaptador de AC/DC*

Nota. En el gráfico se puede observar el adaptador de AC/DC con conector 2 hilos Microfit 3.0

En la Figura 23 se muestra las conexiones del AP hacia el driver TX mediante el cable 10 hilos Microfit 3.0, la conexión a Internet por puerto Gigabit Ethernet y la alimentación del AP por cable 2 hilos Microfit 3.0 – 48 VDC, 1,25 A, así como la conexión del driver TX hacia la lámpara LED.

### Figura 23

*Conexiones del AP*



*Nota.* En la figura se muestra el AP conectado hacia la lámpara LED LuciCup II así como la conexión hacia internet mediante el puerto Ethernet y la conexión con el adaptador de AC/DC para su alimentación.

#### **Instalación el software la estación LiFi-XC (STA).**

Para la instalación del software entregado por PureLiFi-XC en la memoria USB mostrada en la Figura 24, es necesario que el sistema operativo, sea compatible con la estación LiFi-XC, puede ser Windows, Linux o Mac.

**Figura 24**

*Memoria USB PureLiFi-XC*



*Nota.* En la figura se observa la memoria USB que viene con el kit del sistema PureLiFi-XC, para descargar los drives del sistema.

La instalación del software es bastante sencilla de forma Plug-and-Play como se puede observar en los siguientes pasos para Instalación en Windows.

**Paso 1.-** Se procede a abrir el controlador USB LiFi-XC, se ingresa a Windows Driver y se abre el instalador mostrado en la Figura 25.

**Figura 25**

*Ubicación del instalador*

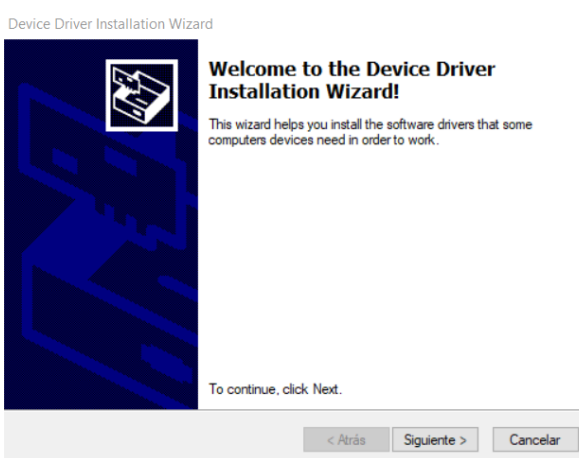
Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
dpinst	9/10/2017 19:59	Documento XML	2 KB
dpinst_x64	1/11/2017 12:47	Aplicación	665 KB
dpinst_x86	1/11/2017 12:47	Aplicación	542 KB
DriverInstaller.nsi	25/5/2017 16:45	Archivo NSI	3 KB
<b>Install</b>	1/11/2017 12:47	Aplicación	61 KB
lifi_x64.sys	1/11/2017 12:48	Archivo de sistema	4.075 KB
lifi_x86.sys	1/11/2017 12:48	Archivo de sistema	3.979 KB
lifi_x64.sys	1/11/2017 12:47	Archivo de sistema	4.075 KB
lifi_xc_x86.sys	1/11/2017 12:48	Archivo de sistema	3.979 KB
purelifi	1/11/2017 12:48	Catálogo de segur...	13 KB
purelifi	1/11/2017 13:57	Información sobre...	9 KB
WdfCInstaller01011.dll	1/11/2017 12:48	Extensión de la ap...	1.600 KB

*Nota.* En la figura se observa la ubicación del archivo dentro del USB y el aplicativo para la instalación del controlador.

**Paso 2.-** Seguido aparece la ventana emergente que indica: “Bienvenido al instalador del controlador LiFi-XC” como se muestra a la Figura 26, se coloca clic en siguiente.

**Figura 26**

*Ventana de bienvenida*

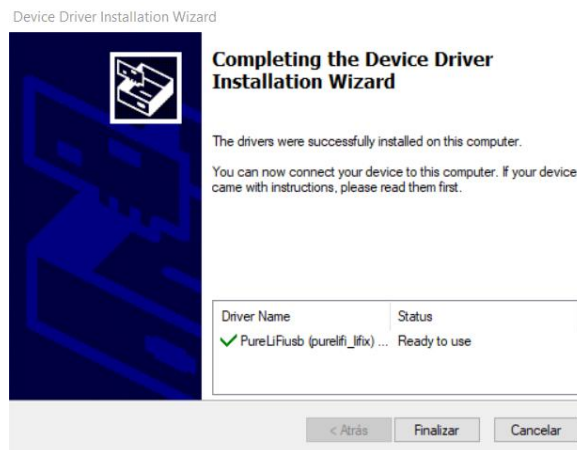


*Nota.* En la figura se observa la ventana de bienvenida del instalador

**Paso 3.-** Posteriormente después de la instalación de programa se presenta ventana emergente que indica la correcta instalación del controlador USB LiFi-XC que se muestra en la Figura 27.

**Figura 27**

*Ventana de finalización*



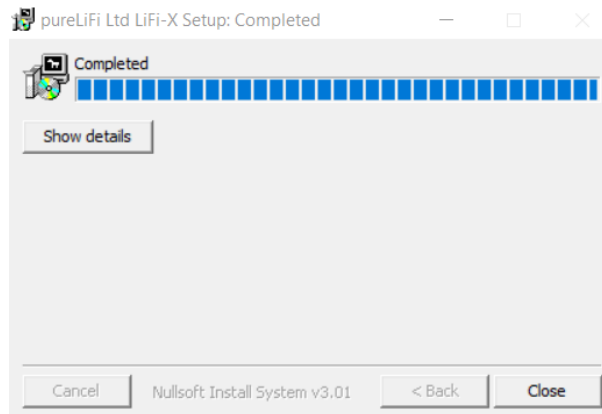
*Nota.* En la figura se observa la ventana de finalización del instalador



**Paso 4.-** Para terminar la instalación se coloca clic en cerrar de la ventana que se muestra en la Figura 28.

### Figura 28

*Ventana de instalación completada*



*Nota.* En la figura se muestra la ventana de instalación completada

Finalmente se conecta la estación LiFi-XC (STA) al ordenador mediante el conector USB como se muestra en la Figura 29

### Figura 29

*Conexión directa de la estación STA*

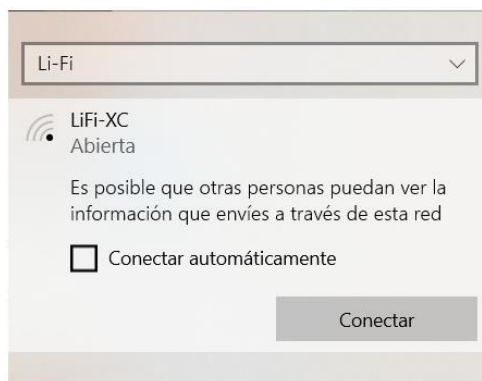


*Nota.* En la figura se muestra la conexión entre la estación STA y la PC.

Una vez concluidas todas las conexiones físicas como la instalación del software, se procede a configurar la red en el ordenador, para ello se selecciona red inalámbrica de la lista de redes expandida como se muestra en la Figura 30 y se procede a hacer clic en conectar.

**Figura 30**

*Red LiFi-XC*



*Nota. En la figura se muestra la búsqueda de la red Li-Fi en la PC*

La red estará operativa al validar el estado Conectado, como se muestra en la Figura 31.

**Figura 31**

*Estado de conexión LiFi-XC*



*Nota. En la figura se muestra es estado de conexión a la red Li-Fi en la PC*

Al colocar en propiedades, se observa la configuración de la red, se debe tener claro que Li-Fi es una tecnología que aún se encuentra en desarrollo por lo que los diferentes sistemas operativos no lo reconoce como protocolo 802.15.7 si no que lo hace con la versión más reciente de Wi-Fi es decir IEEE 802.11ac, tal como se puede validar en la Figura 32. (Proaño, 2019)

**Figura 32**

*Propiedades de la red LiFi-XC*

🏠 LiFi-XC

### Configuración de IP

Asignación de IP: Automático (DHCP)

Editar

### Propiedades

SSID:	LiFi-XC
Protocolo:	Wi-Fi 5 (802.11ac)
Tipo de seguridad:	Abierto
Canal de red:	0
Velocidad de vínculo (recepción/transmisión):	28/28 (Mbps)
Dirección IPv6 local de vínculo:	fe80::300a:9358:2cfe:c69c%3
Dirección IPv4:	192.168.1.33
Servidores DNS IPv4:	200.105.225.2 190.110.215.2
Fabricante:	PureLiFi
Descripción:	purelifi LiFix
Versión del controlador:	13.57.43.41
Dirección física (MAC):	70-B3-D5-95-93-28

Copiar

*Nota.* En el gráfico se observa las propiedades de la red LiFi-XC en la PC

Finalmente, al concluir con estos pasos se tiene una red bajo el estándar 802.15.7, es decir una red Li-Fi.

Una vez instalada la infraestructura de la red con los equipos anteriormente descritos PureLiFi ofrece las características detalladas en la Tabla 5.

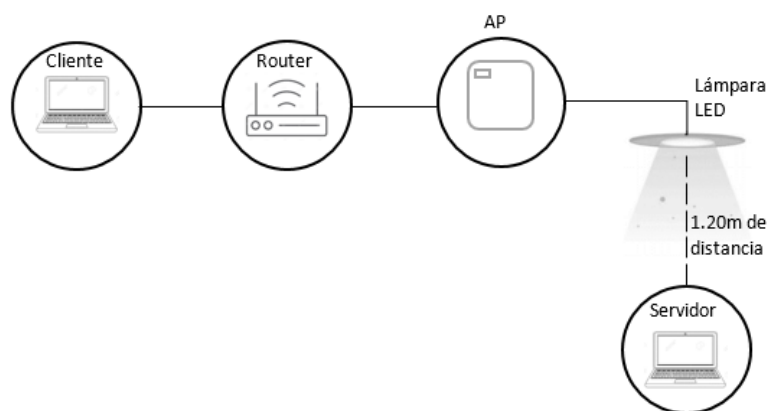
**Tabla 5***Características del Sistema completo*

Parámetros	Valor
Downlink line (max.):	43 Mbps
Uplink line (max.):	43 Mbps
Distancia operativa mínima	1.0 m
Distancia operativa máxima	6.0 m
Número máximo de usuarios simultáneos	8
Inter-AP handover (roaming)	admitido

*Nota. En la tabla se muestran los valores ofrecidos al instalar el sistema PureLiFi-XC (PureLiFi, Snapshot, 2017)*

*Descripción de Escenarios para la Red LiFi-XC*

Para los escenarios se implementa el modelo cliente servidor, entonces en el primer escenario descrito en la Figura 33, el servidor se encuentra a 1.20m de distancia de la lámpara de forma vertical para la inyección de tráfico desde el cliente hasta el servidor.

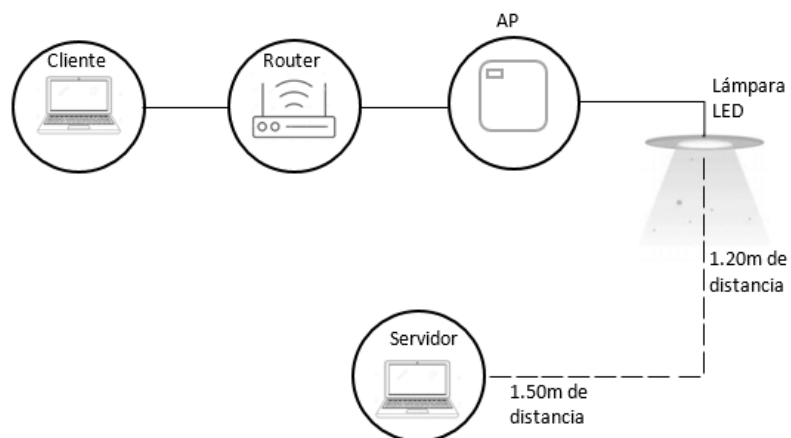
**Figura 33***Primer escenario bajo el estándar 802.15.7*

*Nota. En el grafico se muestra el primer escenario que se implementa bajo el estándar 802.15.7.*

En la Figura 34, se observa el segundo escenario donde el servidor se encuentra a 1,20m de distancia de la lámpara y desplazada 1,50m hacia al frente.

**Figura 34**

*Segundo escenario bajo el estándar 802.15.7*

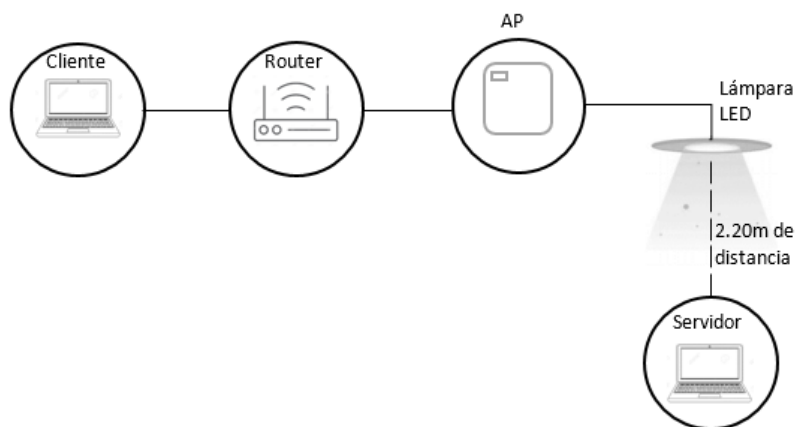


*Nota.* En el grafico se muestra el segundo escenario que se implementa bajo el estándar 802.15.7

En la Figura 35, se observa el tercer escenario en el que el servidor se encuentra a 2,20m de distancia de la lámpara de forma vertical para la inyección de tráfico desde el cliente hasta el servidor.

**Figura 35**

*Tercer escenario bajo el estándar 802.15.7*



*Nota.* En el grafico se muestra el tercer escenario que se implementa bajo el estándar 802.15.7

### *Inyección de Tráfico*

En cada uno de los escenarios establecidos en el ítem anterior se inyecta tráfico para obtener las métricas y evaluarlas.

Para la inyección del tráfico se utiliza la herramienta iPerf, donde se realizan 10 inyecciones en cada uno de los escenarios para analizar de mejor manera los datos obtenidos.

#### **iPerf**

iPerf fue desarrollado por el Distributed Applications Support Team (DAST) es una herramienta diseñada para realizar pruebas en redes, en este caso se utilizará el modelo servidor y cliente. iPerf permite configurar varios parámetros como retardo, paquetes perdidos, así como el rendimiento de la red de forma unidireccional o bilateralmente, puede trabajar tanto en Linux como en Windows, los datos que se pueden obtener de esta herramienta son: BW, throughput, retardo, variación del retardo y pérdida de paquetes o datagramas y es utilizado a través de la línea de comandos. (Fuertes W., 2016)

**Tabla 6**

*Características de servidor y cliente*

	<b>Cliente</b>	<b>Servidor</b>
<b>Modelo de ordenador</b>	ASUS Windows 8.1	ASUS Windows 10
<b>IP</b>	192.168.1.34	192.168.1.33

*Nota.* En la tabla se muestra el modelo de PC, sistema operativo e ip con la que se trabaja.

Para trabajar con iPerf, se ingresa a la consola de Windows o “cmd” en modo administrador, se ingresa a la carpeta donde se encuentra el programa y se procede a configurar el ordenador como servidor y luego el cliente apuntando la IP del servidor, para ello se coloca los siguientes comandos:

- Servidor: iperf3 –s
- Cliente: iperf3 –c [dirección IP servidor]

Los comandos descritos en la Tabla 7 se implementarán en el cliente para la obtención de los parámetros a analizar.

**Tabla 7**

*Comandos iPerf*

Métricas	Comando
Throughput	iperf3 -c [dirección IP servidor]
Delay	ping [dirección IP servidor]
Jitter	iperf3 -c [dirección IP servidor]
Paquetes perdidos	iperf3 -c [dirección IP servidor]-u -b [Valor medio de Throughput]k

*Nota.* En la tabla se detalla la lista e comandos utilizados para obtener los parámetros de QoS

### Simulación en MATLAB de la Red Implementada con Equipos PureLiFi

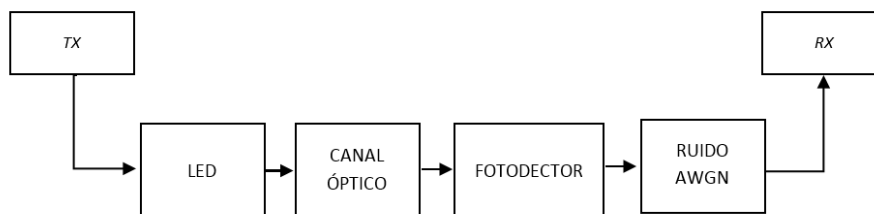
Esta parte del documento se centra en la simulación del sistema de comunicación óptica con dos técnicas de modulación ACO-OFDM y DCO-OFDM, esta simulación se realiza con las características del equipo PureLiFi, así como algunos valores obtenidos en las pruebas realizadas, ya que al ser Li-Fi una tecnología en desarrollo, no se detallan las características físicas de cada elemento utilizado en los equipos.

### Simulación del Sistema de Comunicación

Para comenzar con el desarrollo de la simulación se detalla por bloques las funciones que se utilizan en Matlab para la implementación y luego describir el programa principal.

**Figura 36**

*Sistema De Comunicación Óptico*



*Nota.* En el diagrama se muestra cada se simulará para el sistema de comunicación óptico

### Condiciones para la Velocidad de Transmisión.

En esta sección del documento se detalla la programación para la obtención de la velocidad de transmisión.

En primer lugar, se define el valor del número de subportadoras a transmitir, se declara el vector  $M$  para evaluar el grado de modulación en cuadratura y el vector  $Bw$  para el ancho de banda de cada subportadora con estos parámetros establecidos, se procede a realizar el cálculo de la velocidad de transmisión para cada modulación.

En segundo lugar se define el número de información real que se transmite en cada tipo de modulación para DCO-OFDM se aplica la Ecuación 45 y para la modulación en ACO-OFDM la Ecuación 48 es decir al transmitir un número de subportadoras  $a$  en DCO se envían  $ndco = 2 * a + 2$  subportadoras, en caso de ser ACO se envían  $naco = 4 * a$  subportadoras.

En tercer lugar se calcula la velocidad de transmisión dependiendo del tipo de modulación para DCO-OFDM se aplica la Ecuación 47 y para la modulación en ACO-OFDM la Ecuación 49, en función de del ancho de banda y grado de modulación en cuadratura, de este último se obtiene la cantidad de bits que se transmiten por símbolo, tomado en cuenta las limitaciones que se tiene por el equipo es decir PureLiFi limita la velocidad de transmisión de 43Mbps y el ancho de banda total de canal está limitado a 90MHz por el fotodetector tipo avalancha que utiliza el equipo.

Por último se grafica la velocidad de transmisión en función del ancho de banda y de la modulación en cuadratura.

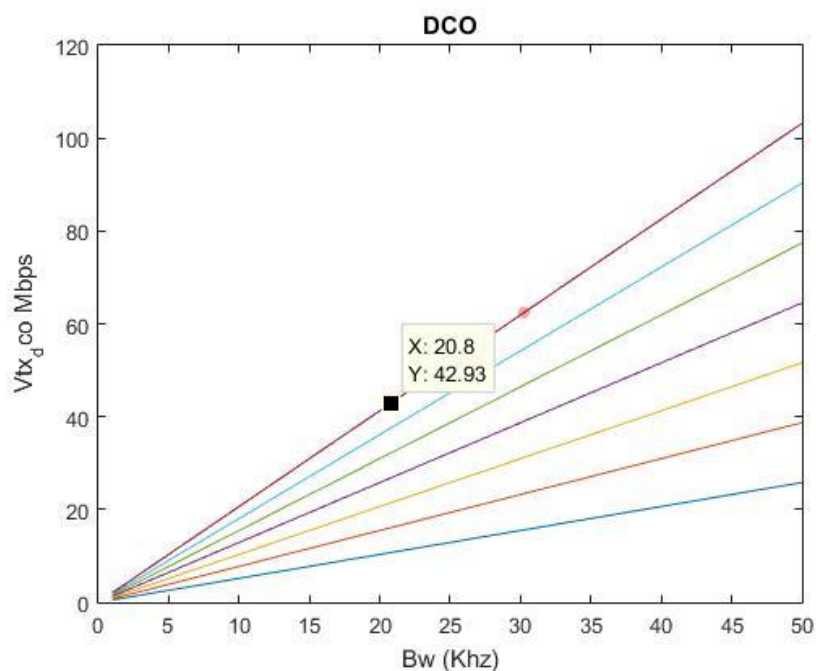
Entonces como ejemplo se declara 128 subportadoras para la simulación de DCO-OFDM por lo que en realidad se envían 258 subportadoras, al graficar estos valores se observa en la Figura 37 que para lograr una velocidad de transmisión de 43Mbps se necesita un ancho de banda de 20KHz por cada subportadora, en un grado de modulación de 256QAM, para verificar otros



valores de modulación en cuadratura se desplaza entre las líneas de colores que representan el grado de modulación desde 4 QAM hasta 256QAM de abajo hacia arriba. Entonces para este ejemplo se describe que, en 5,1MHz se envía 258 subportadoras de las cuales 128 representan la información útil.

**Figura 37**

*Velocidad de transmisión vs Ancho de banda DCO*

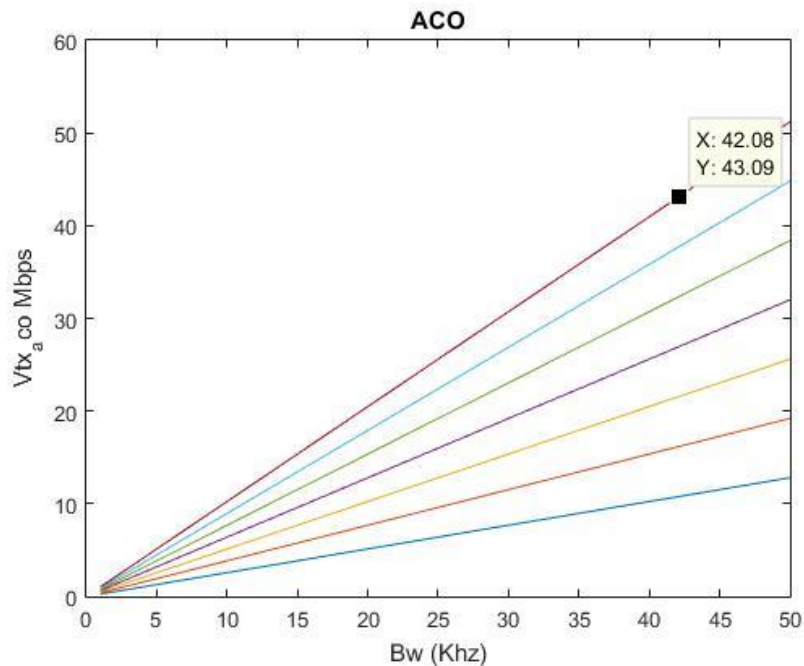


*Nota. En la figura se muestra los datos tomados para una velocidad de transmisión y el valor del Ancho de banda de cada portadora para una modulación DCO-OFDM*

Ahora para la simulación en ACO-OFDM colocamos el mismo número de subportadoras 128, al ser en ACO se envían 256 subportadoras. En la Figura 38, se observa que para obtener una la velocidad de transmisión de 43Mbps, el ancho de banda de cada subportadora es de 40KHz con una modulación de 256 QAM, algo esperado ya que por teoría se conoce que la modulación ACO-OFDM utiliza el doble de ancho de banda que en DCO-OFDM.

**Figura 38**

*Velocidad de transmisión vs Ancho de banda ACO*



*Nota. En la figura se muestra los datos tomados para una velocidad de transmisión y el valor del ancho de banda de cada portadora para una modulación ACO-OFDM*

Una vez obtenido el valor necesario de símbolos y de portadoras para la velocidad de transmisión deseada, pasamos a la etapa de transmisión del sistema.

#### **Simulación para el bloque de Transmisión.**

En este parte de la simulación se implementa la función **tx** para la transmisión de la señal con las técnicas de modulación de DCO-OFDM y ACO-OFDM.

#### **Modulación DCO-OFDM.**

Primero se declaran los datos del ítem anterior, el vector del grado de modulación  $M$ , el número de símbolos  $N_{\text{symp}}$ , el número de subportadoras  $N_{\text{sub}}$ , el número de subportadoras a transmitir  $N$ , el prefijo cíclico CP de acuerdo al número de portadoras simétricas del canal, la

cantidad de bits a transmitirse por símbolo  $s$  y los límites inferior y superior para el recorte de la señal.

Con estos valores declarados se comienza con la generación de datos randomicos y binarios que se van a utilizar los cuales se colocaran dentro de la variable *data*, estos datos se los transforma a decimal en una matriz de  $[N_{sub} \times s]$ , con esto se procede a realizar la modulación en cuadratura de orden  $[M]$  y se procede a ordenar los datos modulados por cada subportadora y símbolo en la matriz *data\_mod\_symb*.

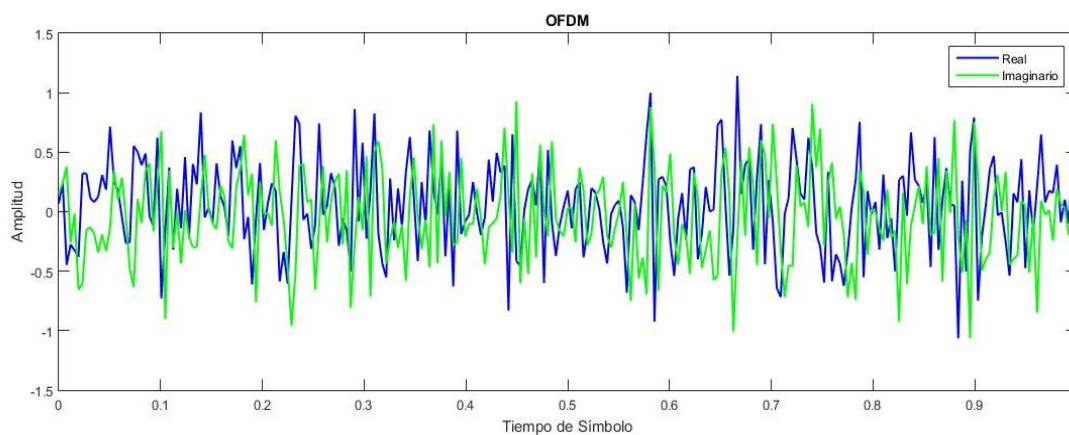
Luego se realiza las operaciones para que los datos cumplan la condición de simetría hermítica donde se coloca que los valores del principio sean valores nulos, los siguientes los valores de *data\_mod\_symb*, los valores del medio sean valores nulos y los últimos son la conjugada de *data\_mod\_symb*, luego se procede a aplicar la IFFT a este resultado, el cual se guarda en la variable *data\_pfdm\_herm*.

Ahora se genera el prefijo el cíclico, que es una parte copiada de la seña en tiempo y son agregadas a la variable *data\_pfdm\_herm*, con lo que se obtiene la señal con la inserción del prefijo cíclico.

Entonces en DCO-OFDM por cada símbolo se va formando la señal, cada símbolo es la sumatoria de cada señal de cuadratura, luego se calcula la desviación estándar de toda la señal, y se procede a calcular la componente DC en función de la Ecuación 36 declarada en la variable  $u$  con la que se corta la parte negativa de la señal, entonces la señal DCO es la señal en tiempo más la componente DC recortada mediante el límite inferior (0) y el límite superior (1) mediante la función **clip**. En las siguientes graficas se presenta un ejemplo de la simulación de la modulación con DCO-OFMD. En la Figura 39 se puede observar la señal ODFM, generada con 128 subportadoras y una modulación en cuadratura de 256QAM.

**Figura 39**

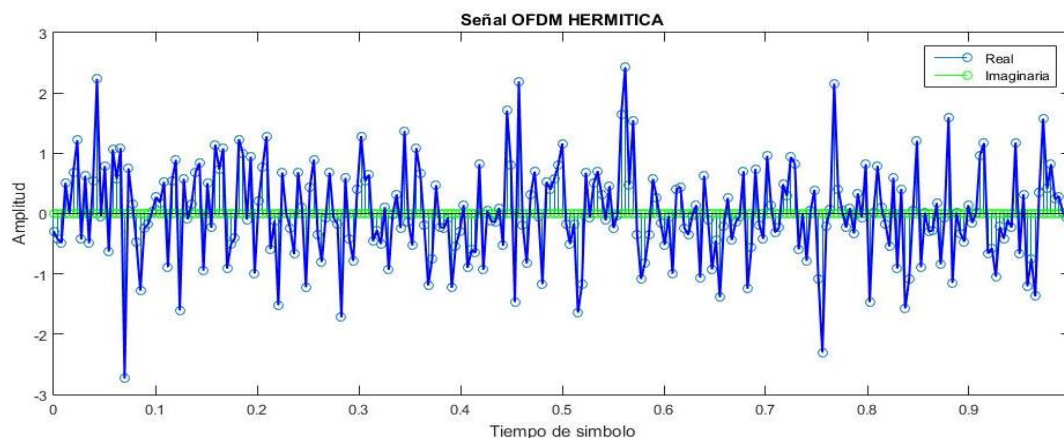
*Señales discretas en tiempo OFDM*



*Nota.* En la figura se observa las señales discretas en tiempo OFDM, una señal con valores reales, imaginarios positivos y negativos.

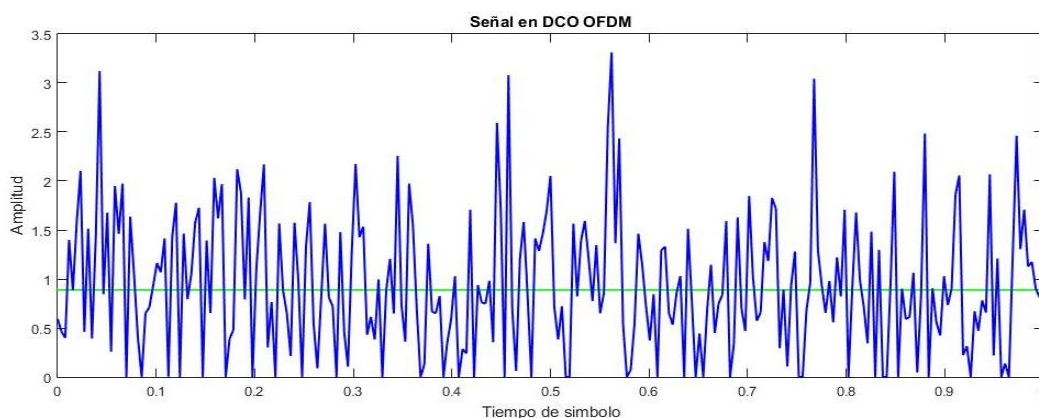
**Figura 40**

*Simetría hermítica en Señales discretas en tiempo OFDM*



*Nota.* En la figura se muestra la misma señal de la figura anterior, pero aplicando simetría hermítica haciendo cero al valor imaginario

En la Figura 41, se observa la señal OFDM, aplicada la simetría hermítica y agregada la señal DC por lo se puede observar valores de la señal solo reales y positivos.

**Figura 41***Señal DCO-OFDM*

Nota. En esta figura se muestra la señal OFDM aplicada DCO-OFDM, se observa valores reales positivos.

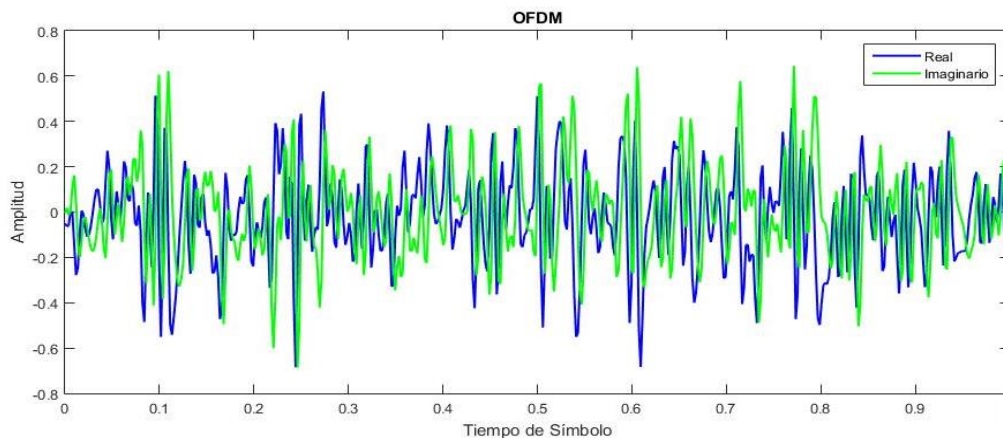
#### ***Modulación ACO-OFDM.***

Para la transmisión con técnica modulación ACO-OFDM, se utilizan los mismo valores declarados que en DCO-OFDM, y se continua con la generación de datos, luego la modulación en cuadratura, estos valores obtenidos son complejos y representan las subportadoras enviadas, a estos valores se los debe mapear y reorganizar en función de la Ecuación 48, donde los valores de las subportadoras pares son nulas es decir las subportadoras con información útil son las subportadoras impares, luego pasa por la función hermítica que consiste en que los valores primeros y del medio sean ceros para que cumpla con la condición de simetría hermítica, luego se ingresa los valores a la transformada inversa rápida de Fourier, se añade el prefijo cíclico y se corta la parte negativa de la señal, luego esta es recortada por los limites superior e inferior de la función **clip**.

En las siguientes graficas se presenta un ejemplo de la simulación de la modulación con ACO-OFMD. En la Figura 42 se puede observar la señal ODFM, generada con 128 subportadoras y una modulación en cuadratura de 256QAM.

**Figura 42**

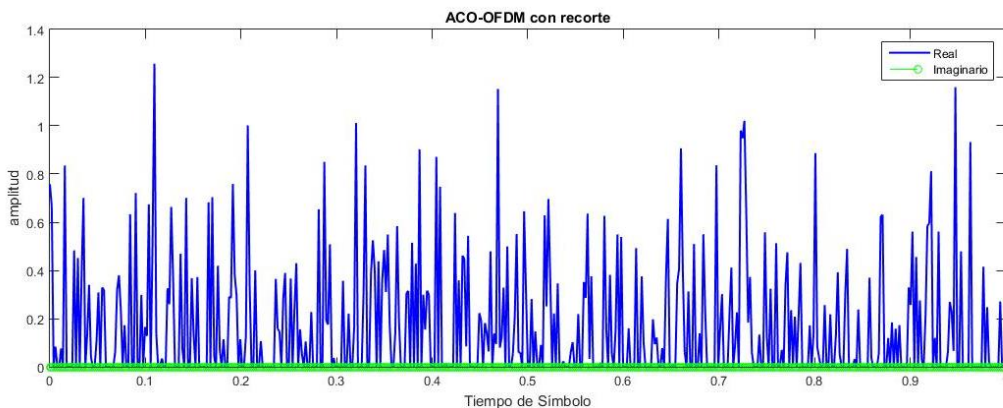
*Señales discretas en tiempo OFDM*



*Nota.* En la figura se observa las señales discretas en tiempo OFDM, una señal con valores reales, imaginarios positivos y negativos.

**Figura 43**

*Señal ACO-OFDM*



*Nota.* En esta figura se muestra la señal OFDM aplicada ACO-OFDM, se observa valores reales positivos.

### **Simulación de LED**

Una vez que se tiene la función en tiempo, es decir, la señal de DCO- OFDM o ACO- OFDM se agrega el valor medio de corriente de LED, enseguida se debe predistorcionar la señal para ello

se debe obtener la potencia óptica esto se realiza mediante la función **Ledlinear**, para la linealización o predistorsión respecto a las curvas corriente voltaje y corriente flux.

Entonces como se indicó los parámetros de algunos elementos no se encuentran descritos en los equipos por lo que para simular las curvas de transferencias del LED se usaran las características indicadas en (L. Chen, 2009) que se asemejan a ciertos valores a que se tienen de la lámpara LED LuciCup II, como por ejemplo la corriente de 500mA, la alimentación de 42VDC, el ángulo de media potencia de 60° y la eficiencia luminosa tomada en la práctica de 98 lm/w.

Con estos datos se puede obtener las curvas de voltaje vs corriente y corriente vs flux, lo que se realiza para poder simular, es una interpolación polinómica para ello se crean los vectores de voltaje, corriente y flux, de acuerdo a las especificaciones indicadas en (L. Chen, 2009), con lo que se tienen los siguientes polinomios expresados en la Ecuación 51. (León, 2018)

$$Pol_{v-i} = 0.0068x^6 - 0.0107x^5 - 0.0087x^4 - 0.0049x^3 + 0.0630x^2 + 0.3216x + 0.2646$$

*Ecuación 50*

$$Pol_{i-f} = -0.0053x^6 + 0.0131x^5 + 0.0149x^4 - 0.0333x^3 - 0.1447x^2 + 0.6433x + 1.1939$$

*Ecuación 51*

Después se procede a sacar los coeficientes polinómicos para aplicarlos en función de las curvas V-I e I-F, luego se multiplica por la eficiencia luminosa y se toma muestras dentro de estos valores para mejorar la estructura de la curva. Con las curvas ya representadas se aplica una técnica de predistorsión en la señal de corriente y la potencia óptica, la cual sale al canal.

### **Canal óptico**

Para simular el canal óptico es importante determinar las condiciones físicas de este, para lo cual primero se debe declarar los parámetros de la habitación es decir 3m de ancho x 3.5m de largo x 2.4m de alto, luego mediante la función **cuarto** se crean los vectores en los ejes x,y,z en

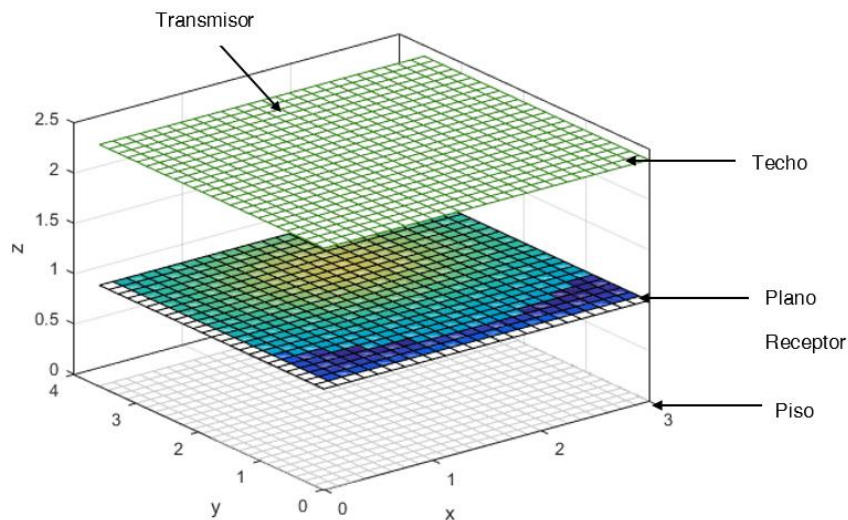
función de las dimensiones de la habitación, también se declara el coeficiente de reflexión de 0.8 que se asume para todas las paredes.

Como segundo punto se asignan los valores de ubicación del transmisor, que se encuentra a 1.5m en el eje x, 3.5m del eje y a 2.2m del eje z, el ángulo de media potencia es de  $66^\circ$ , y para definir la vista del transmisor se declara el vector como 0 en el eje x, 0 en el eje y, y -1 es decir hacia abajo en el eje z.

En la Figura 44 se observa el cuarto donde se ejecutan las pruebas, el primer plano desde arriba representa la ubicación del transmisor en el techo del cuarto, el segundo representa el plano del receptor donde se observa la luz que es reflejada y como disminuye a medida que se aleja de la ubicación de transmisor y en el tercer plano se muestra el piso.

**Figura 44**

*Transmisor dentro de la habitación*



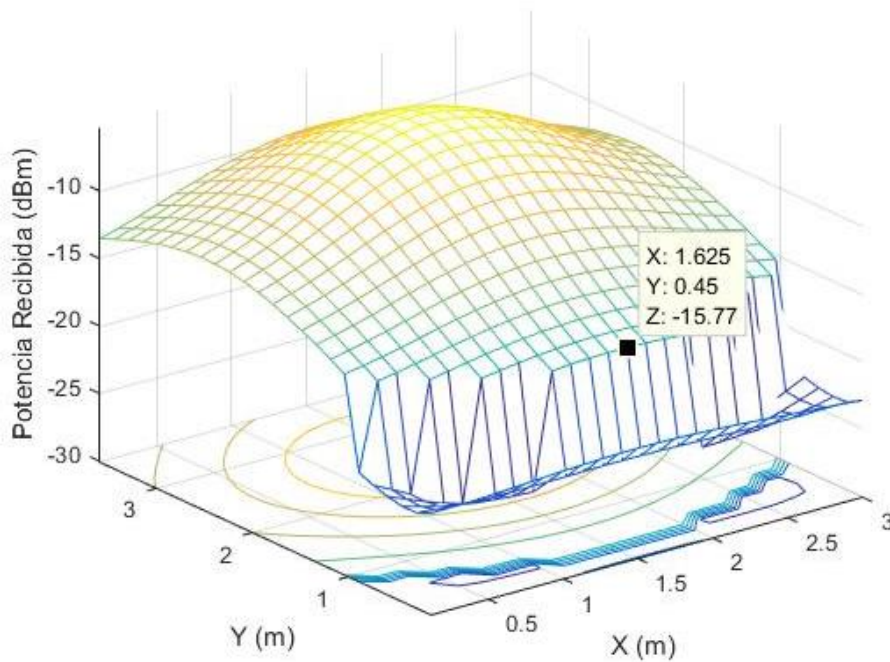
*Nota.* En la figura se observa el cuarto de 1.5m x 3.5m x 2.2m y la potencia de luz del transmisor



Para tener una mejor visualización de la potencia dentro de la habitación se la representa en la Figura 45, donde se puede observar cómo esta va disminuyendo a medida que se aleja del transmisor.

**Figura 45**

*Potencia recibida*



*Nota.* En la figura se observa la potencia recibida en la habitación.

Como tercera consideración, para el receptor se coloca la información de su posición la cual no permanece fija como la del transmisor si no que se realizan tres escenarios con diferente posición, la vista del receptor hacia arriba por lo que el vector se declara como  $[0\ 0\ 1]$ . Adicional se coloca el área efectiva del detector y en FOV o campo de visión del receptor de  $60^\circ$ .

Con estos valores declarados y  $c = \text{velocidad de la luz}$ , se calcula la respuesta al impulso del canal con la función *respuestah*, en primer lugar, con el valor de ángulo de media potencia se obtiene el orden del lóbulo de radiación y la diferencial de área respecto a cada plano, también se debe declarar los vectores para cada una de las paredes.

### **Respuesta impulsiva**

Con la información descrita anteriormente se obtiene la respuesta impulsiva del canal utilizando la Ecuación 52 que representa la ganancia DC de un canal con línea de vista, de igual forma se obtiene la distancia entre receptor y transmisor lo que permite obtener los ángulos  $\varphi$  y  $\theta$  aplicando las ecuaciones Ecuación 19 y Ecuación 20 y al aplicar la condición de FOV se obtiene la componente de la respuesta impulsiva de LOS.

$$H(0) \approx \left(\frac{n+1}{2\pi}\right) \left(\frac{A_R}{D^2}\right) \cos^n(\phi) \cos(\theta) \text{rect}\left(\frac{\varphi}{FOV}\right)$$

*Ecuación 52*

Ahora para los NLOS, la respuesta impulsiva sin línea de vista se determina por las reflexiones de cada pared, por lo que será necesario calcular la distancia y los ángulos  $\varphi$  y  $\theta$  desde el transmisor hacia la pared y la distancia desde la pared hacia el receptor con la Ecuación 53 se determina la ganancia DC de un canal sin línea de vista, esta ecuación se la debe aplicar para cada una de las paredes.

$$\begin{aligned} H^{(1)}(S, R) &\approx \sum_{i=1}^N H^{(0)}(S, \xi_i) \otimes H^{(1)}(\xi_i, R) = \\ &\left(\frac{n+1}{2\pi}\right) \sum_{i=1}^N \left(\frac{(\rho_i \cos^n(\phi) \cos(\theta))}{D^2}\right) \text{rec}\left(\frac{2\theta}{\pi}\right) H^{(0)}(\{\vec{r}, \vec{n}, 1\}, R) \Delta A = \\ &\left(\frac{n+1}{2\pi^2}\right) \sum_{i=1}^N \left(\frac{(\rho_i \cos^n(\phi_1) \cos(\theta_1))}{D_1^2}\right) \text{rec}\left(\frac{2\theta_1}{\pi}\right) \left(\frac{A_R}{D_2^2}\right) \cos(\phi_2) \cos(\theta_2) \text{rect}\left(\frac{\phi_2}{FOV}\right) \Delta A = \\ &\left(\frac{n+1}{2\pi^2}\right) A_R \rho \Delta A \sum_{i=1}^N \left(\frac{\cos^n(\phi_1) \cos(\theta_{i1}) \cos(\phi_{i2}) \cos(\theta_2)}{D_1^2 D_2^2}\right) \end{aligned}$$

*Ecuación 53*

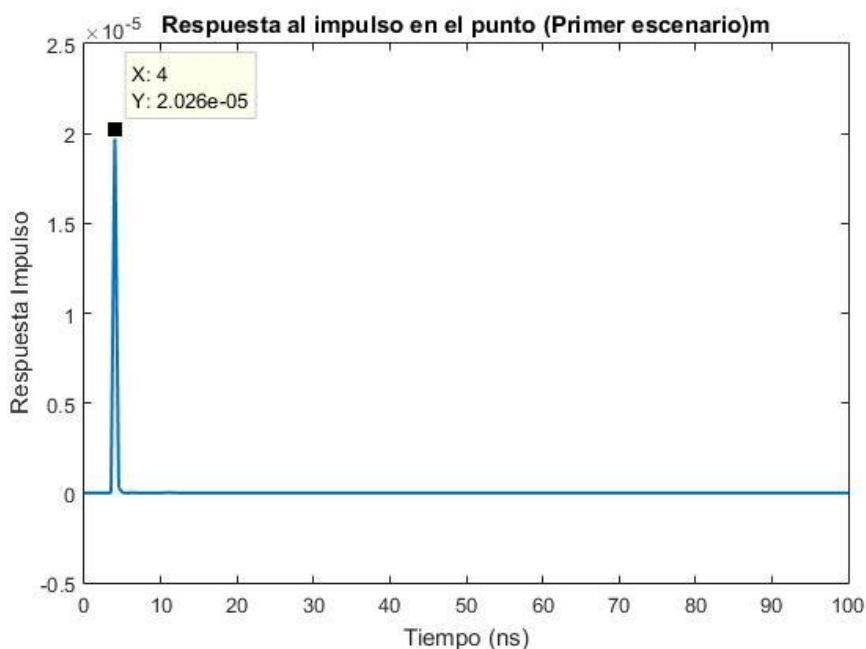
Con ello se obtiene la componente de la respuesta impulsiva de NLOS para cada una de las paredes, cada uno de estos valores se almacena en un mismo vector de respuesta impulsiva y para conseguir el tiempo se realiza en función de las distancias y la velocidad de la luz.

La menor distancia que recorre la señal hasta llegar al receptor es la realizada por los componentes LOS, por ende, es la primera en ser detectada. Con la distancia calculada y la

velocidad de la luz, se obtiene el tiempo que tarda la señal en llegar al fotodetector este tiempo es el Delay que existe en el canal de transmisión para LOS, como por ejemplo el Delay que se muestra en la Figura 46, para el primer escenario que es de 4ns.

**Figura 46**

*Delay del primer escenario*



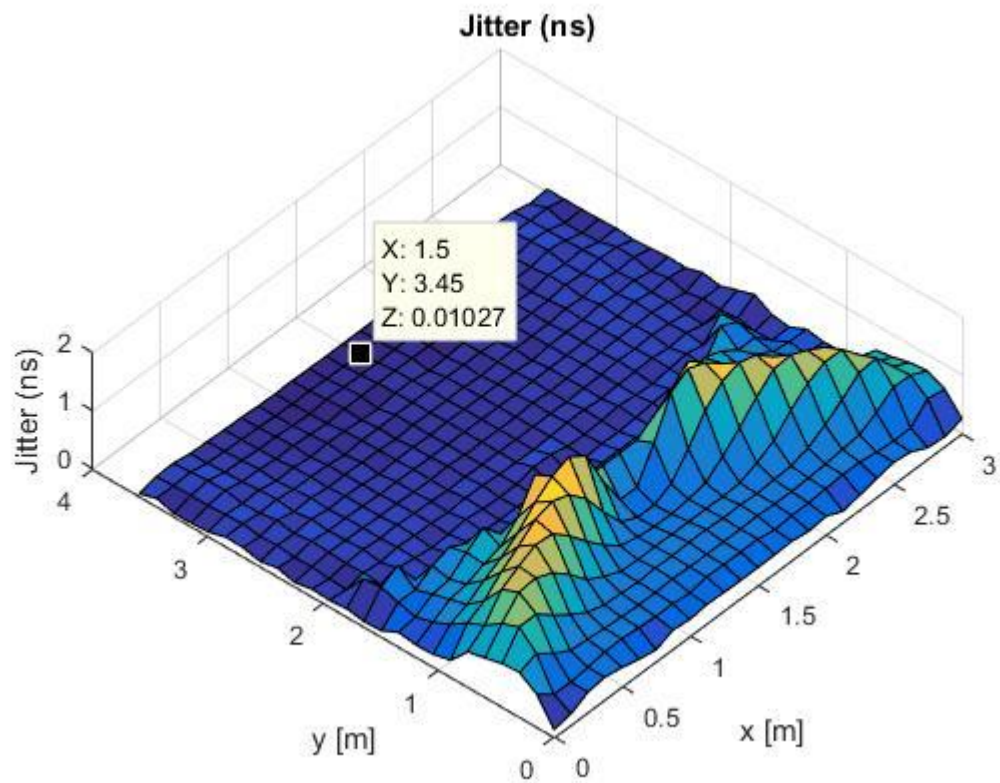
*Nota.* En la gráfica se muestra el tiempo de llegada de la primera señal

Para las componentes NLOS se producen reflexiones en cada una de las paredes, como se indicó anteriormente son dos distancias las que son analizadas la primera del receptor hacia la pared y la segunda desde la pared hacia el fotodetector, con estos valores y la velocidad de la luz, se procede a calcular el valor del tiempo para los componentes NLOS.

Con este tiempo medido se puede obtener el Jitter calculando la media de los tiempos obtenidos tanto en LOS como en NLOS del canal como lo se muestra en la Figura 47, donde se puede valor del retardo medio de 0.01ns.

Figura 47

Jitter



*Nota.* En la gráfica se muestra el valor del Jitter del primer escenario

Para finalizar, la señal que pasa por el canal óptico, es la señal que se va a recibir en el fotodetector, es decir la señal que sale como potencia óptica en convolución con la señal de la respuesta impulsiva del canal.

### Fotodetector

La señal recibida en forma de potencia al multiplicarle por la responsividad se obtiene el valor en corriente, a continuación, se multiplica por una resistencia de  $1\Omega$  y obtenemos el valor en voltaje.

### Ruido Gaussiano

Ya teniendo el valor en voltaje, se incorpora ruido gaussiano debido a las corrientes oscuras del fotodetector.

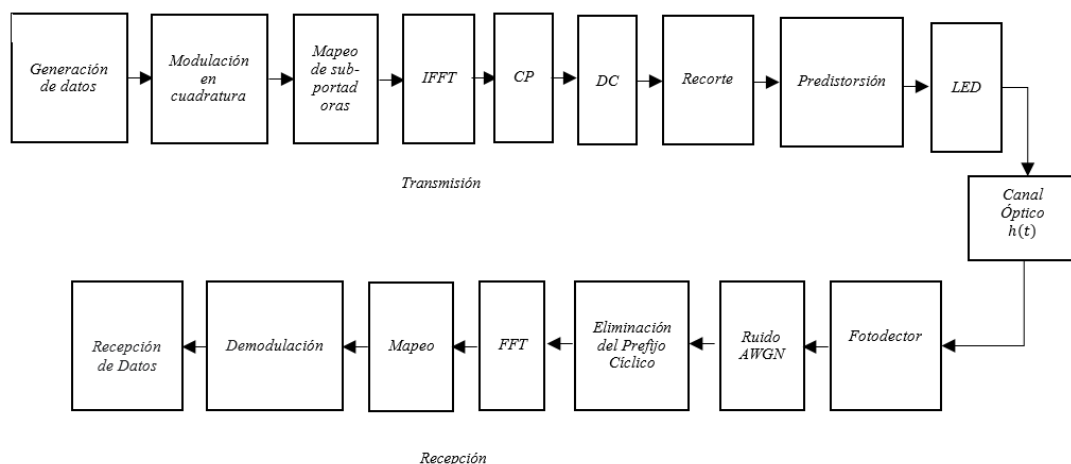
### Recepción

Se realiza el proceso inverso, se retira el prefijo cíclico, se aplica FFT, se elimina la conjugación de la señal hermitica, se demodula la señal en cuadratura y se obtiene los datos recibidos.

### Sistema de Comunicación en DCO-OFDM

**Figura 48**

*Diagrama de bloques para Sistema de Comunicación en DCO-OFDM implementado*



*Nota.* En la figura se presenta la estructura de la programación implementada para el sistema de comunicación en DCO-OFDM.

Para la transmisión se comienza por la generación de datos en binario de acuerdo al número de portadoras que se transmiten por símbolo, luego los datos pasan por la modulación en cuadratura donde se consiguen las subportadoras en dominio de la frecuencia en valores complejos, estos valores son mapeados y ordenados en base a la Ecuación 45, posteriormente ingresan a la transformada inversa de Fourier donde se adquieren los datos en el dominio del

tiempo, luego se añade el prefijo cíclico, también se agrega el valor de DC en base a la Ecuación 46, en seguida se hace un recorte a la señal para quitar valores que puedan saturar al LED, después pasa por la etapa de predistorsión y es enviada al LED.

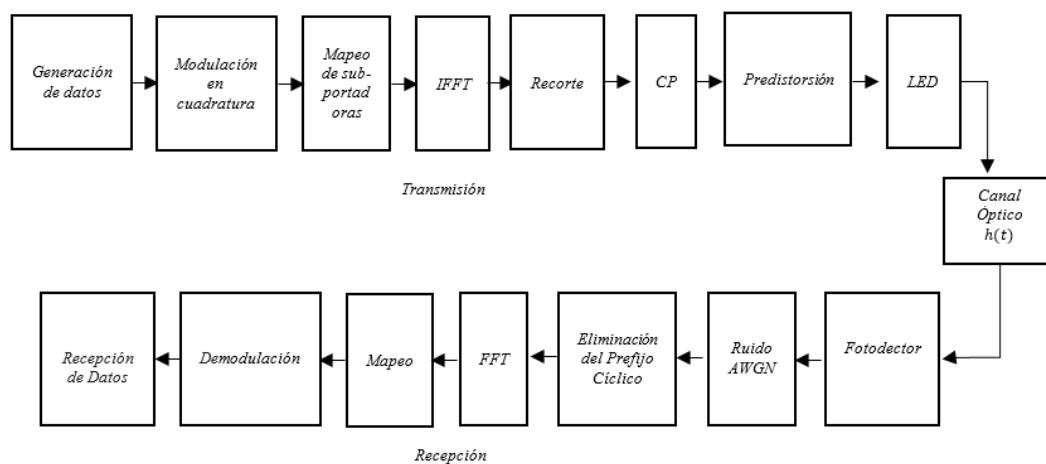
La señal se envía por el LED como potencia óptica para ingresar al Canal, el cual está representado por la operación de convolución entre la señal de potencia óptica y la respuesta al impulso, luego la señal es recibida por el fotodetector, esta señal se transforma a corriente utilizando el coeficiente de responsividad y se suma el ruido AWGN que hace las veces del ruido producido por otras detecciones de Luz.

Por último, para la recepción, a la señal se elimina el prefijo cíclico y se utiliza la transformada rápida de Fourier para realizar el cambio del dominio del tiempo a frecuencia, se procede a reordenar las subportadoras, se demodula la señal y se recupera los datos en binario.

#### *Sistema de Comunicación en ACO-OFDM*

**Figura 49**

*Diagrama de bloques para Sistema de Comunicación en ACO-OFDM implementado*



*Nota.* En la figura se observa el diagrama de bloques para Sistema de Comunicación en ACO-OFDM

En este sistema se comienza con la generación de datos en binarios de forma aleatoria, luego se modulan en cuadratura, los datos se mapean y se organizan como se indica en la Ecuación

48, se utiliza la transformada inversa de Fourier y los datos pasan al dominio de la tiempo, se procede a recortar la señal para obtener una señal netamente positiva y en este punto se agrega el prefijo el cíclico, después pasa por la etapa de predistorsión y es enviada al LED.

En el Canal, ingresa la señal enviada por el LED como potencia óptica, el cual está representado por la operación de convolución entre la señal de potencia óptica y la respuesta al impulso.

La señal es recibida por el fotodector, se añade el ruido AWGN, se retira el prefijo cíclico, se utiliza la transformada rápida de Fourier, se demapean y se recuperan las portadoras con información útil es decir las subportadoras pares, se realiza demodulación y se recupera los datos en binario.

## Capítulo 4

### Resultados y Análisis

En este capítulo se recopilará los resultados obtenidos en la parte práctica, luego se compara los parámetros obtenidos en velocidad de transmisión, jitter, delay y paquetes perdidos para cada escenario, el primero donde el receptor está a un metro de distancia del transmisor, en el segundo el receptor está a un metro de distancia de transmisor y desplazado a 1.50 metros hacia delante y en el tercero el receptor está a una distancia de 2.20 metros del transmisor. En la simulación se determina el rendimiento de la modulación ACO-OFDM y DCO-OFDM en términos de BER.

#### Resultados Medidos

Para la obtención de resultados de la parte práctica se realiza el procedimiento descrito en la Inyección de Tráfico del capítulo 3. Esto se realiza para cada uno de los escenarios, donde se obtiene los valores descritos mediante tablas, en las cuales se calculará el promedio para obtener una medida aproximada de cada uno de los parámetros a analizar.

#### *Throughput*

En la Tabla 8 se observa los 10 valores obtenidos de Throughput para cada una de las inyecciones de tráfico realizadas en cada escenario con su respectivo promedio, en la Figura 50 se muestra un ejemplo del Throughput en el primer escenario en un tiempo de 10 segundos.



Tabla 8

*Medición de throughput en los tres escenarios*

Número de muestra	Throughput			Unidad
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	
1	32.4	24.1	24.2	Mbps
2	32.5	24.1	22.4	Mbps
3	32.8	23.8	22.6	Mbps
4	32.7	24.1	22.0	Mbps
5	32.8	24.1	23.2	Mbps
6	32.6	24.1	23.3	Mbps
7	32.6	24.1	22.4	Mbps
8	32.4	24.1	23.7	Mbps
9	32.6	24.2	23.0	Mbps
10	32.5	24.0	22.5	Mbps
<b>Promedio</b>	<b>32.6</b>	<b>24.01</b>	<b>23</b>	<b>Mbps</b>

*Nota.* En la tabla se listan los valores medidos de throughput en los tres escenarios.

Figura 50

*Medición de throughput en el escenario 1*

```
D:\iperf>iperf3 -c 192.168.1.33
Connecting to host 192.168.1.33, port 5201
[ 41] local 192.168.1.34 port 10386 connected to 192.168.1.33 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 41] 0.00-1.00    sec  3.75 MBytes  31.4 Mbits/sec
[ 41] 1.00-2.00    sec  4.00 MBytes  33.6 Mbits/sec
[ 41] 2.00-3.00    sec  3.88 MBytes  32.5 Mbits/sec
[ 41] 3.00-4.00    sec  3.88 MBytes  32.5 Mbits/sec
[ 41] 4.00-5.00    sec  4.00 MBytes  33.6 Mbits/sec
[ 41] 5.00-6.00    sec  3.88 MBytes  32.5 Mbits/sec
[ 41] 6.00-7.00    sec  3.88 MBytes  32.5 Mbits/sec
[ 41] 7.00-8.00    sec  3.88 MBytes  32.5 Mbits/sec
[ 41] 8.00-9.00    sec  3.88 MBytes  32.5 Mbits/sec
[ 41] 9.00-10.00   sec  3.88 MBytes  32.5 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 41] 0.00-10.00   sec  38.9 MBytes  32.6 Mbits/sec
[ 41] 0.00-10.00   sec  38.9 MBytes  32.6 Mbits/sec
sender
receiver
```

*Nota.* En la figura se muestra una de las mediciones de throughput realizadas en el escenario 1.

### Delay

En la Tabla 9 se muestra los 10 valores obtenidos de delay para cada escenario, el valor obtenido en la práctica es un tiempo de respuesta tanto de subida como de bajada por lo que para este estudio este valor se divide para dos, en la Figura 51 se muestra el delay en el segundo escenario.

Tabla 9

*Medición de delay en los tres escenarios*

Número de muestra	Delay			Unidad
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	
1	2.5	5	8	ms
2	4.5	7	5	ms
3	5.5	6.5	5.5	ms
4	3	3.5	7	ms
5	4	2	7	ms
6	3.5	6	3.5	ms
7	6	5	4	ms
8	5.5	3	6	ms
9	6	4	8	ms
10	2.5	6	6	ms
<b>Promedio</b>	<b>4</b>	<b>4.8</b>	<b>6</b>	<b>ms</b>

*Nota.* En la tabla se listan los valores medidos de delay en los tres escenarios.

Figura 51

*Medición de Delay en el escenario 2*

```
D:\iperf>ping 192.168.1.33
Haciendo ping a 192.168.1.33 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.1.33: bytes=32 tiempo=12ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.33: bytes=32 tiempo=23ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.33: bytes=32 tiempo=8ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.33: bytes=32 tiempo=17ms TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.1.33:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 8ms, Máximo = 23ms, Media = 15ms
```

*Nota.* En la figura se muestra una de las mediciones de Delay realizadas en el escenario 2.

### *Jitter*

En la Tabla 10 se detallan los valores obtenidos de Jitter para cada escenario con el promedio de los mismos, en la Figura 52 se muestra el valor del jitter en el tercer escenario.

Tabla 10

Medición de Jitter en los tres escenarios

Número de muestra	Jitter			Unidad
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	
1	1.033	1.728	1.887	ms
2	2.374	2.124	2.274	ms
3	2.885	2.241	2.103	ms
4	1.028	2.075	2.043	ms
5	1.179	1.699	2.414	ms
6	1.961	1.819	2.698	ms
7	1.690	1.923	2.797	ms
8	1.550	1.956	1.967	ms
9	1.384	1.687	1.333	ms
10	1.134	1.333	1.846	ms
<b>Promedio</b>	<b>1.621</b>	<b>1.859</b>	<b>2.136</b>	<b>ms</b>

Nota. En la tabla se listan los valores medidos de Jitter en los tres escenarios.

Figura 52

Medición de Jitter en el escenario 2

```
D:\iperf>iperf3 -c 192.168.1.33 -u
Connecting to host 192.168.1.33, port 5201
[ 4] local 192.168.1.34 port 50400 connected to 192.168.1.33 port 5201
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Total Datagrams
[ 4] 0.00-1.00 sec    160 KBytes    1.31 Mbits/sec  20
[ 4] 1.00-2.00 sec    152 KBytes    1.25 Mbits/sec  19
[ 4] 2.00-3.00 sec    168 KBytes    1.38 Mbits/sec  21
[ 4] 3.00-4.00 sec    160 KBytes    1.31 Mbits/sec  20
[ 4] 4.00-5.00 sec    152 KBytes    1.25 Mbits/sec  19
[ 4] 5.00-6.00 sec    152 KBytes    1.25 Mbits/sec  19
[ 4] 6.00-7.00 sec    152 KBytes    1.24 Mbits/sec  19
[ 4] 7.00-8.00 sec    160 KBytes    1.31 Mbits/sec  20
[ 4] 8.00-9.00 sec    160 KBytes    1.31 Mbits/sec  20
[ 4] 9.00-10.00 sec   160 KBytes    1.31 Mbits/sec  20
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth      Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 4] 0.00-10.00 sec  1.54 MBytes    1.29 Mbits/sec  1.819 ms    0/197 (0%)
[ 4] Sent 197 datagrams

iperf Done.
```

Nota. En la figura se muestra una de las mediciones de Jitter realizadas en el escenario 2.

### Paquetes Perdidos

Para realizar esta medición se debe ajustar el número de bytes a enviar, inundando el canal con el valor del throughput medido y con ello encontrar los paquetes perdidos, este paso se realiza en cada uno de los escenarios, cuyas mediciones se detallan en la Tabla 11 con el

porcentaje de paquetes perdidos y en la Figura 53 se observa una de las mediciones realizadas en el primer escenario.

**Tabla 11**

*Medición de paquetes perdidos en los tres escenarios*

Número de muestra	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Paquetes perdidos	Porcentaje	Paquetes perdidos	Porcentaje	Paquetes perdidos	Porcentaje
1	48	0.99%	13	0.36%	20	0.63%
2	0	0.00%	23	0.63%	0	0.00%
3	16	0.33%	37	1.00%	0	0.00%
4	2	0.04%	36	0.98%	48	1.50%
5	44	0.91%	0	0.00%	3	0.09%
6	0	0.00%	14	0.38%	13	0.42%
7	36	0,74%	20	0.54%	9	0.28%
8	12	0.25%	10	0.27%	21	0.66%
9	38	0.78%	13	0.35%	34	1.10%
10	11	0.23%	10	0.27%	6	0.19%
<b>Promedio</b>	21	0.42%	18	0.47%	15	0.49%

*Nota.* En la tabla se listan los valores medidos de paquetes perdidos en los tres escenarios.

**Figura 53**

*Medición de Paquetes perdidos en el escenario 1*

```

D:\iperf>iperf3 -c 192.168.1.33 -u -b 32100k
Connecting to host 192.168.1.33, port 5201
[ 41] local 192.168.1.34 port 64814 connected to 192.168.1.33 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Total Datagrams
[ 41] 0.00-1.00 sec      3.59 MBytes  30.1 Mbits/sec   459
[ 41] 1.00-2.00 sec      3.80 MBytes  31.9 Mbits/sec   487
[ 41] 2.00-3.00 sec      3.82 MBytes  32.1 Mbits/sec   489
[ 41] 3.00-4.00 sec      3.84 MBytes  32.2 Mbits/sec   491
[ 41] 4.00-5.00 sec      3.85 MBytes  32.3 Mbits/sec   493
[ 41] 5.00-6.00 sec      3.88 MBytes  32.5 Mbits/sec   496
[ 41] 6.00-7.00 sec      3.74 MBytes  31.4 Mbits/sec   479
[ 41] 7.00-8.00 sec      3.87 MBytes  32.4 Mbits/sec   495
[ 41] 8.00-9.00 sec      3.85 MBytes  32.3 Mbits/sec   493
[ 41] 9.00-10.00 sec     3.77 MBytes  31.6 Mbits/sec   482
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth       Jitter          Lost/Total Datagrams
[ 41] 0.00-10.00 sec     38.0 MBytes  31.9 Mbits/sec   5.445 ms       38/4863 (0.78%)
[ 41] Sent 4863 datagrams
iperf Done.

```

*Nota.* En la figura se muestra una de las mediciones de Paquetes perdidos realizadas en el escenario 1.

Con los resultados obtenidos en los ítems anteriores se crea la Tabla 12 donde se tabulan los valores medios de cada escenario implementado.

**Tabla 12***Parámetros medios en los tres escenarios*

<b>Parámetros medidos (Promedio)</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>
<b>Retardo (ms)</b>	4	4.8	6
<b>Jitter (ms)</b>	1.621	1.859	2.1361
<b>Velocidad Transmisión (Mbps)</b>	32.6	24.01	23
<b>Datos perdidos (%)</b>	0.42%	0.47%	0.49%

*Nota.* En la tabla se listan la media de los valores obtenidos en los tres escenarios.

### Resultados Simulados

Para obtener los resultados de las simulaciones descritas en el capítulo anterior se debe tener en cuenta que el objetivo es determinar cuál de las dos técnicas de modulación DCO-OFDM y ACO-OFDM se adapta a los valores obtenidos en la Tabla 12, para poder analizar cuál de estas podría ser la implementada por el sistema PureLiFi LiFi-XC.

La simulación se realiza con 128 subportadoras con información útil, con una transmisión de 80 símbolos.

### Throughput

El throughput en la simulación se obtiene adaptando las Condiciones para la Velocidad de Transmisión, este valor se impone dependiendo del valor obtenido en la Tabla 8, para cada uno de los escenarios, de esta forma se obtendrá los valores de la modulación en cuadratura en ordenes de 4, 8, 16, 32, 64, 128 y 256, con lo que se consigue el valor del ancho de banda necesario para cada subportadora. Con estos datos se determina el número de subportadoras que son 128 y la modulación en cuadratura con la que se va a trabajar que es 256 QAM, ya que en la etapa de implementación se verifico que al colocar otras fuentes de luz (interferencia) no afectaba el rendimiento del canal.

En la Tabla 13 se muestra los valores de throughput y ancho de banda en los tres escenarios para cada técnica de modulación y en la Figura 54 se observa la simulación de la velocidad de transmisión en función del ancho de banda en DCO-OFDM para el primer escenario y en la Figura 54 para ACO-OFDM en el primer escenario.

**Tabla 13**

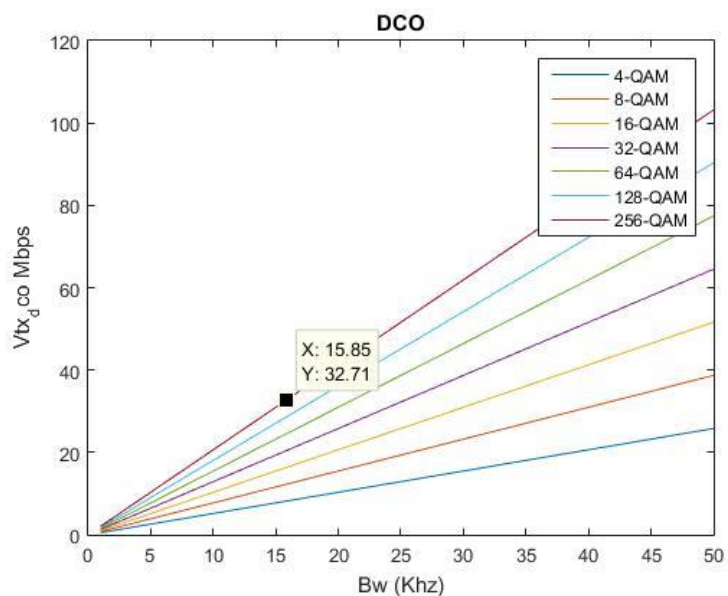
Valores de throughput y ancho de banda en los tres escenarios para DCO y ACO

Técnica de modulación	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Velocidad de transmisión	Ancho de Banda	Velocidad de transmisión	Ancho de Banda	Velocidad de transmisión	Ancho de Banda
DCO-OFDM	32.6 Mbps	15.85KHz	24.01 Mbps	11.89 KHz	23 Mbps	11.39KHz
ACO-OFDM	32.6 Mbps	31.69KHz	24.01 Mbps	23.77 KHz	23 Mbps	22.78KHz

*Nota.* En la tabla se muestra los valores obtenidos de ancho de banda con la velocidad de TX obtenida de la parte implementada.

**Figura 54**

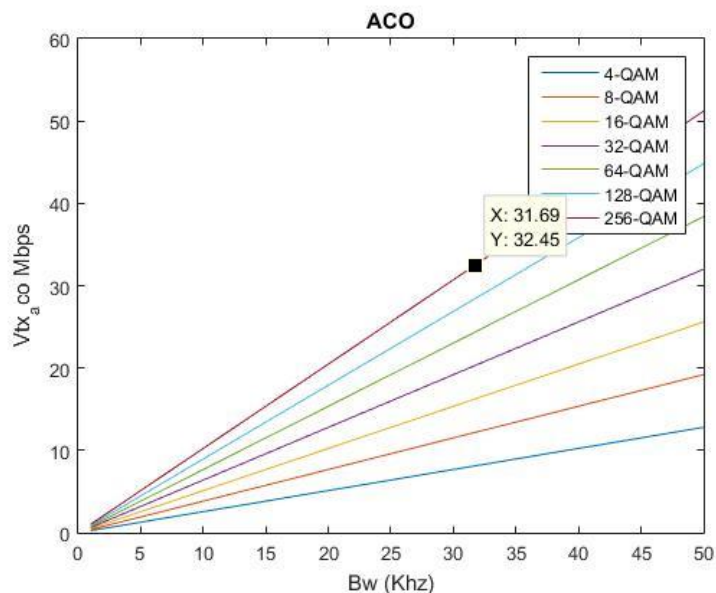
*Velocidad de transmisión vs ancho de banda*



*Nota.* En la figura se muestra el valor de la velocidad de transmisión vs ancho de banda con modulación 256QAM en DCO-OFDM para cada portadora

Figura 55

Velocidad de transmisión vs ancho de banda



Nota. En la figura se muestra el valor de la velocidad de transmisión vs ancho de banda con modulación 256QAM en ACO-OFDM para cada portadora

### Delay

Tanto el delay como el Jitter se obtienen netamente del canal óptico desarrollado en la simulación, el delay está ligado con el tiempo que tarda en llegar la señal desde que sale del transmisor hasta llegar al receptor, por lo que se toma el tiempo que tarda en llegar la primera señal al receptor descartando el resto de señales producidas por  $nLOS$ .

En la Tabla 14 se muestra los valores obtenidos de delay para cada uno de los escenarios este valor es independiente del tipo de modulación que se esté realizando y en la Figura 56 se observa el delay obtenido en el primer escenario.

**Tabla 14**

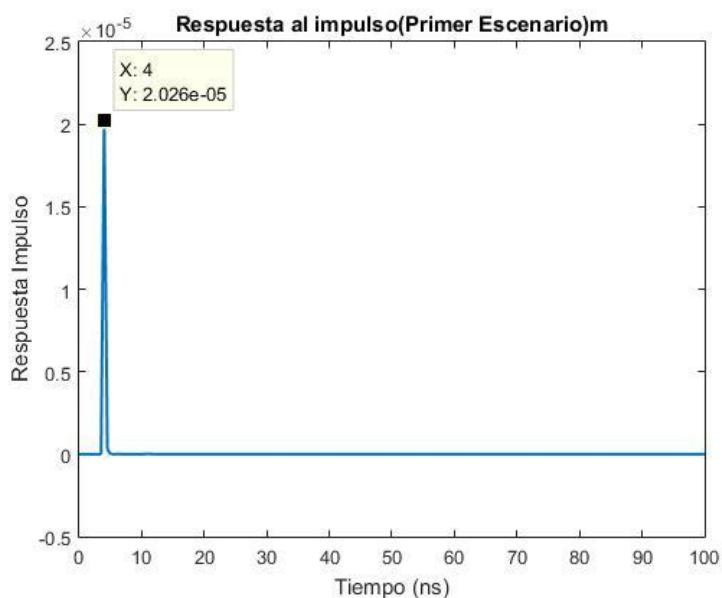
Valores de delay en los tres escenarios.

Escenario 1	Delay Escenario 2	Escenario 3	Unidad
4	6	7.5	ns

*Nota.* En la tabla se muestra los valores obtenidos de retardo en la simulación

**Figura 56**

Delay en el primer escenario



*Nota.* En la figura se muestra la relación de la respuesta impulso frente al tiempo, por lo que se obtiene el Retardo de propagación o delay.

### Jitter

En delay se indicó que se toma el tiempo que tarda en llegar la primera señal al receptor, para el Jitter se realiza el promedio del tiempo que tardan en llegar todas las señales transmitidas. En la Tabla 15 se muestran los valores de Jitter en cada escenario y en la Figura 57 se presenta el valor de Jitter en el segundo escenario.



**Tabla 15**

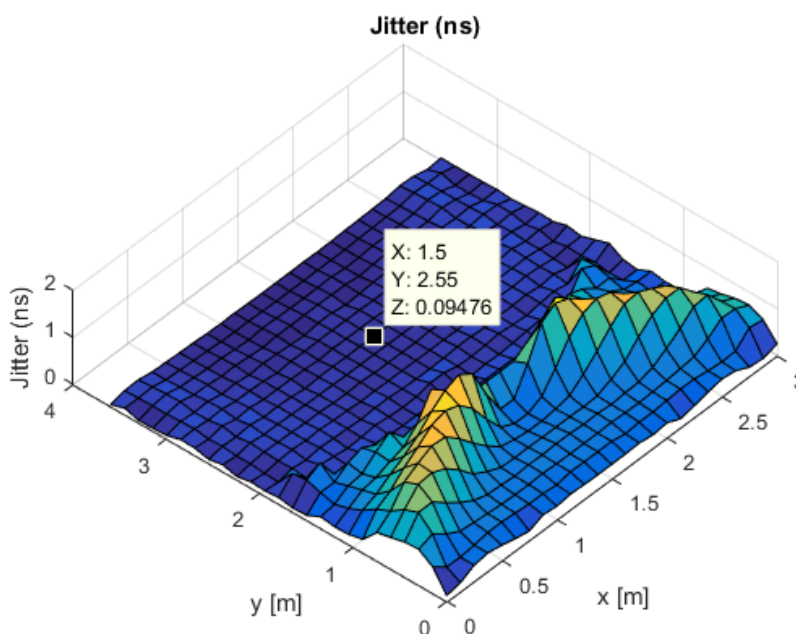
Valores de Jitter en los tres escenarios.

Escenario 1	Jitter Escenario 2	Escenario 3	Unidad
0.01	0.09	0.20	ns

*Nota.* En la tabla se muestra los valores obtenidos de Jitter en la simulación

**Figura 57**

*Jitter en el segundo escenario*



*Nota.* En la figura se muestra el valor del Jitter dependiendo de la ubicación del receptor.

### *Paquetes Perdidos*

En simulación encontrar el valor de paquetes perdidos va más allá del objetivo de este trabajo, pero para poder analizar estos valores se realiza una analogía entre el porcentaje de paquetes perdidos conseguidos en la práctica y el *BER*, lo que se evalúa más adelante.

## Análisis de Resultados

Para examinar los resultados evaluaremos los parámetros de QoS obtenidos en la red implementada bajo el estándar IEEE 182.15.7, para luego valorar las técnicas de modulación en DCO-OFDM y ACO-OFDM en función del BER obtenido.

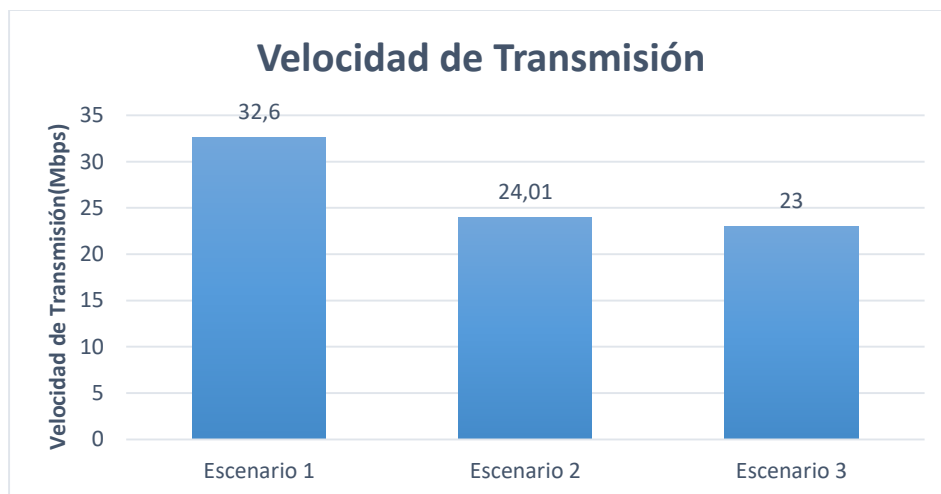
### Parámetros QoS

#### Throughput.

Este parámetro indica cuantos datos pueden ser transferidos en la red, se expresa en término de bit por segundo, esta velocidad se encuentra limitada netamente por la tecnología Li-Fi, ya que el equipo especifica que ofrece una velocidad de transmisión de 43Mbps, al realizar la práctica se valida la variación de este parámetro en cada uno de estos escenarios.

**Figura 58**

*Velocidad de transmisión en la práctica*



*Nota.* En la figura se muestra la velocidad de TX obtenida en cada escenario.

Como se muestra en la Figura 58, al aumentar la distancia entre receptor y transmisor la velocidad de transmisión va disminuyendo, aun en el mejor de los escenarios no se llega a obtener la velocidad de transmisión ofrecida por el sistema PureLiFi LiFi-XC. Con lo que se determina un

error relativo calculado con la Ecuación 54 del 20% para el escenario 1, del 40% para el escenario 2 y el 45% para el escenario 3.

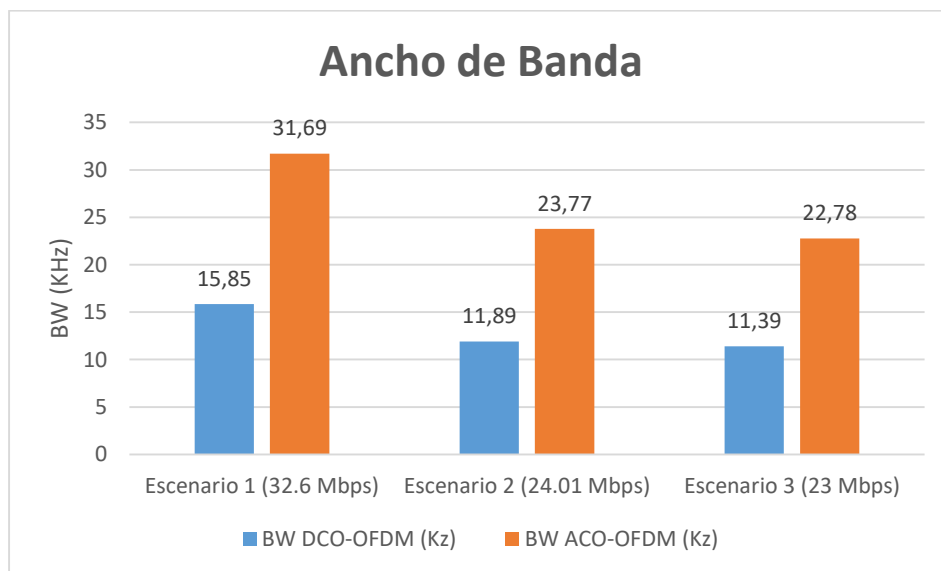
$$\varepsilon = \frac{v_0 - v_1}{v_0}$$

Ecuación 54

En la simulación se ha tomado como dato la velocidad de transmisión medida en cada uno de los escenarios, para especificar el número de portadoras, la modulación en cuadratura que se va a utilizar y el número de símbolos que son transmitidos por el canal, para determinar el ancho de banda de cada subportadora, para cada escenario, ver Figura 59 en cada tipo de modulación ACO-OFDM Y DCO-OFDM.

**Figura 59**

*Velocidad de Transmisión vs Ancho de Banda*



*Nota.* En esta figura se muestra el ancho de banda necesario de cada subportadora, según la velocidad de transmisión y la técnica de modulación empleada.

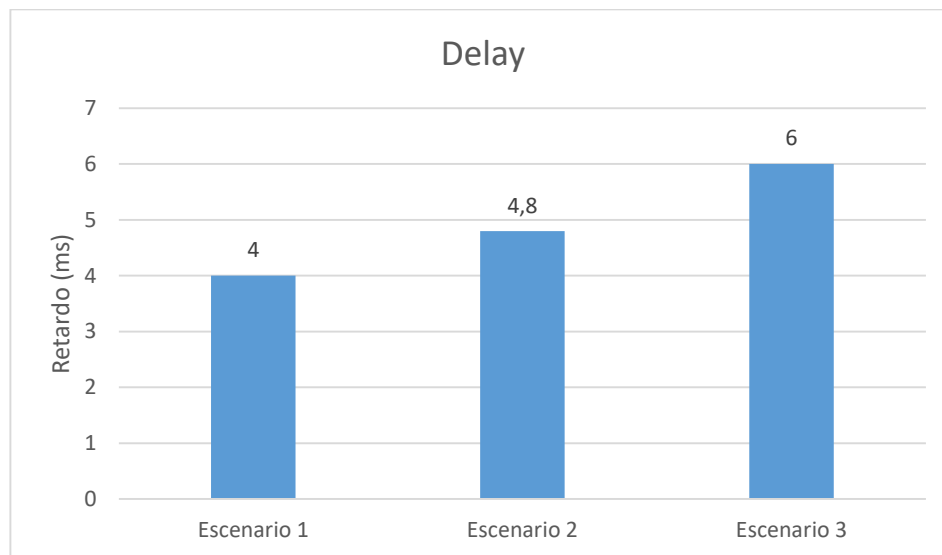
Entonces se determina que para la transferencia de datos con un determinado throughput utilizando una técnica de modulación en ACO-OFDM se necesita el doble de ancho de banda que al utilizar una técnica de modulación en DCO-OFDM.

### **Delay.**

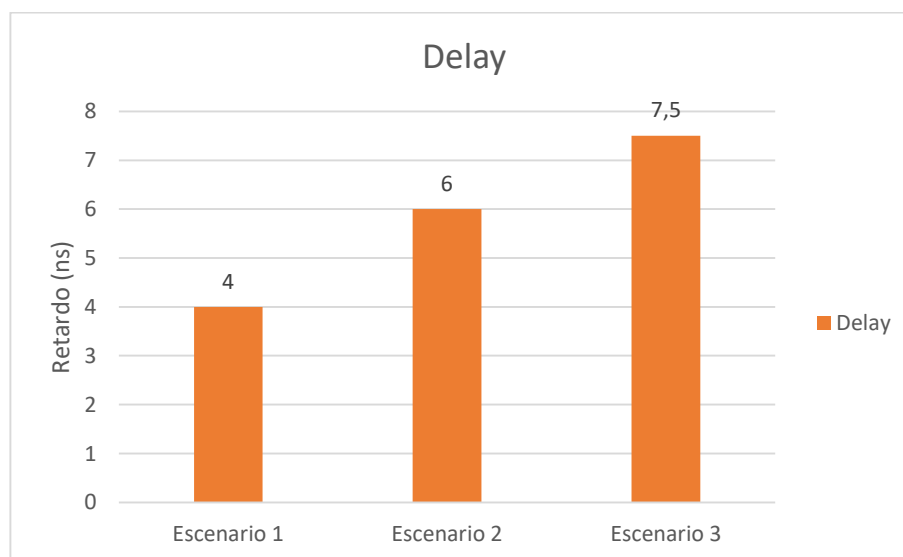
El retardo o delay está definido como el tiempo que transcurre entre la emisión de datos hasta el momento que llegue al receptor, es una medida que expresa el tiempo utilizado en el subsistema de comunicación, en este interviene tres tipos de retardos.

- Retardo de propagación que es el tiempo que le toma a la información viajar por el canal desde el emisor hasta el receptor, depende de la velocidad de propagación de la señal y de la distancia entre el emisor y el receptor.
- Retardo de transmisión es tiempo que tarda el emisor en poner un paquete compuesto por una cabecera de tamaño  $H$  bits y un campo de información (payload) de  $p$  bits, en la línea de transmisión, se refiere a la velocidad de transmisión del equipo emisor.
- Retardo de nodo que depende de la velocidad de proceso del Router para decidir hacia qué nodo debe reenviar la información recibida y también del tráfico de la red.

En la parte práctica las medidas obtenidas de delay muestran como es el retardo de propagación es el más influyente en este sistema a pesar que las diferentes mediciones se realizan en distancias relativamente cortas entre sí, ya que en cada prueba se envía el mismo número de paquetes, se utiliza el mismo equipo y la velocidad de propagación es una constante, por tanto lo único que cambia es la distancia, determinando un área de cobertura limitada. De esta manera se verifica que mientras el receptor se encuentre más cerca del transmisor el delay es menor, ver Figura 60, de igual forma los valores simulados muestran el mismo escenario, ver Figura 61. Ya que la tecnología Li-Fi necesita de línea de vista y posee una cobertura limitada.

**Figura 60***Delay en la Práctica*

*Nota.* En la figura se muestra las mediciones del delay y cómo afecta la distancia entre en receptor y el transmisor de los datos obtenidos en la práctica.

**Figura 61***Delay en la Simulación*

*Nota.* En la figura se muestra las mediciones del retardo de propagación calculado en la simulación en (ns), se observa cómo interviene la distancia entre en receptor y el transmisor.

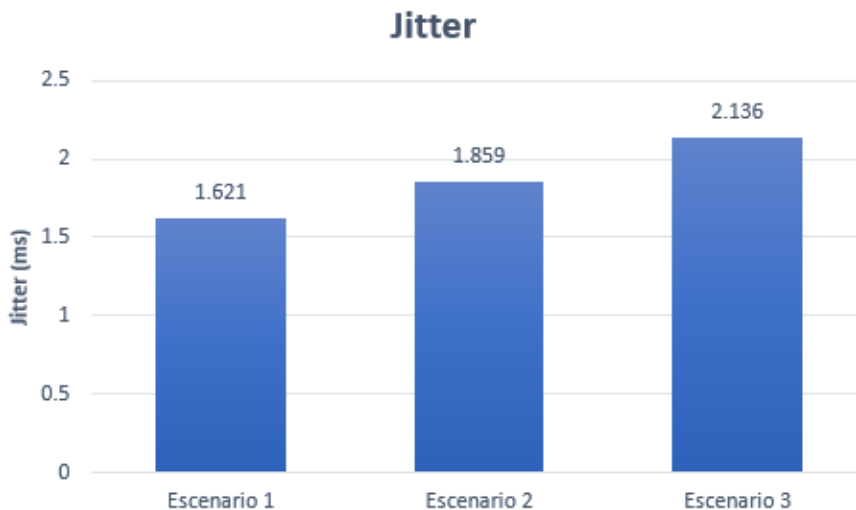
### Jitter.

El Jitter está definida como la variación del tiempo de llegada al punto receptor, este se puede calcular cuando se envía un set de datos, también es conocido como la variación del delay. Estos valores fueron medidos en la parte práctica, ver Figura 62 y para la parte simulada se calculó el tiempo en el que llega la información de los nLOS, ver

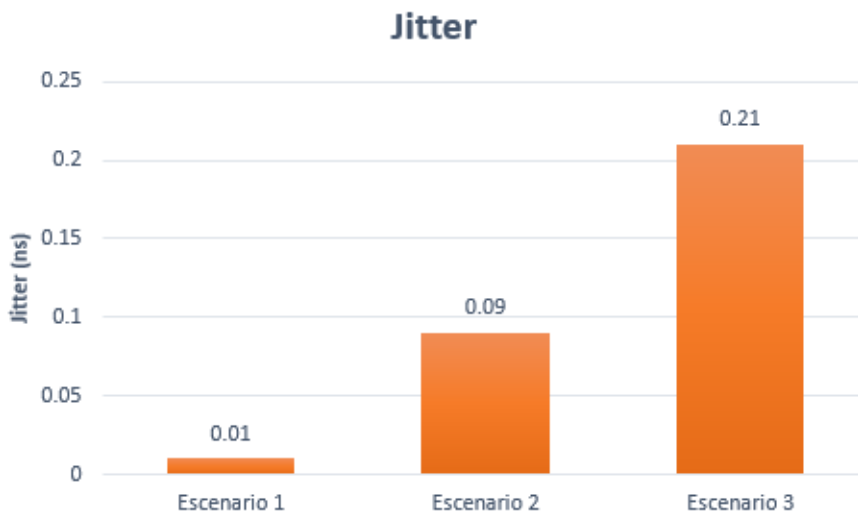
**Figura 63**, como se puede observar este tiempo es mucho menor que el delay, esto se debe a que el sistema intenta enviar la mayor cantidad de información en un mismo intervalo de tiempo para permitir una comunicación transparente.

**Figura 62**

*Jitter en la Práctica*



*Nota.* En la figura se muestra las mediciones del Jitter en los tres escenarios se verifica que este valor al igual que el delay aumenta en base a la distancia.

**Figura 63***Jitter en la Simulación*

*Nota.* En la figura se muestra las mediciones del Jitter en la simulación se valida el incremento de esta variación a medida que aumenta la distancia.

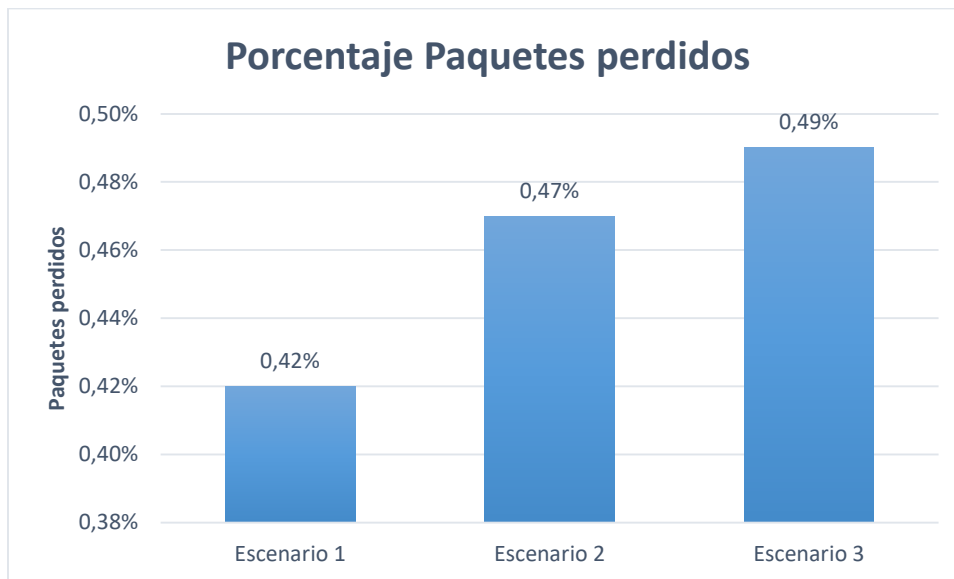
### **Paquetes Perdidos.**

La pérdida de paquetes ocurre durante la transferencia de datos, esto se puede producir por la degradación de la señal, congestión en la red, falla en el hardware de la red entre otras. La pérdida de paquetes puede afectar al desempeño de la red, en los datos medidos en la práctica se inundó el canal para cada uno de los escenarios, es decir para el escenario 1 se envió 38 Mbytes, para el escenario 2 se envía 28.7 Mbytes y para el tercero 24.9 Mbytes, esto se realizó en función de la velocidad de transmisión medida para cada escenario, en la

**Figura 64** se muestra el porcentaje de paquetes perdidos en cada escenario.

**Figura 64**

*Paquetes Perdidos en la práctica*



*Nota.* En la figura se muestra el aumento de paquetes de perdidos dependiendo el tipo de escenario y como aun incluso disminuyendo el número de paquetes enviados este sigue aumentando en función de la distancia.

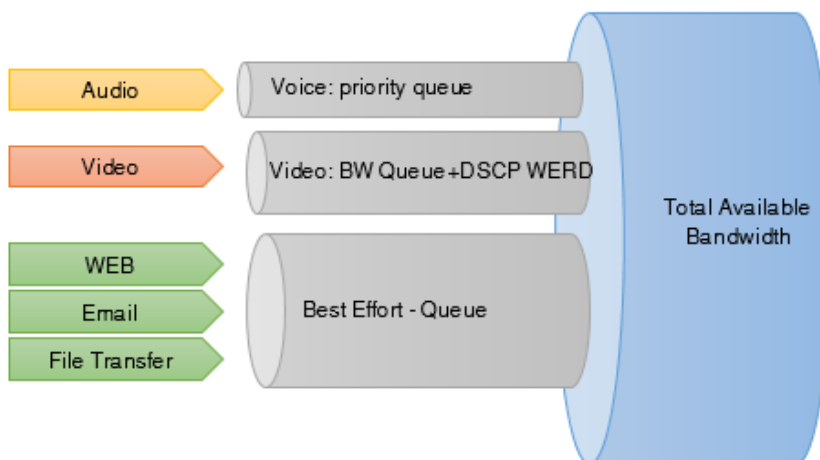
En esta sección se determina nuevamente la sensibilidad de cobertura que ofrece el sistema Li-Fi ya que el tercer escenario al presentar mayor degradación de la señal, se obtiene mayor cantidad de paquetes perdidos.

Ahora con los datos obtenidos se realiza una comparación con los parámetros de SLA (Acuerdo de nivel de servicio) requeridos para tener QoS para video llamadas mediante el estándar H263 que se enlista en la Tabla 16 (Hyun-Joo Moon, 2011) que es una de las aplicaciones con mayor prioridad de tráfico en una determinada red, ver Figura 65.



**Figura 65**

*Prioridades en para flujos de tráfico*



*Nota.* En la figura se muestra la prioridad para los diferentes flujos de tráfico. Recuperado de: (Reis, 2018)

**Tabla 16**

*SLA para video telephone*

Parámetros de SLA	H263	Red Li-Fi
Paquetes Perdidos	3%	0,42%
Velocidad máxima de transmisión	384kbps	32,6 Mbps
Delay	100ms	4ms
Jitter	30ms	1.62ms

*Nota.* En la tabla se muestran los datos para cumplir con el SLA para video telephone y los valores obtenidos en la parte práctica. Recuperado de: (Hyun-Joo Moon, 2011)

Los valores obtenidos en la implementación garantizan QoS incluso utilizando en el escenario tres, el cual presenta el menor rendimiento del sistema Li-Fi

### *Análisis de modulación ACO-OFDM Y DCO-OFDM.*

Para poder analizar el rendimiento de estas dos modulaciones se compara en términos del BER. El BER o tasa de error de bit es una medida promedio de los errores producidos durante la transmisión, este valor es importante ya que si el BER es inferior a un valor límite puede que la señal no pueda ser recuperada. Un BER de  $2 \times 10^{-6}$  significa que hay dos errores por cada millón de bits del total de datos enviados, el BER se calcula mediante la Ecuación 55. (Montoya Santiago, 2017)

$$BER = \frac{\text{número de bits errados}}{\text{número de bits transmitidos}}$$

Ecuación 55

La relación señal/ruido o SNR (Signal to Noise Ratio) es la relación entre la potencia de la señal transmitida y la potencia de ruido formado por diferentes componentes del sistema, es decir es una comparación de una parte de la señal con ruido de fondo, por lo que un SNR mayor indica un ruido de fondo menor, es decir, si se tiene una SNR mayor indica un ruido de fondo menos perceptible ya que lo que se aumenta será la potencia de la señal, para calcular el SNR se utiliza la Ecuación 56. Donde  $S$  es la potencia media de la señal y  $N$  es la potencia media del ruido.

$$SNR = \frac{S}{N}$$

Ecuación 56

Teniendo estos conceptos claros se procede a analizar el rendimiento de estas dos modulaciones con las gráficas de BER vs SNR cuando la señal pasa por un canal óptico AWGN en cada uno de los escenarios mencionados anteriormente.

Para la obtención de los resultados utilizamos los mismos parámetros que fueron determinados para la simulación de la velocidad de transmisión, es decir 80 símbolos y 128

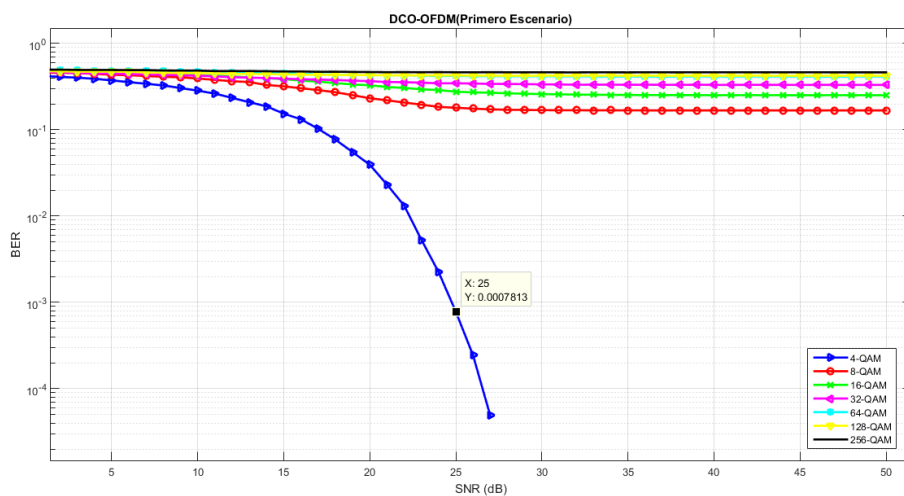
subportadoras de información útil por cada uno de los símbolos tanto para DCO-OFDM como para ACO-OFDM. Se usa modulación de 4, 8, 16, 32, 64, 128 y 256 QAM.

En la Figura 66 se muestra el BER vs SNR para la modulación DCO-OFDM para las diferentes órdenes de modulación, en esta curva se puede observar cómo al aumentar el orden de la modulación el BER va degradándose si se observa un SNR fijo. La relación que existe entre el BER y el SNR es inversamente proporcional por lo que el BER decrece cuando el SNR aumenta, en la gráfica se evidencia que cuando la modulación supera el grado de modulación de 8-QAM esta relación tiende a linealizarse, es decir, por más SNR que se otorgue el valor del BER comienza a ser constante y alto. Por ejemplo si se toma como referencia un BER de  $10^{-3}$  en un grado de cuadratura 4-QAM, se verifica que aun aumentando el SNR hasta  $50\text{dB}$  no se obtiene ese valor de BER para ninguna de las otras modulaciones.

En la Figura 67 y Figura 68 se observa la simulación del BER para el segundo y tercer escenario.

### Figura 66

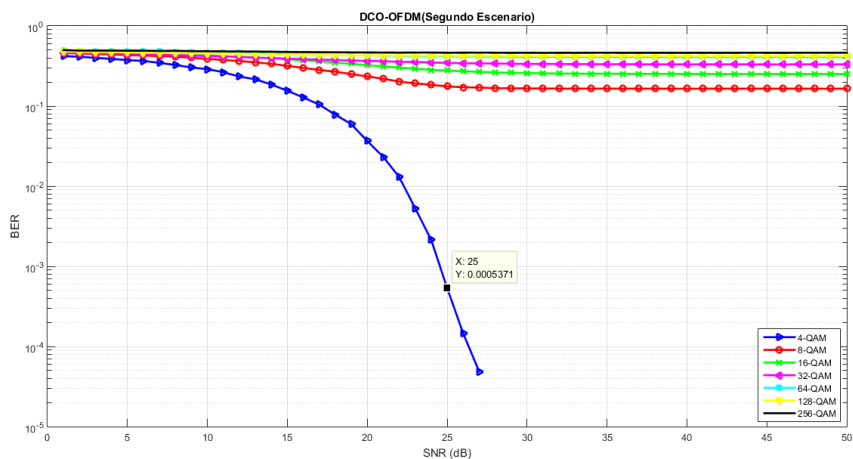
*Simulación BER vs SNR DCO-OFDM primer escenario*



*Nota.* En la figura se muestra la simulación BER vs SNR DCO-OFDM para el primer escenario.

**Figura 67**

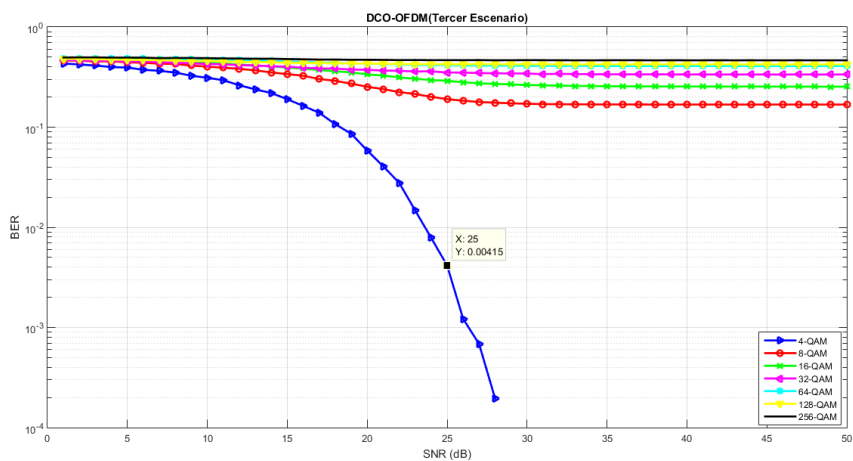
*Simulación BER vs SNR DCO-OFDM segundo escenario*



*Nota. En la figura se muestra la simulación BER vs SNR DCO-OFDM para el segundo escenario.*

**Figura 68**

*Simulación BER vs SNR DCO-OFDM tercer escenario*



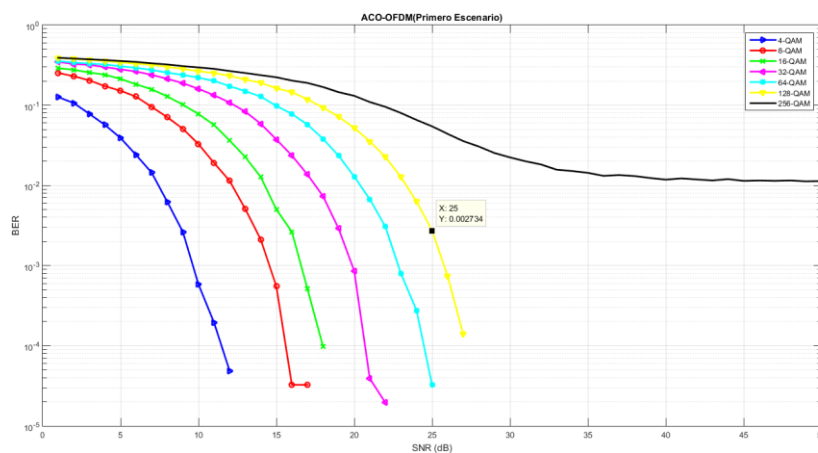
*Nota. En la figura se muestra la simulación BER vs SNR DCO-OFDM para el tercer escenario.*

En las gráficas anteriores se valida la curva de BER vs SNR para cada uno de los escenarios implementados, en estas podemos observar que con un SNR fijo y utilizando una modulación 4-QAM el BER varia respecto a la posición del receptor al igual que los parámetros analizados anteriormente, ya que en el escenario 1 se verifica un BER menor y en el tercer escenario se obtiene un BER mayor o menos eficiente.

En la Figura 69 se muestra el BER vs SNR para la modulación ACO-OFDM con órdenes de modulación en cuadratura desde 4-QAM hasta 256-QAM. En dicha figura se muestra que el BER se degrada mientras se aumenta el nivel de modulación en cuadratura, por ejemplo, para un valor de  $BER \cong 10^{-3}$  en un nivel de cuadratura de 4-QAM con un SNR de  $10dB$  y para obtener este mismo valor de BER con un nivel de modulación en cuadratura 32-QAM se necesita aumentar el SNR a  $20dB$ . Por lo tanto, en esta modulación se tiene un escenario diferente, ya que se alcanza valores de  $BER \cong 10^{-4}$  en modulaciones de hasta 64-QAM, por lo que se considera que es posible recuperar la información con niveles de modulación en cuadratura hasta los 128-QAM.

**Figura 69**

*Simulación BER vs SNR ACO-OFDM primer escenario*

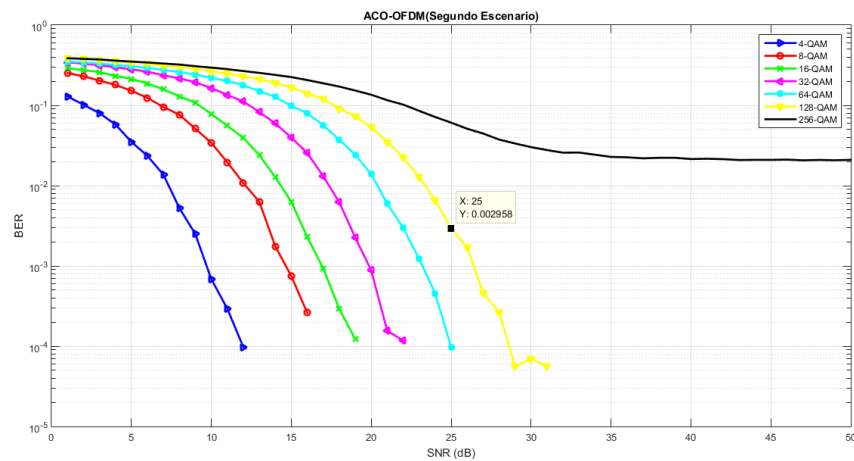


*Nota.* En la figura se muestra la simulación BER vs SNR ACO-OFDM para el primer escenario.

En la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** y Nota. En la figura se muestra la simulación BER vs SNR ACO-OFDM para el segundo escenario. se observa la simulación del BER para el segundo y tercer escenario.

**Figura 70**

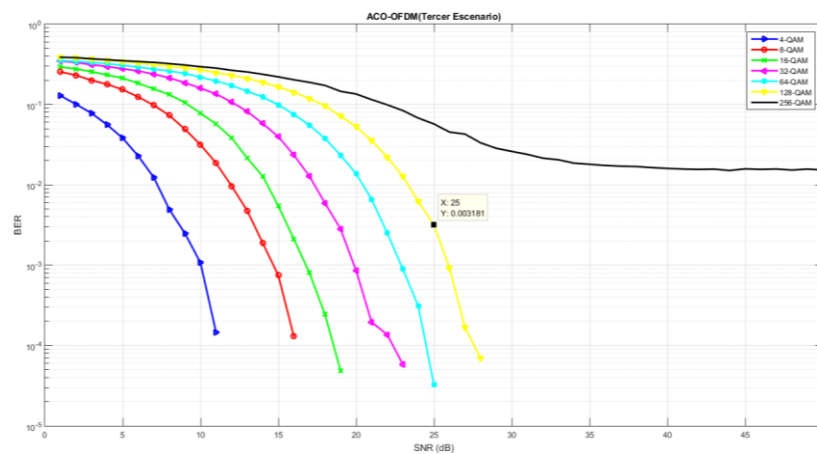
*Simulación BER vs SNR ACO-OFDM segundo escenario*



Nota. En la figura se muestra la simulación BER vs SNR ACO-OFDM para el segundo escenario.

**Figura 71**

*Simulación BER vs SNR ACO-OFDM tercer escenario*



Nota. En la figura se muestra la simulación BER vs SNR ACO-OFDM para el tercer escenario.

En las gráficas anteriores se valida la curva de BER vs SNR para cada uno de los escenarios implementados en estas podemos observar que en un SNR fijo y utilizando una modulación 128-QAM el BER tiene una mínima variación respecto a la posición del receptor, y se confirma que es el primer escenario el más eficiente.

Con los valores obtenidos en las modulaciones de ambas técnicas se aprecia que para DCO-OFDM al modular con órdenes diferentes a 4-QAM se muestra altas probabilidades de error, sin embargo, en ACO-OFDM se pueden obtener tasas de error mucho menores incluso aplicando modulaciones hasta 128-QAM. Por lo tanto, DCO-OFDM presenta una mayor afectación en relación al BER que ACO-OFDM en un canal óptico.

Se realiza el análisis del BER y se detalla en Tabla 17, tomando en cuenta que los valores de BER en DCO-OFDM se realiza con una modulación en cuadratura de 4-QAM, mientras que en ACO-OFDM se utiliza una modulación en cuadratura de 128-QAM y para ambas técnicas de modulación se envían 80 símbolos.

**Tabla 17**

*Valores de BER en los tres escenarios.*

Modulación	Escenario1		Escenario2		Escenario3	
	BER	%	BER	%	BER	%
<b>ACO-OFDM</b>						
<b>SNR(25dB)</b>	0.0027	0.27%	0.0029	0.29%	0.0031	0.31%
<b>DCO-OFDM</b>						
<b>SNR(25dB)</b>	0.00078	0.078%	0,00053	0,053%	0.00415	0.41%

*Nota.* En la tabla se muestra los valores de BER expresados como porcentaje para cada técnica de modulación.

## Capítulo 5

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

- El desempeño de la red IEEE 802.15.7 se determina a través de las métricas obtenidas mediante la implementación del sistema PureLiFi-XC, los cuales garantizan QoS (calidad de servicio), dichos parámetros son comparados con métricas de SLA (acuerdo de nivel de servicio) para transferencia de datos con alta prioridad.
- El sistema Li-Fi presenta buenos valores de throughput con un cierto grado de error, en este caso el throughput medido presenta un 20% de error relativo en comparación a las características que ofrece el equipo. Para el mejor de los escenarios, es decir, el primer escenario cuyo receptor se encuentra a 1,20 metros de distancia del transmisor con línea de vista directa entre la lámpara y la estación.
- En la simulación del throughput se verifica que para transmitir una cantidad determinada de datos con un throughput específico la técnica de modulación DCO-OFDM utilizan la mitad del ancho de banda que la técnica de modulación ACO-OFDM, como se puede detallar en la Tabla 13, para enviar un throughput de 32.6 Mbps con la técnica de modulación DCO-OFDM es necesario un ancho de banda de 15.85 KHz mientras que para enviar el mismo throughput utilizando la técnica de modulación ACO-OFDM es necesario un ancho de banda de 31.69 KHz.
- La cobertura que ofrece el sistema Li-Fi afecta directamente al delay en la transmisión de datos ya que al variar la ubicación del receptor en distancias menores a un metro se observa una afectación muy notable en dicho delay, afectando también al throughput. Como se detalla en el escenario 3, al estar a una distancia de 2.20 metros el receptor del



transmisor con línea de vista directa entre la lámpara y la estación se presenta un delay de 6ms siendo este el mayor de los tres escenarios, al igual que el throughput con una error de 45% respecto al valor ofrecido por el equipo PureLiFi LiFi-XC.

- En el sistema Li-Fi se determina que los valores de jitter son relativamente pequeños para ofrecer QoS con respecto a la Tabla 16. Mediante la implementación se obtuvo el mayor valor de jitter de 2.1361ms en el peor de los escenarios, que es el tercero, donde el transmisor y receptor se encuentran a una distancia de 2.20 metros, mientras que el mejor jitter con un valor de 1.621ms se lo obtiene en el primer escenario donde el transmisor y el receptor se encuentran a una distancia de 1.20 metros de distancia. Demostrando así que el valor del jitter también se ve afectado por la posición y distancia en la que se encuentra ubicado el receptor.
- Los valores medidos de los parámetros de QoS en la implementación permiten determinar la directividad del sistema Li-Fi ya que el mismo es muy sensible a pequeñas variaciones de la ubicación del receptor en cuanto a cobertura. Esto se evidencia al comparar el primer y segundo escenario implementado, ya que la distancia en el eje z es la misma de 1.20 metros entre el transmisor y el receptor, para el segundo escenario utilizando una distancia límite de 1.50 metros en el plano xy se obtiene los siguientes valores. En el primer escenario se tiene un throughput de 32.6 Mbps, un delay de 4 ms, un jitter de 1.621 ms y 0,42% de paquetes perdidos al inundar el canal. Para el segundo escenario se tiene un throughput de 24.01 Mbps, un delay de 4.8 ms, un jitter de 1.859 ms y 0.47% de paquetes perdidos al inundar el canal. Se verifica que el segundo escenario presenta una disminución de parámetros QoS al no estar ubicado a una distancia directa entre el transmisor y receptor.

- Se determina que el mejor de los escenarios es el primero el cual se encuentra a 1.20m de distancia entre el transmisor y el receptor, puesto que posee el mejor un throughput de 32.6 Mbps, el menor de los delay con 4 ms, el menor valor de jitter de 1.621 ms y el menor porcentaje de paquetes perdidos 0,42% al inundar el canal, el peor de los escenarios es el tercero pues presenta el throughput más bajo con un valor de 23 Mbps, el mayor de los delay con 6ms, el mayor de los jitter con 2.13ms y el mayor porcentaje de valores perdidos de 49% al inundar el canal.
- Mediante la simulación realizada se determina que la técnica de modulación ACO-OFDM presenta mayor robustez frente a la técnica de modulación DCO-OFDM, ya que se utiliza la técnica de modulación ACO-OFDM con modulaciones en cuadratura desde los 4-QAM hasta los 64-QAM para obtener un valor de BER aproximado a los  $10^{-4}$  aumentando el valor del SNR hasta los 25dB, mientras que en DCO-OFDM no es posible alcanzar este valor de BER, se observa que tan solo con la modulación en cuadratura 4-QAM se obtienen valores de BER de  $10^{-3}$  con un SNR de 25dB.
- Las características que ofrece la tecnología Li-Fi con respecto a cobertura, la convierte en un sistema con un alto grado de seguridad ya que la señal transmitida no puede ser interceptada fuera del área de iluminación de la lámpara LED, la distancia máxima a la que se puede desplazar el receptor del transmisor en el plano xy es de 1.50 metros, detallado en el segundo escenario implementado, al pasar esta distancia se pierde la conexión a la red incluso estando en la misma habitación.
- Se verifica en los valores simulados respecto al jitter y delay que las unidades con las que se trabaja se encuentran en ns mientras que en la parte implementada estos valores se dan en ms esto se debe a que en la simulación es el retardo de propagación el que se puede calcular ya que los retardos de transmisión y de nodo no son simulados en este

proyecto, aun así es evidente que en la práctica el retardo de propagación es el más influyente, a pesar de que las distancias en las que se mueve al receptor del transmisor son menores a 1 metro, se valida que mientras el receptor se encuentre más cerca del transmisor tanto el delay como el jitter es menor. El delay para el mejor de los escenarios es de 1.621ms en la parte práctica y de 0.01ns en la parte simulada, mientras que en el peor de los escenarios, el escenario tres que tienen una mayor distancia se tiene un delay de 2.136ms en la parte práctica y de 0.21ns en la parte simulada.

- Los parámetros de throughput, delay y jitter medidos en la implementación, se logra obtener mediante simulación para las técnicas de modulación en ACO-OFDM y DCO-OFDM en los 3 escenarios, utilizando las características obtenidas de los equipos PureLiFi y las características de la tecnología basada en el estado de arte desarrollado en este proyecto. Por lo que para validar el rendimiento del canal se hace énfasis en el análisis de datos obtenidos de paquetes perdidos en la implementación y los simulados de BER. De esta manera se realiza una analogía de que la tecnología LiFi utiliza una la técnica de modulación ACO-OFDM.
- Los datos que más se asemejan entre simulados y mediciones realizadas en la implementación utilizando 3 escenarios, para paquetes perdidos y BER con equipos PureLiFi, son los que se obtienen al usar una técnica de modulación ACO-OFDM, la misma presenta robustez con modulación en cuadratura hasta a los 128-QAM a pesar de que utiliza el doble de ancho de banda para su transmisión, esta es una ventaja de utilizar tecnología Li-Fi pues puede utilizar grandes anchos de banda. Al realizar una analogía entre el número de paquetes perdidos medidos en la implementación y el número de bits errados obtenidos en la simulación se verifica que los valores en ACO-OFDM son los valores más cercanos a los medidos en la práctica. Es decir en el primer escenario en la

simulación se obtiene un valor de BER de 0.0027 para ACO-OFDM mientras que en DCO-OFDM se tiene un valor de BER de 0.00078, corroborando las medidas obtenidas en la práctica de 0.42%.

- En la simulación se verifica que si PureLiFi LiFi-XC trabaja con DCO-OFDM solo se podría trabajar con una modulación en cuadratura de 4-QAM ya que como se observa en las figuras anteriores el valor del BER es mayor a  $10^{-1}$  lo que causaría que no se puedan recuperar los datos transmitidos.

## Recomendaciones

- Se recomienda utilizar un correcto sistema de alimentación para energizar los equipos PureLiFi, como el uso del adaptador PoE para evitar daños o mal funcionamiento del mismo.
- Se recomienda utilizar la misma versión del sistema operativo (Windows) entre cliente - servidor, para evitar problemas al momento de comprobar de conectividad entre estos.
- Es aconsejable ubicar el transmisor del equipo PureLiFi en el centro del lugar a implementar ya que como se comprueba en este trabajo la reflexión de la señal en las paredes hacen que la transmisión disminuya considerablemente.
- Es necesario utilizar la mayor información que proporcionan los equipos PureLiFi para recrear el sistema a través de la simulación y obtener mejores resultados.

## Trabajos futuros

- Como trabajos futuros se puede realizar simulaciones con otro tipo de modulaciones como las PAM o CSK para obtener resultados enfocados en el uso del ancho de banda que proporciona la tecnología LiFi.
- Es necesario comprobar la interferencia que puede presentar los equipos LiFi con otras estaciones ya que en este trabajo se comprueba que no hay interferencia con el equipo frente a otras fuentes de luz.
- En este trabajo se comprueba la simetría que posee el equipo en la transmisión de datos, sin embargo hay nuevas compañías que trabajan con LiFi en los cuales se tiene una restricción en el Up-link, canal y transmisión que debería ser estudiado a profundidad.
- Se podría comprobar la eficiencia o rendimiento que presentan varias marcas de equipos PureLiFi, para verificar la que elementos del sistema son los que limitan la transmisión de datos.

## Referencias

- Arteaga E., M. G. (2 de Julio de 2020). Análisis de desempeño a nivel de simulación de un sistema de comunicaciones Li-Fi para la transmisión de datos a alta velocidad-. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 73-81.
- Balas, A. T. (2016). *Estudio del estándar 802.15.7 del IEEE sobre sistemas de comunicación por luz visible*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- Barry, K. K. (1993). Simulation of Multipath Impulse Response for Indoor Wireless Optical Channels. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATION*, 367-379.
- Bellis. (11 de Febrero de 2020). *El fotófono de Alexander Graham Bell fue una invención adelantada a su tiempo*. Obtenido de <https://www.thoughtco.com/alexander-graham-bells-photophone-1992318>
- Corcoran. (2012). Control remoto inalámbrico [IP Corner]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 48-51.
- Crisanto, Q. (2013). Transmisión de datos por medio de sistemas VLC. *Vector Plus*, 34-41.
- Cruz M., G. M. (2013). Análisis de la QoS en redes inalámbricas. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 2-3.
- Fonrouge, S. (2016). *Ondas electromagnéticas*. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Fuertes W., J. L. (2016). Evaluación del Rendimiento de Redes IP utilizando Plataformas de Virtualización y Métodos de Simulación. "GEEK'S" *Revista Técnica del Departamento de Ciencias de la Computación de la ESPE*, 34-43.
- García, J. (2020). *Reflexión especular y reflexión difusa*. Granada: Universidad de Granada.
- Gil, V. (2013). *Análisis de sistemas OWC-OFDM para la mejora eficiente de sus prestaciones en VLC*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Hyun-Joo Moon, J.-K. L.-C.-C.-J. (2011). A Study of QoS Mapping based on SLA in B3G Networks. *Documentos sobre la sociedad de la información de Corea*, 160-161.
- L. Chen, B. K. (2009). Diversity combining for asymmetrically clipped optical OFDM in IM/DD channels. *Global Telecommunications Conference*, 1–6.
- León, D. (2018). *Estudio y Simulación de las Técnicas DCO-OFDM, ACO-OFDM y HACO-OFDM Para la Tecnología Li-Fi en Ambientes Indoor*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Lopez, D. (2018). *EVALUACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AC CON TECNOLOGÍA MU-MIMO EN COMPARACIÓN AL ESTÁNDAR DE FIBRA ÓPTICA EN REDES DE TRANSPORTE DE DATOS*. Ambato: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO.

- Lorenzo, B. (2016). *Estudio del Estado del Arte de los sistemas de comunicaciones por luz visible (VLC)*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- Lucibel. (2016). *LuciCup II*. Barentin: Grupo Lucibel.
- Montoya Santiago, D. M. (2017). *Límites de velocidad y distancia en la transmisión de información por un enlace óptico de bajo costo con recuperación libre de ruido*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Morales, R. (2017). *Implementación de DCO-OFDM mediante SDR*. Madrid: Universidad Carlos II de Madrid.
- Muñoz A., G. M. (2019). *Sistema de Localización en Interiores Basado en Comunicaciones Ópticas no Guiadas por Luz Visible*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Proaño, A. (2019). *Evaluación de desempeño de una red IEEE 802.15.7 en modo infraestructura para ambientes indoor*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE.
- PureLifi. (2017). *LiFi-XC Access Point User Manual*. Scotland: PureLiFi.
- PureLiFi. (2017). *LiFi-XC Station*. Edinburgh Scotland, UK: PureLiFi.
- PureLiFi. (2017). *Snapshot*. Edinburgh Scotland, UK: PureLiFi.
- Reis, S. B. (7 de Octubre de 2018). *Microsoft Teams, conceptos y tecnología*. Obtenido de <https://www.santiagobuitragoreis.com/microsoft-teams-conceptos-y-tecnologia-parte-xviii/>
- Rojas L., T. L. (2018). *Análisis de saturación del espectro electromagnético en la banda no licenciada de 5Ghz en la zona urbana de la ciudad de Guayaquil y su impacto en el despliegue de equipos con tecnología WIFI 802.11ac*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Sanchez, C. (2012). *Contribución Al Estudio De Estrategias De Acceso Al Medio En Redes Ópticas No Guiadas*. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Tixi, D. (2016). *Estudio Y Análisis Comparativo De La Tecnología 802.15.7 Para Sistemas De Comunicaciones Inalámbricas Con Respecto A La Tecnología 802.11n*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Vega, A. J. (2015). Sistema de comunicación digital por medio de LIFI. *Jóvenes en la Ciencia*, 1515-1517.
- W Popoola, R. S. (2017). *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB*. Florida: CRC Press.
- Z Ghassemlooy, L. N.-A. (2017). *Visible Light Communications*. Florida: CRC Press.



