

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADOS

TEMA:

**SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE DATOS INALÁMBRICA
MEDIANTE PULSOS LUMINOSOS**

Proyecto de Investigación y Desarrollo previo a la obtención del título de

Magister en Redes de Comunicación

Autor:

Diego Patricio Burbano Báez

Director:

Gustavo Xavier Chafla Altamirano

Quito – Ecuador

2016

Declaración de responsabilidad y autorización de uso del trabajo de grado

Yo Diego Patricio Burbano Báez autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Diego Patricio Burbano Báez

1001965191

Dedicatoria

Luego de terminar con las clases de estudio, llego el momento de realizar la tesis y lo primero que se necesita es tener energías para terminar con la investigación y de esta manera culminar con la graduación, dichas energía es el fruto de las personas a las que quiero dedicar mi trabajo.

Mi familia, el eje modular de mi vida, la cual con su apoyo fue posible sobrellevar las dificultades encontradas en algunos momentos y no me dejaron desmayar los cuales pusieron en mí las fuerzas que necesite para culminar este proyecto.

Mi querida esposa, de la cual cada mañana me siento agradecido, espero con este esfuerzo poderte compensar de alguna manera todo lo que has hecho por mí, sin embargo luego de pasar por muchas dificultades hemos logrado salir adelante.

Mis hijos, que solamente con su luz fueron capaces de iluminar el sendero que lleno de claridad a mi alma y mente permitiéndome dar fluidez en el desarrollo de este proyecto.

Gracias madre por permitirme estar en este mundo, cuidarme y hacerme una persona de bien sin duda este sacrificio es muestra de mi cariño y agradecimiento.

Mis profesores, gracias a ellos por enseñarme, siendo parte de este logro y me siento muy orgulloso de haber tenido la dicha de contar con docentes de un nivel académico excelente, espero que su esfuerzo se encuentre reflejado en esta tesis.

Agradecimiento

Es importante dar un espacio en el desarrollo de este proyecto para expresar un profundo agradecimiento a todas las personas que con su colaboración formaron parte de este desafío que tenía como finalidad la demostración y funcionamiento de esta nueva tecnología teniendo como dificultad el no disponer de equipos que funcionen bajo las características necesarias para cumplir con los objetivos señalados en este proyecto, así también reconocer la ayuda en la orientación y desarrollo del presente trabajo que se debe en gran medida a la supervisión de mi director Dr. Gustavo Chafra, las personas que formaron parte de este gran reto se encuentran distribuidas a lo largo de la investigación en especial la ayuda recibida para disponer del prototipo, a mi familia fuente de apoyo constante e incondicional en todas las etapas de mi vida y más aún en mis duros años de carrera profesional y en especial mi agradecimiento a mi madre querida por darme la vida y gracias a ti soy lo que soy, a mi esposa amada gracias por tu apoyo incondicional para la culminación de este proyecto, con lo cual hemos alcanzado un triunfo más en nuestras vidas.

A todos ellos, muchas gracias.

Resumen

La investigación está encaminada en establecer una alternativa para las comunicaciones inalámbrica que en la actualidad se encuentran en funcionamiento, adquiriendo en los primeros capítulos el conocimiento necesario del sistema de comunicación inalámbrico que ocupan el espectro electromagnético de radio, microondas, infrarrojo por se transmite información mediante la modulación de la amplitud, frecuencia o fase de ondas. Luego de analizar esta porción del espectro electromagnético se estudia el espectro de luz visible el cual brinda la posibilidad de transmitir información. La comunicación óptica ocupa el espectro de luz visible y la luz es conocida desde siempre, siendo la llegada del LED el renacimiento de esta forma de comunicación inalámbrica el cual tiene una propiedad importante que puede ser modulada a velocidades muy altas, siendo el LED parte indispensable de este prototipo, es necesario analizar los elementos ópticos como en el fotodiodo el cual se encarga de recibir la señal que es enviado por el diodo emisor de luz. El termino comunicaciones por luz visible VLC fue descrito para este tipo de comunicación inalámbrica, siendo de constante interés en los últimos años con la finalidad de realizar nuevas aplicaciones gracias al incremento de la potencia del LED en particular de luz blanca. Al incorporar altas velocidades puede ser aplicado en diferentes escenarios, siendo su nombre popular Li-Fi del cual se realiza un estudio de funcionamiento orientado a las redes de comunicación, Li-Fi es una nueva tecnología la cual llega con la finalidad de subsanar y mejorar las desventajas que presenta el actual sistema Wi-Fi.

Palabras clave: VLC (Comunicación por luz Visible), Li-Fi (Sistema de comunicación rápido).

Abstract

This research is aimed at establishing an alternative for wireless communications that currently are operational. In the early chapters there is the information about wireless communication system that occupy the electromagnetic spectrum of radio, microwave, infrared, through which information can be transmitted by modulating of the amplitude, frequency or phase waves. After analyzing this portion of the electromagnetic spectrum it will focus exclusively on the study of visible light spectrum which will give the possibility to transmit information. Optical communication occupies the spectrum of visible light and light has always been known, with LED there is the rebirth of this form of wireless communication which has an important property that can be modulated at very high speeds, so LED is an indispensable part of this prototype, however, the optical elements need to be analyzed, such as; photodiode which is in charge of receiving the signal that is sent by the light emitting diode. The term communications VLC visible light was described for this type of wireless communication, with constant interest in recent years in order to make new applications thanks to increase in LED power, mainly the white light. Incorporating high speeds it can be applied in different scenarios and its popular name is Li-Fi which carries out a study of its performance geared towards communication networking, Li-Fi is a new technology which comes in order to correct and improve the disadvantages of the current Wi-Fi system.

Keywords: VLC (Visible Light Communication), Li-Fi (fast communication system).

Tabla de contenido

Declaración de responsabilidad y autorización de uso del trabajo de grado	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Tabla de contenido.....	vii
Lista de figuras.....	xiv
Lista de tablas	xix
Capítulo 1. Introducción	1
1. Presentación del trabajo	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Justificación	6
1.3. Objetivo general.....	9
1.4. Objetivos específicos	9
Capítulo 2. Estado del arte	10
2. Redes inalámbricas	10
2.1. Reseña histórica	10
2.1.1. Proceso de estandarización.	11
2.1.2. Características de las redes inalámbricas.....	12
2.1.3. Modos de operación.....	13
2.1.4. Seguridad en la red.....	14
2.2. Transmisión inalámbrica.....	15
2.2.1. Ondas electromagnéticas.	15
2.2.2. Componentes de una onda.	16

2.2.3. Longitud de onda.	16
2.2.4. El espectro electromagnético.	17
2.2.5. Radiotransmisión.	19
2.2.6. Transmisión por microondas.....	21
2.2.7. Transmisión infrarroja.	21
2.2.8. Transmisión por ondas de luz.	22
2.2.9. Luz espectro electromagnético.	23
2.3. Comunicación con luz visible.....	26
2.3.1. Tecnología Li-Fi.	30
2.3.2. Que es Li-Fi.	31
2.3.3. Como Funciona Li-Fi.....	32
2.3.4. Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas.	34
2.3.5. Estructura básica de una red Li-Fi.	36
2.3.6. Ventajas de la tecnología Li-Fi.....	36
2.3.7. Desventajas de la tecnología Li-Fi.....	37
2.4. Elementos ópticos para la transmisión.....	37
2.4.1. Evolución histórica.	37
2.4.2. LED.....	39
2.4.3. Generación de luz blanca led.	43
2.4.4. LDR.....	44
2.4.5. Fotón	44
2.4.6. Fotodetector.	45
2.4.7. Detectores térmicos.....	45
2.4.8. Detectores fotoeléctricos.....	46
2.4.9. Fotoconductor.	46

2.4.10. Fotodiodo y fototransistor.....	47
2.5. Detectores de luz.....	48
2.5.1. Diodos pin.....	48
2.5.2. Construcción de un fotodiodo PIN.	49
2.5.3. Fotodiodo de avalancha.	50
2.5.4. Diodos laser.	50
2.6. Estándar de comunicación	52
2.6.1. Compatibilidad áreas de servicio VLC.....	52
2.6.2. Compatibilidad de iluminación en VLC.....	53
2.6.3. Compatibilidad del proveedor con VLC.....	55
2.7. Estándar de compatibilidad.....	56
2.7.1. IEEE 802.15.7 VLC.....	56
2.7.2. Topología peer to peer.	57
2.7.3. Topología estrella.....	58
2.7.4. Topología lógica broadcast.	59
2.7.5. Capa física PHY.....	60
2.7.6. Control de acceso al medio MAC.....	61
2.7.7. PIASA E1.45 DMX- 512A VLC.	63
2.7.8. LED iluminación del motor zhaga.....	64
2.8. Estándar de modulación VLC.....	66
2.8.1. Modelo PHY I.....	66
2.8.2. Modelo PHY II.	69
2.8.3. MODELO PHY III.	71
2.8.4. Modulación variable por posición de pulso VPPM.....	73
2.8.5. Línea de codificación.....	74

2.8.6. VLC estándar de transmisión de datos.....	74
2.8.7. Protocolo de transmisión con cable.	75
2.8.8. Protocolo de transmisión inalámbrica.....	76
2.9. Estándar de iluminación VLC.....	76
2.9.1. Interfaz de origen de iluminación led.	76
2.9.2. Interfaz de sistema led de iluminación inteligente.....	77
2.9.3. Estándar de servicio VLC.	78
2.10. Problemas de sincronización en VLC.....	79
2.10.1. Métodos de modulación de VLC en el dominio del tiempo.	81
2.10.2. ON OFF KEYING OOK.	81
2.10.3. Modulación por posición de pulso PPM.....	83
2.10.4. Modulación inversa por posición de pulso IPPM.	84
2.10.5. Modulación de posición de pulso variable VPPM.....	85
2.10.6. OOK VER.....	86
2.11. Transmisión de alta velocidad con VLC.....	89
2.11.1. Consideraciones para una modulación de alta velocidad.	91
2.11.2. Modulación DMT.	92
2.11.3. Modulación por índice de sub-portadora SIM-OFDM.	94
2.11.4. Espectro ensanchado.	96
2.12. Tendencias tecnológicas aplicado en Li-Fi.....	97
2.12.1. Sistema de educación.....	97
2.12.2. Aerolíneas.	98
2.12.3. Difusión de información multimedia en pasajeros.	99
2.12.4. Control de tráfico.	100
2.12.5. Hospitales.....	100

2.12.6. Línea de producción.....	101
2.12.7. Red de comunicación urbana.....	102
2.12.8. Planta petroquímica.....	102
2.12.9. Máquina a máquina.....	103
Capítulo 3. Sistema prototipo de transmisión de datos inalámbrico por luz visible.....	104
3. Componentes básicos del sistema prototipo Li - Fi.....	104
3.1. Proceso de envío y recepción de datos.....	104
3.1.1. Unidad transmisora.....	107
3.1.2. Unidad receptora.....	110
3.1.3. El canal.....	110
3.2. Equipo prototipo li-fi lámpara led.....	112
3.2.1. Led lámparas Li-Fi faro.....	112
3.2.2. Android tablet Li-Fi ready.....	113
3.2.3. Aplicación basada en localización.....	113
3.2.4. Descripción física.....	114
3.3. Equipo prototipo transceiver Li-Fi-Net.....	115
3.3.1. Ámbito de aplicación.....	115
3.3.2. Descripción del prototipo.....	116
3.3.3. Esquema de transmisión.....	117
3.3.4. Normas de certificación.....	117
Capítulo 4. Ajuste y conexión del prototipo Li-Fi de alta velocidad.....	118
4. Arquitectura y conexión del prototipo Li-Fi Net.....	118
4.1. Arquitectura VLC.....	118
4.2. Arquitectura Li-Fi Net.....	121
4.2.1. Protocolos utilizados en Li-Fi Net.....	122

4.2.2. Funcionamiento de la capa física.....	122
4.2.3. Estructura capa MAC prototipo Li-Fi Net.....	125
4.2.4. Estructura de trama PPDU.....	125
4.3. Conexión del equipo prototipo Li-Fi Net.....	126
Capítulo 5. Construcción de un sistema de comunicación Li-Fi que no genere saturación	129
5. Análisis de tráfico y saturación en Li-Fi Net.....	129
5.1. Tráfico local en Li-Fi Net.....	129
5.2. Tráfico Li-Fi Net en internet.....	134
5.3. Análisis de saturación en prototipo Li-Fi Net.....	137
Capítulo 6. Evaluación preliminar del prototipo a partir de la transmisión de datos.....	145
6. Análisis de transmisión inalámbrica en red ADSL.....	145
6.1. Requisitos de ancho de banda.....	146
6.1.1. Medición de velocidad de Internet downstream vs. upstream.....	147
6.1.2. Conexión inalámbrica Wi-Fi a la red ADSL.....	149
6.2. Análisis del prototipo a partir de la transmisión de datos.....	153
6.3. Análisis comparativo tecnología Wi-Fi.....	157
6.3.1. Seguridad y confiabilidad.....	157
6.3.2. Velocidad y alcance.....	159
6.3.3. Interferencia y ruido.....	160
6.3.4. Impacto ecológico y salud.....	164
6.3.5. Madurez en el mercado.....	165
6.4. Análisis comparativo tecnología Li-Fi.....	166
6.4.1. Seguridad y confiabilidad.....	166
6.4.2. Velocidad y alcance.....	167
6.4.3. Potencia de transmisión y recepción.....	169

6.4.4. Impacto ecológico y salud.	169
6.4.5. Madurez de mercado.	170
6.5. Resultado del análisis comparativo.	171
7. Conclusiones y Recomendaciones.	174
7.1. Conclusiones.	174
7.2. Recomendaciones.	175
Bibliografía.	176
Anexo a. Características técnicas prototipo Li-Fi lámpara led.	178
Anexo b. Características técnicas android tablet Li-Fi ready.	179
Anexo c. SDK Li-Fi beacon biblioteca.	180
Anexo d. Li-Fi dongle extra para usar con el Smartphone.	181
Anexo e. Modo de funcionamiento prototipo Li-Fi lámpara led.	182
Anexo f. Características técnicas prototipo Li-Fi NET.	183
Anexo g. Características mecánicas prototipo Li-Fi NET.	184
Anexo h. Diagrama prototipo Li-Fi NET.	185

Lista de figuras

Figura 1. Onda electromagnética	17
Figura 2. El espectro electromagnético y sus usos para comunicación	18
Figura 3. (a) En las bandas VLF, LF y MF (b) En la banda HF	20
Figura 4. Espectro de luz visible.....	27
Figura 5. Red inalámbrica utilizando VLC.....	28
Figura 6. Red de comunicación inalámbrica basado en retro reflector.....	30
Figura 7. Sistema de transmisión inalámbrica Li-Fi.....	33
Figura 8. Bombilla con chip emisor de ondas Li-Fi	34
Figura 9. Simbología y aspecto básico del led.....	39
Figura 10. Polarización de un diodo emisor de luz.....	40
Figura 11. Distribución espectral de la radiación de un LED.....	41
Figura 12. Dispositivo que aprovecha los efectos de la luz sobre el semiconductor	44
Figura 13. Bolómetro detector de materia oscura.....	46
Figura 14. Sensor de luz de una corriente (inversa) en función de la luminosidad	47
Figura 15. Corriente amplificada en función de la luminosidad que recibe	48
Figura 16. Diodo PIN.....	49
Figura 17. Construcción básica de un fotodiodo avalancha APD	50
Figura 18. Estructura básica del diodo laser	51
Figura 19. Compatibilidad dentro de un área de servicio	53

Figura 20. Componentes VLC que incluyen compatibilidad.....	54
Figura 21. Compatibilidad con el proveedor VLC	55
Figura 22. . Topología estándar IEEE 802.15.7.....	57
Figura 23. Topología peer to peer.....	57
Figura 24. Topología estrella	58
Figura 25. Topología lógica broadcast.....	59
Figura 26. Capas del modelo OSI.....	60
Figura 27. Transporte unidireccional de ANSI E1.11 (DMX512-A).....	64
Figura 28. Modelos de Iluminación led Zhaga	65
Figura 29. Modelo PHY I estándar IEEE 802.15.7	67
Figura 30. Modelo PHY II estándar IEEE 802.15.7	69
Figura 31. Modelo PHY III estándar IEEE 802.15.7.....	72
Figura 32. Principio de modulación variable por posición de impulso VPPM	74
Figura 33. Motor de luz led con sistema de comunicación de la luz visible	78
Figura 34. OOK con diferentes porcentajes de atenuación, donde la información codificada es "1 0 1 1".....	83
Figura 35. (PPM) con diferentes porcentajes de regulación, donde la información codificada es "00 10 10 11"	84
Figura 36. . (IPPM) con diferente porcentaje, donde la información codificada es "00 10 10 11"	85
Figura 37. . (VPPM) con diferente porcentaje, donde la información codificada es "0 1 0 0"	86

Figura 38. Modulación Por Índice De Sub-portadora (SIM-OFDM)	94
Figura 39. Transmisión y Recepción con SIM OFDM.....	95
Figura 40. Sistema de educación	98
Figura 41. Aerolíneas.....	98
Figura 42. Difusión de información multimedia.....	99
Figura 43. Control de tráfico.....	100
Figura 44. Hospitales	101
Figura 45. Línea de producción	101
Figura 46. Red de comunicación urbana.....	102
Figura 47. Planta petroquímica.....	103
Figura 48. Proceso de envío y recepción de datos en VLC	105
Figura 49. Diagrama de Bloques Sistema Li-Fi.....	106
Figura 50. Componentes Básicos Del Sistema Prototipo VLC	107
Figura 51. Modulaciones en banda base OOK, PAM, PPM.....	109
Figura 52. Esquema de un sistema Vlc Li-Fi.....	111
Figura 53. Led Lámparas Li-Fi Faro.....	112
Figura 54. Android Tablet Li-Fi Ready	113
Figura 55. Código QR.....	114
Figura 56. Código LR	115
Figura 57. Transceiver Li-Fi - Net.....	116

Figura 58. Esquema transceiver transmisión	117
Figura 59. Arquitectura VLC	119
Figura 60. Topología VLC.....	121
Figura 61. Pila de protocolos VLC	122
Figura 62. Modo de funcionamiento Li-Fi Net.....	123
Figura 63. Arquitectura Li-Fi Internet	124
Figura 64. . Estructura trama PPDU	125
Figura 65. Transmisión Li-Fi en ADSL.....	127
Figura 66. Red inalámbrica Li-Fi.....	128
Figura 67. Red local prototipo Li-Fi Net	130
Figura 68. Información de un paquete.	130
Figura 69. . Protocolo ARP en Li-Fi.....	131
Figura 70. Protocolo ARP request en wireshark.....	133
Figura 71. Protocolo ARP reply en wireshark.....	134
Figura 72. Análisis de tráfico en internet.....	135
Figura 73. Capa Ethernet en Li-Fi	136
Figura 74. Velocidad de descarga.....	137
Figura 75. Diseño de red híbrida.....	138
Figura 76. Enlace thinkbroadband	139
Figura 77. Práctica 1. Wi-Fi.....	141

Figura 78. Práctica 1. Li-Fi.....	141
Figura 79. Práctica 2. Wi-Fi.....	142
Figura 80. Práctica 2. Li-Fi.....	142
Figura 81. Práctica 3. Wi-Fi.....	143
Figura 82. Práctica 3. Li-Fi.....	143
Figura 83. Saturación de red inalámbrica	144
Figura 84. Transmisión inalámbrica con ADSL.....	145
Figura 85. Medición velocidad ADSL.....	148
Figura 86. Versiones inalámbrica Wi-Fi.....	149
Figura 87. Canal Wi-Fi half duplex	150
Figura 88. Medición velocidad Wi-Fi dispositivo (A)	151
Figura 89. Medición velocidad Wi-Fi dispositivo (A) (B)	152
Figura 90. Ángulo de incidencia.....	156
Figura 91. Seguridad inalámbrica Wi-Fi	157
Figura 92. Procesos de encriptación Wi-Fi.....	158
Figura 93. Velocidad y alcance Wi-Fi	160
Figura 94. Diagnostico Acrylic Wi-Fi	162
Figura 95. Potencia de transmisión Wi-Fi	163
Figura 96. Análisis tecnología Wi-Fi.....	171
Figura 97. Análisis tecnología Li-Fi.....	172

Figura 98. Resultados Comparativos	173
Figura 99. Li-Fi dongle	181
Figura 100. . Reader Lr-Code	182
Figura 101. Transceiver transceptor techo	185
Figura 102. Transceiver transceptor portable	185

Lista de tablas

Tabla 1: Análisis comparativo de tecnologías	35
Tabla 2: Comportamiento del modelo PHY I.....	68
Tabla 3: Comportamiento del modelo PHY II.....	70
Tabla 4: Comportamiento del modelo PHY III	73
Tabla 5: Protocolo de transmisión por conexión de cable para luz visible.....	75
Tabla 6: Características técnicas prototipo Li-Fi Net	183
Tabla 7: Especificacion Entarda / Salida Transceiver Li-Fi Net	183
Tabla 8: Especificación mecánica Transceiver Li-Fi Net.....	184

Capítulo 1. Introducción

1. Presentación del trabajo

Las comunicaciones inalámbricas se han convertido en un servicio público como la electricidad y el agua, los usan cada día, ahora en sus vidas cotidianas, es por esta importancia que se realiza un estudio para abordando los problemas que tiene esta tecnología, siendo tan fundamental para sus vidas (PureLifi Ltda, 2014).

Inalámbrico hace referencia a la tecnología sin cables que permite conectar dispositivos entre sí para formar una red, con la utilización del aire como medio de transmisión de la información la propagación de ondas electromagnéticas deja al descubierto nuevo riesgos de seguridad (Oledcomm, 2015). Si estas ondas de radio salen del recinto donde está instalada la red inalámbrica, sus datos quedarán expuestos ante cualquier persona.

La forma en que se transmite datos inalámbricos es mediante ondas electromagnéticas; en concreto, ondas de radio y las ondas de radio son limitadas, escasas y caras y se dispone solo cierto espacio dentro de ellas (PureLifi Ltda, 2014) . En la actualidad existe 1,4 millones de antenas de transmisión celular, o estaciones base que consumen un montón de energía, y lo que es más, la mayoría de esta energía no es utilizada para transmitir las ondas de radio se usan para enfriar las estaciones base, así que la eficiencia de una estación base es solo alrededor de un 5% y eso crea un gran problema.

Se dispone de 14.000 millones de focos incandescentes, de luces y la luz es parte del espectro electromagnético, lo único que se requiere es reemplazar esos ineficientes focos incandescentes, lámparas fluorescentes con esta nueva tecnología LED (PureLifi Ltda, 2014). Un LED es un semiconductor, es un dispositivo electrónico que tiene una hermosa y linda

propiedad, su intensidad puede ser modulada a velocidades muy altas y pueden ser apagadas a velocidades muy altas y esta es una propiedad básica fundamental que aprovechamos para la transmisión de datos en esta nueva tecnología (Americalifi, 2014).

Así que se indica cómo se logra esta comunicación, el vecino más cercano al espectro de luz visible, los controles remotos; todos ustedes conocen los controles remotos que tienen un LED infrarrojo, básicamente se enciende el LED, o se apaga y eso crea un flujo de datos sencillo y de baja velocidad a penas 10.000 bits por segundo, esta velocidad no es útil para reproducir un video en línea (Sisoft, 2014). Lo que se propone es desarrollar una tecnología con la cual permita transmitir miles de flujos de datos en paralelo a velocidades aún más altas, esta tecnología se llama SIM OFDM y es esta forma de modulación se habilito para transmitir datos en una fuente de luz (PureLifi Ltda, 2014).

La luz es la que puede transmitir un video de alta definición en un flujo dividido, y si se observa la luz, esta iluminación no lo notan sus ojos, no podrán distinguir los cambios sutiles de la amplitud que le imprime el foco, por lo tanto sirve para iluminar, pero al mismo tiempo transmite datos, incluso si existe alguna luz que venga del techo hacia el receptor puede ignorar esa luz constante ya que todo lo que le interesa es el receptor (Sisoft, 2014). Se preguntaran si es necesario entonces tener una luz encendida durante todo el tiempo para que esto funcione y la respuesta es sí, con la ventaja que se puede atenuar la luz a un nivel en el que aparenta estar apagada y aun así es posible transmitir datos.

Esta nueva forma de transmitir datos se encuentra en pleno desarrollo motivo por el cual la información y prototipos en funcionamiento son escasos, siendo de vital importancia presentar trabajos relacionados en comunicación inalámbrica mediante luz visible.

1.1. Antecedentes

El desarrollo de las telecomunicaciones ha dado un cambio de dirección en los últimos años, estableciendo velocidades de conexión y acceso a información de forma más expedita. Muchos sistemas basados en cable (xDSL, fibra óptica o cable coaxial) que llegan hasta el usuario para ofrecer conectividad a Internet mantienen un costo de instalación alto (Carballeiro, 2012).

Teniendo en mente las limitaciones topográficas y tecnológicas, se han buscado alternativas de conexión en las que la transferencia de información no dependa de un medio físico como el cable. De esta manera, al no utilizar cables, el tiempo necesario para desplegar la tecnología y los servicios asociados se reduce en forma considerable (Carballeiro, 2012).

El primer sistema LAN inalámbrico data de 1986. Eran lentos y propietarios, toda la infraestructura de radio tenía que ser suministrada por el mismo fabricante. En 1993 aparecieron sistemas de mayor capacidad que funcionaban en la banda 2,4 Ghz. el IEEE aprobó la norma 802.11 en julio de 1997 (Villegas & Araguez, 2010). En ella se especificaba el funcionamiento de LANs inalámbricas de 1 y 2 Mb/s en la banda de 2,4 Ghz (Wi-Fi) y mediante infrarrojos.

El término “inalámbrico” hace referencia a la tecnología sin cables que permite conectar varias máquinas o dispositivos entre sí (Villegas & Araguez, 2010). Con esta problemática planteada, nacieron y se desarrollaron los estándares inalámbricos IEEE802.11 (conocidos como Wi-Fi), que constituyen una alternativa a los medios convencionales con los que se accedía al servicio. La norma IEEE 802.11 fue diseñada para sustituir el equivalente a las capas físicas y MAC de la norma 802.3 (Ethernet). Esto quiere decir que en el único que se

diferencia una red Wi-Fi de una red Ethernet es en cómo se transmiten las tramas o paquetes de datos; el resto es idéntico. Por lo tanto una red local inalámbrica 802.11 es completamente compatible con todos los servicios de redes locales (LAN) de cable 802.3 (Ethernet).

Estas nuevas redes que no requieren cables para intercambiar información surgen de la necesidad que tiene el usuario de aumentar su movilidad sin tener que modificar su esquema de red actual. De esta manera, se evita tener que realizar tendidos de cables en edificios o casas particulares (Carballeiro, 2012). En el entorno de la comunicación se ha dado un salto enorme al implementar las redes inalámbricas, simplemente por el ahorro de tiempo en su instalación y una reducción muy importante en sus costes. Se han convertido en equipos cada vez más fáciles de administrar, pero el enorme crecimiento de los sistemas de computadores y sus interconexiones mediante redes inalámbricas ha hecho que organizaciones e individuos dependan cada vez más de la información que se almacena y se transmite a través de estos sistemas (Stallings, 2004). Esto a su vez ha llevado a un aumento de la conciencia de la necesidad de proteger los datos y los recursos ya que las redes inalámbricas que actualmente se encuentran en funcionamiento poseen características que le permiten atravesar paredes, barreras físicas, etc.

El disponer de un segmento de red Wireless en nuestra LAN en estos momentos es una necesidad más que una opción. Sin embargo no son pocos los problemas que tienen que afrontar esta tecnología, como por ejemplo el aumento del ancho de banda que proporcionan así como la seguridad (Stallings, 2004).

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas (Villegas & Araguez, 2010). Las ondas electromagnéticas se agrupan bajo distintas denominaciones según su rango de frecuencia, aunque no existe un límite muy preciso para cada grupo, así en este espectro electromagnético podemos encontrar la luz

visible que es una clase de energía electromagnética radiante capaz de ser percibida por el ojo humano que será básicamente la que utilizaremos en nuestra investigación.

Las redes inalámbricas funcionan utilizando el medio radio eléctrico en la banda 2,4 Ghz, esta banda de frecuencia no requiere de licencia administrativa para ser utilizada por lo que muchos equipos del mercado como teléfonos inalámbricos, microondas utilizan esta misma banda de frecuencia. Además todas las redes Wi-Fi funcionan en la misma banda de frecuencia incluida la de los vecinos.

Este hecho hace que no se tenga la garantía de nuestro entorno radioeléctrico este completamente limpio para que nuestra red inalámbrica funcione a su más alto rendimiento por lo tanto cuando mayor sean las interferencias producidas por otros equipos, menor será el rendimiento de nuestra red (Villegas & Araguez, 2010).

La señalización óptica sin guías, también conocida como óptica de espacio libre, se ha utilizado durante siglos. Paul Reveré utilizó señalización óptica binaria desde la vieja iglesia del norte justo antes de su famoso viaje. Una aplicación más moderna es conectar las redes LAN de dos edificios mediante láser montados en sus azoteas. La señalización óptica mediante láser es de naturaleza unidireccional, por lo que cada extremo necesita su propio láser y su propio foto detector. Este esquema ofrece un ancho de banda muy alto a un costo muy bajo, además de ser relativamente seguro debido a que es difícil intervenir un haz tan estrecho. También es relativamente fácil de instalar a diferencia de las microondas, no requiere una licencia de la FCC (Tanenbaum, 2003).

La ventaja del láser, un haz muy estrecho, siendo también su debilidad para apuntar un rayo láser de 1 mm de anchura a un blanco del tamaño de la punta de un alfiler a 500

metros de distancia se requiere una buena puntería. Por lo general se añaden lentes al sistema para desenfocar ligeramente el rayo, para dificultar aún más las cosas los cambios en el viento y la temperatura pueden distorsionar el rayo, además de que los rayos láser no pueden penetrar la lluvia o la niebla densa, aunque por lo general funcionan bien en días soleados (Tanenbaum, 2003) .

La comunicación óptica sin guía puede parecer una tecnología de redes exótica en la actualidad, pero pronto puede llegar a ser más frecuente. En todas partes existen cámaras (que detectan la luz) y pantallas (que emiten luz mediante el uso de LED y otras tecnologías). La comunicación de datos se puede disponer en capas encima de estas pantallas si se codifica la información en el patrón que hace que los LED se enciendan y apaguen, y que está por debajo del umbral de la percepción humana. Esta forma de comunicarse con luz visible es segura por naturaleza, además de que crea una red de baja velocidad en los alrededores inmediatos de la pantalla (Americalifi, 2014). Esto podría permitir todo tipo de escenarios computacionales elegantes y ubicuos. Las luces destellantes en los vehículos de emergencia podrían alertar a los semáforos cercanos ya los vehículos para ayudar a dejar libre el camino (Sisoft, 2014). Los anuncios informativos podría difundir mapas, incluso las luces de las festividades podrían difundir canciones sincronizadas con su pantalla.

1.2. Justificación

Se entiende que el espectro de radio frecuencia se está quedando sin espacio y al utilizar esta tecnología el problema de capacidad quedaría solucionado ya que tendríamos 10.000 veces más espectro y 10.000 veces más LED´s instalados en la infraestructura existente (PureLifi Ltda, 2014). El presupuesto para instalar el medio de transmisión de datos no tendría costo, la

energía sería altamente eficiente si todo el mundo instalara focos LED, nos ahorraríamos cientos de plantas de energía. En el caso de la disponibilidad están de acuerdo que tenemos luces en hospitales, en los aviones; así que por todo lado hay luz incluyendo los teléfonos inteligentes disponen de flash, y luego está la seguridad al no cruzar la luz por las paredes nadie al otro lado de la sala del lugar de transmisión sería capaz de leer esos datos (Americalfi, 2014).

Así que se examina esto en el contexto del espectro electromagnético completo, donde existe los rayos “*gamma*” que no conviene estar cerca ya que puede ser peligrosos, los rayos “*x*” son utilizados en los hospitales, luego está la luz ultra-violeta útil para un buen bronceado pero también peligrosa para el cuerpo humano. Los “infrarrojos” debido a regulaciones de seguridad visual solo pueden usarse a intensidades bajas (Tanenbaum, 2003). Y luego tenemos las “*ondas de radio*”, en la mitad, se encuentra este espectro de “*luz visible*” es luz que ha existido por muchos millones de años, así que su uso es intrínsecamente seguro, no sería grandioso utilizar este espectro para comunicaciones inalámbricas, y no solo con eso si la comparamos con el espectro completo y el espectro de ondas de radio, el tamaño del mismo con el tamaño del espectro de la luz visible tenemos un espectro 10.000 veces más amplio para vuestra disposición, y no tienen solo este espectro enorme, se compara con el número que se acaba de mencionar y tenemos 1,4 millones de estaciones base de radio celular ineficientes y caras de instalar y multipliquen eso por 10.000 el resultado es 14.000 millones de focos ya instalados así que ahí está la infraestructura, mirando al techo se observa todos esos focos que podrían remplazarse para comunicaciones (PureLifi Ltda, 2014).

Existe otro problema que todos son conscientes, hay que apagar el teléfono móvil, durante los vuelos, en hospitales, la seguridad es otro problema, las ondas de radio penetran las paredes pueden ser interceptadas y alguien puede hacer uso de tu red si tiene malas intenciones

(Oledcomm, 2015) . Las aplicaciones de este proyecto superan lo imaginable, tan solo es necesario analizar donde hay luz y existirá una forma potencial de transmitir datos, pudiendo darles unos cuantos ejemplos:

- Es útil en los vehículos a control remoto suboceánico el cual utiliza una luz para iluminar el espacio en las profundidades del mar, siendo esta luz utilizada para transmitir datos inalámbricos (Americalifi, 2014).
- Ambientes intrínsecamente seguros como una planta petroquímica en la cual no es posible utilizar frecuencias de radio, que pueden generar chispas en las antenas
- En los hospitales para nuevos instrumentos médicos (Sisoft, 2014).
- En calles para el control de tráfico en los cuales los autos pueden tener focos LED adelante y atrás permitiendo comunicarse entre ellos logrando prevenir los accidentes con la forma en que intercambian información (Oledcomm, 2015).
- Las miles de lámparas instaladas en las calles de todo el mundo, y cada lámpara pública puede ser un punto de acceso gratuito (PureLifi Ltda, 2014).
- Las cabinas de los vehículos aéreos, existen cientos de luces en las cabinas de un avión, y cada una de esas luces es un transmisor de datos inalámbrico en potencia, logrando disfrutar de un video en el viaje de regreso a casa (Sisoft, 2014).

Solo es necesario colocar un microchip a cada dispositivo de iluminación y esto combinaría dos funcionalidades básicas, la iluminación y transmisión de datos y es esta simbiosis la cual podría resolver los problemas principales que enfrentamos hoy en día en las comunicaciones inalámbricas, y en el futuro quizá no tengamos 14.000 millones de focos incandescentes sino quizá sean 14.000 millones de Li-Fi instaladas en todo el mundo por un futuro limpio, ecológico e incluso más brillante (PureLifi Ltda, 2014).

1.3. Objetivo general

Implementar un sistema prototipo de red inalámbrica de transmisión de datos a través de iluminación que emite una bombilla eléctrica, utilizando tecnología Li-Fi.

1.4. Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte respecto a las comunicaciones inalámbricas a través de luz visible (VCL) que mejor se ajusten para la consecución del proyecto.
- Ajustar y probar una conexión mediante un equipamiento basado en luces intermitentes que emitan guiños de luz a una gran velocidad, imperceptible al ojo humano.
- Construir un sistema de comunicaciones inalámbricas que al aumentar el número de conexiones no genere ninguna saturación.
- Realizar una evaluación preliminar del prototipo a partir de la transmisión de datos.

Capítulo 2. Estado del arte

2. Redes inalámbricas

Las redes inalámbricas Wireless “*Wireless Network*” son redes sin cable que se suelen comunicar por medios no guiados a través de ondas electromagnéticas. La transmisión y la recepción se efectúan a través de antenas. Normalmente el emisor tiene una sola antena, pero puede tener varias, ya que existen sistemas que emplean dos, tres e incluso cuatro antenas. (Gomez, 2009). Unas antenas se usan para la emisión, otras para la recepción, pero en muchas ocasiones la misma antena permite actuar de ambos modos. También se trabaja con antenas intermedias alcanzando distancias de pocos metros o repetidoras alcanzando decenas de kilómetros.

Las redes inalámbricas no solo se emplean para realizar conexiones de datos, con frecuencia se utilizan para emitir señales de televisión, en telefonía, sensores, domótica, frigoríficos que hacen la compra, lavadoras programables, etc. (Gomez, 2009).

2.1. Reseña histórica

El origen de las LAN inalámbricas se remonta a la publicación en 1979 de los resultados de un experimento realizado por ingenieros de IBM en Suiza, consistía en utilizar enlaces infrarrojos para crear una red local, este resultado publicado en el volumen 67 de los Procedimientos en la IEEE puede considerarse como el punto de partida en la línea evolutiva de esta tecnología (Villegas & Araguez, 2010).

Las investigaciones siguieron tanto con infrarrojos como con microondas, donde se utilizaba el esquema de “*Spread-Spectrum*” frecuencias altas, siempre a nivel de laboratorio.

En mayo de 1985, y tras cuatro años de estudio, el FCC “*Federal Communications Commission*”, la agencia federal del Gobierno de Estados Unidos encargada de regular y administrar en materia de telecomunicaciones, asignó las bandas IMS “*Industrial Scientific and Medical*” para uso comercial sin licencia 902-928 MHz, 2,400-2,4835 GHz, 5,725-5,850 GHz a las redes inalámbricas basadas en “*Spread-Spectrum*” (Gomez, 2009).

La asignación de una banda de frecuencia propició una mayor actividad en el seno de la industria, ese respaldo hizo que las WLAN empezara a dejar ya el laboratorio para iniciar el camino hacia el mercado. Desde 1985 hasta 1990 se siguió trabajando ya más en la fase de desarrollo, hasta que en mayo de 1991 se publicaron varios trabajos referentes a WLAN operativos que superaban la velocidad de 1 Mbps, el mínimo establecido por el IEEE 802 para que la red sea considerada realmente una LAN (Carballeiro, 2012).

2.1.1. Proceso de estandarización.

El proceso de estandarización siguió dos líneas diferentes una por el IEEE “*Institute of Electrical and Electronics Engineers*” y otra que asumió su desarrollo fue la ITSI “*European telecommunications Standards Institute*”.

Desde el IEEE surgió el conjunto de estándares IEEE 802.11 como apuesta para las redes WLAN. Así, en 1990, en el seno del IEEE 802, se formó el comité IEEE 802.11, que comenzó a trabajar en la elaboración de una norma para las redes WLAN. No es hasta 1994 cuando aparece el primer borrador (Gomez, 2009). El primer estándar conocido como IEEE 802.11 fue ratificado en 1997, pero el verdadero impulso de las redes WLAN vino cuando el estándar IEEE 802.11b fue aprobado en el año 1999.

Por su parte, en Europa el ETSI trabajo en la familia de estándares HIPERLAN. Así, en 1992 el ETSI, a través del comité ETSI-RES 10, inicia actuaciones para crear un estándar al que denomina HiperLAN. La primera versión del estándar, conocido como HiperLAN/1 fue aprobado en el año de 1996 (Villegas & Araguez, 2010). La siguiente versión de estándar se aprobó en el año 2000 y es conocido como HiperLAN/2.

Desde la aprobación en 1999 del estándar IEEE 802.11b, los estándares de la familia IEEE 802.11 comenzaron a proliferar. Estos estándares han sido desarrollados en múltiples productos comerciales, convirtiendo a la familia IEEE 802.11 en el estándar de facto para las aplicaciones WLAN en detrimento del estándar HiperLAN del ETSI. Actualmente la familia IEEE 802.11 es empleada a nivel mundial para el despliegue de redes WLAN (Gomez, 2009).

2.1.2. Características de las redes inalámbricas.

Las redes inalámbricas se diferencian de las redes cableadas, en la naturaleza del medio que emplean para transmitir sus datos, utilizan como medio de transmisión el aire, sin necesidad de tendido de cable. Se distinguen distintas tecnologías inalámbricas en función del área de cobertura de la red, como ejemplo tenemos que considerar locales o de área no extensa como: oficinas, empresas, universidades, hoteles, centros de congreso, aeropuertos, etc.

La familia de estándares de redes IEEE802.11 ha sido la causa de la incorporación y del desarrollo rápido de las redes inalámbricas en el mercado (Pellejero , Andreu, & Lesta, 2006), lo que ha permitido que los usuarios de estas redes tengan las siguientes ventajas:

Movilidad y mayor productividad. Permite el acceso a la información de forma rápida en cualquier lugar de la organización o empresa para todo usuario de la red. Esta

movilidad permite el aumento de la productividad y ofrece oportunidades de servicios no proporcionados por las redes de cableadas (Pellejero , Andreu, & Lesta, 2006).

Flexibilidad. Permite llegar donde el cable no puede. Las redes inalámbricas aportan a la organización flexibilidad para que sus empleados trabajen en edificios diferentes y en lugares de difícil cableado (Gomez, 2009).

Escalabilidad. El cambio de topología de red es sencillo, pudiéndose ampliar o mejorar con gran facilidad una red existente (Villegas & Araguez, 2010).

Reducción de costes. La instalación de una red inalámbrica es mucho más barata que la cableada cuando mayor sea la superficie a cubrir, y permite un periodo de amortización más corto. Pudiendo ahorrar costes de red relacionados con la ampliación, movilidad y cambios de ubicación (Pellejero , Andreu, & Lesta, 2006).

Facilidad de instalación. Evita obras para tirar cable por muros, suelos y techos, como en la red de hogar donde se utiliza la red inalámbrica para compartir el acceso a la banda ancha a Internet desde los múltiples ordenadores o dispositivos que hay en el hogar sin necesidad de cableado.

2.1.3. Modos de operación.

Cuando pensamos en los modos de operación de las redes inalámbricas y refiriéndonos a los estándares 802.11, podemos definir dos modos fundamentales:

Modo ad hoc. El cual los únicos elementos necesarios para conformar la red son dispositivos móviles que tengan placas inalámbricas.

Modo infraestructura. Se utiliza conceptos de celda similar al implementado en las redes telefónicas celular (Salveti, 2011). Debemos tener presente que estos modos no siempre se ven reflejados en la topología, así un enlace que vincule dos puntos distantes llamado enlace “*punto a punto*” puede implementarse en modo ad hoc o infraestructura y nosotros podríamos pensar como una red estrella conformada por conexiones ad hoc. De esta forma, el modo sería la configuración de la placa de red inalámbrica en un nodo y no una característica de toda la red (Salveti, 2011) .

2.1.4. Seguridad en la red.

Para analizar de forma efectiva las necesidades de seguridad de una organización y evaluar y elegir distintos productos y políticas de seguridad, el responsable de la seguridad necesita una forma sistemática de definir los requisitos de seguridad y caracterizar los enfoques para satisfacer dichos requisitos. Esto es bastante difícil en un entorno centralizado de procesamiento de datos, y con el uso de redes de área local y de área ancha, los problemas se agravan. La recomendación X.800 de la ITU-T2, arquitectura de seguridad OSI, define este enfoque sistemático. La arquitectura de seguridad OSI es útil a los administradores de red para organizar la tarea de proporcionar seguridad. Además, debido a que esta arquitectura fue desarrollada como un estándar internacional, los vendedores han desarrollado características de seguridad para sus productos y servicios conforme a esta definición estructurada de servicios y mecanismos.

Para nuestros propósitos, la arquitectura de seguridad OSI proporciona una visión general útil, aunque abstracta. La arquitectura de seguridad OSI se centra en los ataques a la seguridad, los mecanismos y los servicios (Stallings, 2004).

Una forma útil de clasificar los ataques a la seguridad, empleada en la recomendación X.800 y RFC 2828, es la distinción entre ataques pasivos y ataques activos. Un ataque pasivo intenta conocer o hacer uso de información del sistema, pero no afecta a los recursos del mismo. Un ataque activo, por el contrario, intenta alterar los recursos del sistema o afectar a su funcionamiento (Stallings, 2004).

2.2. Transmisión inalámbrica

Nuestra Era ha dado origen a los adictos a la información personas que necesitan estar todo el tiempo en línea. Para estos usuarios móviles no son de utilidad el par trenzado, el cable coaxial ni la fibra óptica. Necesitan obtener datos para sus computadoras laptop, notebook, de bolsillo, de mano o de reloj de pulsera sin tener que estar atados a la infraestructura de comunicación terrestre. Para estos usuarios, la comunicación inalámbrica es la respuesta (Tanenbaum, 2003).

2.2.1. Ondas electromagnéticas.

Una onda electromagnética es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio. Son ondas producidas por el movimiento de una carga eléctrica. Son disturbios ondulatorios que se repiten en una distancia determinada llamada longitud de onda. A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio físico para propagarse, se propagan libremente por el aire alcanzando velocidades de 300,000 Km/s (Villegas & Araguez, 2010).

Las ondas electromagnéticas forman parte de nuestra vida como la luz, microondas, rayos- x como las transmisiones de radio y televisión.

2.2.2. Componentes de una onda.

Las ondas electromagnéticas están compuestas por las siguientes partes:

Amplitud. Es la distancia máxima vertical entre la base y la onda. Las unidades de amplitud dependen del tipo de onda. En las ondas electromagnéticas la amplitud del campo eléctrico está expresado en metros. La amplitud puede ser constante como se podemos observar en la figura 1 o puede variar en el tiempo y/o posición. La forma de la variación de amplitud es llamada la envolvente de la onda (Villegas & Araguez, 2010).

Periodo. Es el tiempo para un ciclo completo de oscilación de la onda.

Frecuencia. Se refiere a cuantos periodos por unidad de tiempo (segundos) se repite la onda y es medida en Hertz (Tanenbaum, 2003).

La frecuencia y el periodo de una onda son recíprocas entre sí y están representados por la siguiente fórmula:

$$f = \frac{1}{T}$$

2.2.3. Longitud de onda.

La longitud de onda descrita gráficamente diríamos que representa la distancia entre dos montes o valles seguidos, suelen medirse en metros, a menor frecuencia mayor longitud de onda, esto es mayor alcance las de mayor longitud de onda nos traspasan, atraviesan obstáculos, pero tienen bajas velocidades por el contrario o menor frecuencia menor longitud de onda, mayor velocidad, menor alcance y no atraviesan obstáculos a grandes distancias (Villegas & Araguez, 2010).

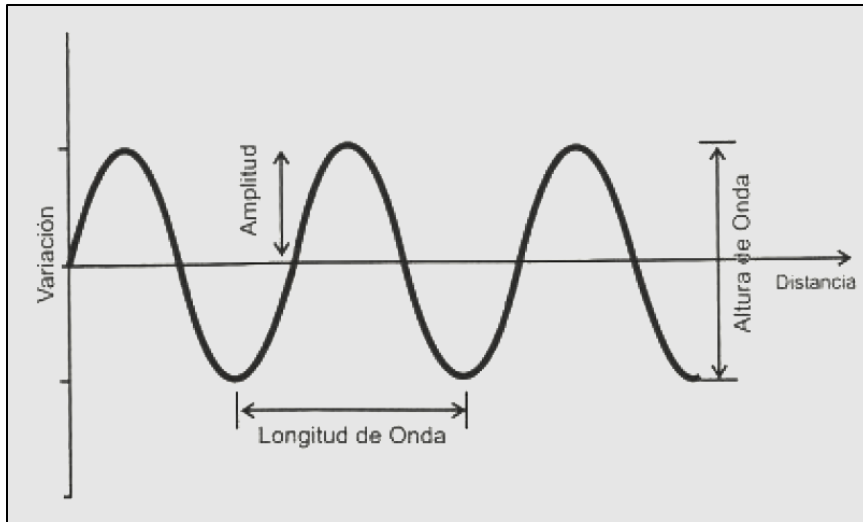


Figura 1. Onda electromagnética

Fuente: Villegas & Araguez, 2010.

2.2.4. El espectro electromagnético.

Para generar una formación de ondas electromagnéticas es necesario que se produzca movimientos de los electrones logrando con esto la propagación de dichas ondas en el espacio (incluso en el vacío). El físico inglés “*James Clerk Maxwell*” predijo estas ondas en 1865 y el físico alemán “*Heinrich Hertz*” las observó por primera vez en 1887.

El número de oscilaciones por segundo de una onda es su frecuencia f , y se mide en Hz en honor de “*Heinrich Hertz*”. La distancia entre dos máximos o mínimos consecutivos se llama longitud de onda y se designa en forma universal mediante la letra griega λ “*lambda*” (Tanenbaum, 2003).

Si conectamos a un circuito eléctrico una antena del tamaño apropiado, se puede transmitir de forma eficiente las ondas electromagnéticas y el receptor puede recibir de forma eficiente a cierta distancia, en el vacío las ondas electromagnéticas viajan a una misma velocidad sin importar su frecuencia.

Las porciones de radio, microondas, infrarrojo y luz visible del espectro que se pueden utilizar para transmitir información mediante la modulación de la amplitud, frecuencia o fase de las ondas. La luz ultravioleta, los rayos x y los rayos gamma serían todavía mejores, debido a sus frecuencias más altas, pero son difíciles de producir y de modular, no se propagan bien entre edificios y son peligrosos para los seres vivos. Las bandas que se listan en la parte inferior de la figura 2 son los nombres oficiales de la ITU “*Unión Internacional de Telecomunicaciones*” y se basan en las longitudes de onda, por lo que la banda LF va de 1 a 10 km (aproximadamente de 30 a 300 kHz). Los términos LF, MF y HF se refieren a las frecuencias baja, media y alta, respectivamente (Tanenbaum, 2003).

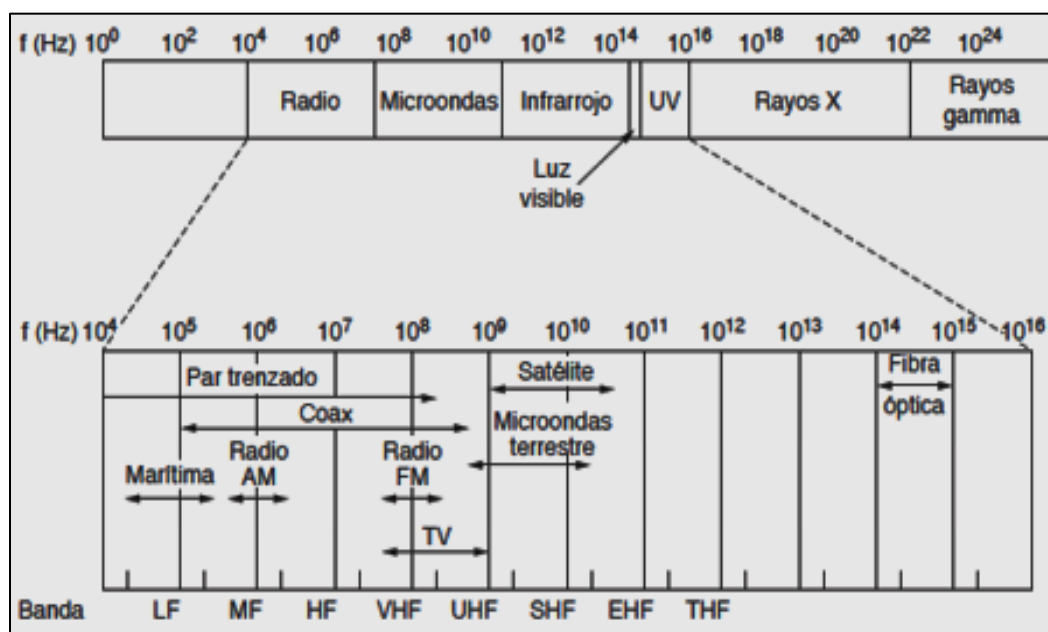


Figura 2. El espectro electromagnético y sus usos para comunicación

Fuente: Tanenbaum, 2003.

Está claro que al asignar los nombres nadie esperaba rebasar los 10 MHz, por lo que las bandas más altas se denominaron después como bandas de muy, ultra, súper, extrema y tremendamente alta frecuencia. Más allá de eso ya no hay nombres, pero podrían sonar bien las designaciones de increíble, asombrosa y prodigiosamente alta frecuencia (IHF, AHF y PHF).

La mayoría de las transmisiones utilizan una banda de frecuencia relativamente estrecha por decir, $\Delta f / f \ll 1$. Concentran sus señales en esta banda estrecha para usar el espectro con eficiencia y obtienen tasas de datos razonables al transmitir con suficiente potencia.

2.2.5. Radiotransmisión.

Las ondas de radio frecuencia RF son fáciles de generar, pueden recorrer distancias largas y penetrar edificios con facilidad, de modo que son muy utilizados en la comunicación, tanto en interiores como en exteriores. Las ondas de radio también son omnidireccionales, lo cual significa que viajan en todas direcciones desde la fuente, por lo que el transmisor y el receptor no tienen que estar alineados físicamente (Tanenbaum, 2003).

Las propiedades de las ondas de radio dependen de la frecuencia. A bajas frecuencias, las ondas de radio cruzan bien los obstáculos, pero la potencia se reduce drásticamente a medida que se aleja de la fuente (por lo menos tan rápido como $1/r^2$ en el aire). A esta atenuación se le conoce como pérdida de trayectoria. A frecuencias altas, las ondas de radio tienden a viajar en línea recta y rebotan en los obstáculos. La pérdida de trayectoria reduce aún más la potencia, aunque la señal recibida también puede depender en gran parte de las reflexiones. Las ondas de radio de alta frecuencia también son absorbidas por la lluvia y otros obstáculos en mayor grado que las de baja frecuencia (Tanenbaum, 2003). En todas las frecuencias las ondas de radio están sujetas a interferencia de los motores y demás equipos eléctricos.

En las bandas VLF, LF y MF las ondas de radio siguen la curvatura de la Tierra, como se indica en la figura 3 estas ondas se pueden detectar quizás a 1000 km en las frecuencias más bajas, y a menos distancia en las frecuencias más altas. La difusión de radio AM utiliza la

banda MF; por esta razón las ondas terrestres de las estaciones de radio AM de Boston no se pueden escuchar con facilidad en Nueva York. Las ondas de radio en estas bandas pasan por los edificios fácilmente, razón por la cual los radios portátiles funcionan en interiores (Tanenbaum, 2003). El principal problema al usar estas bandas para la comunicación de datos es su bajo ancho de banda.

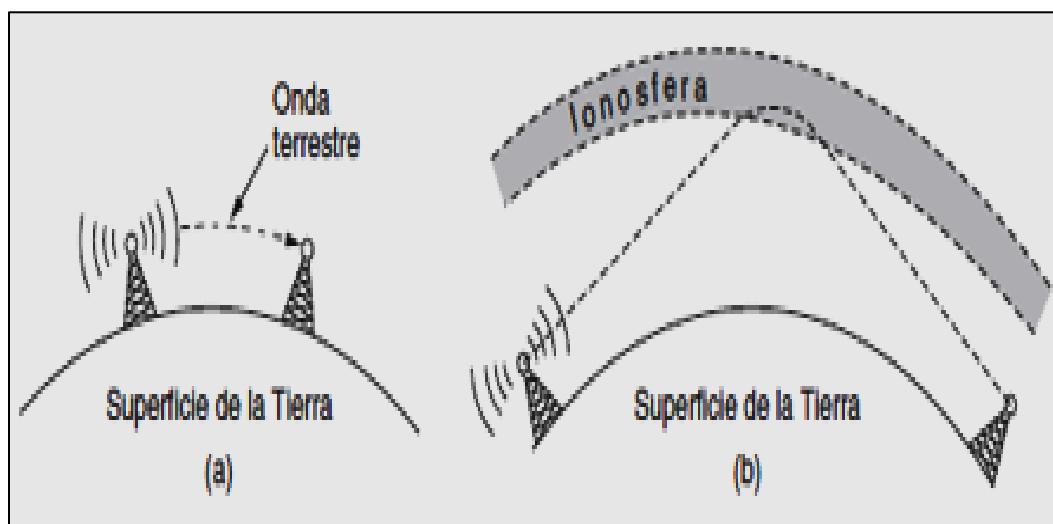


Figura 3. (a) En las bandas VLF, LF y MF (b) En la banda HF

Fuente: Tanenbaum, 2003.

En las bandas HF y VHF, las ondas terrestres tienden a ser absorbidas por la tierra. Sin embargo, las ondas que llegan a la ionosfera, una capa de partículas cargadas que rodean la tierra a una altura de 100 a 500 km se refractan y se envían de vuelta a nuestro planeta, como se muestra en la figura 3 (b) (Tanenbaum, 2003).

Bajo ciertas condiciones atmosféricas, las señales pueden rebotar varias veces. Los operadores de las bandas de radio aficionados utilizan estas bandas para conversar a larga distancia. El ejército también se comunica en las bandas HF y VHF.

2.2.6. Transmisión por microondas.

La comunicación por microondas se utiliza tanto para la comunicación telefónica de larga distancia, los teléfonos móviles, la distribución de la televisión y otros usos, que ha provocado una escasez de espectro, a diferencia de las ondas de radio a frecuencias más bajas, las microondas no pueden atravesar bien los edificios. Además, aun cuando el haz puede estar bien enfocado en el transmisor, hay cierta divergencia en el espacio. Algunas ondas pueden refractarse en las capas atmosféricas más bajas y tardar un poco más en llegar que las ondas directas. Estas ondas retrasadas pueden llegar desfasadas con la onda directa y cancelar así la señal. A este efecto se le llama desvanecimiento por multitrayectorias y representa a menudo un problema grave que depende del clima y de la frecuencia. Algunos operadores mantienen el 10% de sus canales inactivos como repuestos para activarlos cuando el desvanecimiento por multitrayectorias cancela en forma temporal alguna banda de frecuencia (Tanenbaum, 2003).

La creciente demanda de espectro obliga a los operadores a usar frecuencias aún más altas. Ahora las bandas de hasta 10 GHz son de uso rutinario, pero con las de casi 4 GHz se presenta un nuevo problema: la absorción por el agua. Estas ondas tienen sólo unos centímetros de longitud y la lluvia las absorbe. Este efecto sería benéfico si quisiéramos construir un enorme horno de microondas para rostizar las aves de paso, pero para la comunicación representa un problema grave. Al igual que con el desvanecimiento por multitrayectorias, la única solución es interrumpir los enlaces afectados por la lluvia y encaminar las señales a su alrededor.

2.2.7. Transmisión infrarroja.

Las ondas infrarrojas no guiadas se usan mucho para la comunicación de corto alcance. El control remoto de los televisores, grabadoras de video y estéreos utilizan

comunicación infrarroja. Son relativamente direccionales, económicos y fáciles de construir, pero tienen un gran inconveniente: no atraviesan objetos sólidos, pruebe pararse entre el control remoto y su televisión, y vea si aún funciona. En general, conforme pasamos de la radio de onda larga hacia la luz visible, las ondas se comportan cada vez más como la luz y cada vez menos como la radio (Tanenbaum, 2003).

Por otro lado, el hecho de que las ondas infrarrojas no atraviesen bien las paredes sólidas también es una ventaja. Esto significa que un sistema infrarrojo en un cuarto de un edificio no interferirá con un sistema similar en cuartos o edificios adyacentes; no podrá controlar la televisión de su vecino con su control remoto. Además, la seguridad de los sistemas infrarrojos contra el espionaje es mejor que la de los sistemas de radio, precisamente por esta razón. Por ende, no se necesita licencia gubernamental para operar un sistema infrarrojo, en contraste con los sistemas de radio, que deben contar con licencia excepto las bandas ISM. La comunicación infrarroja tiene un uso limitado en el escritorio; por ejemplo, para conectar computadoras portátiles e impresoras mediante el estándar IrDA “*Asociación de Datos por Infrarrojo*”, del inglés “*Infrared Data Association*”, aunque no es un protagonista importante en el juego de las comunicaciones (Tanenbaum, 2003).

2.2.8. Transmisión por ondas de luz.

La señalización óptica sin guías, también conocida como óptica de espacio libre, se ha utilizado durante siglos. Paul Reveré utilizó señalización óptica binaria desde la vieja iglesia del norte justo antes de su famoso viaje. Una aplicación más moderna es conectar las redes LAN de dos edificios mediante láser montados en sus azoteas. La señalización óptica mediante láser es de naturaleza unidireccional, por lo que cada extremo necesita su propio láser y

su propio fotodetector. Este esquema ofrece un ancho de banda muy alto a un costo muy bajo, además de ser relativamente seguro debido a que es difícil intervenir un haz tan estrecho.

También es relativamente fácil de instalar y, a diferencia de las microondas, no requiere una licencia de la FCC (Tanenbaum, 2003).

La comunicación óptica sin guía puede parecer una tecnología de redes exótica en la actualidad, pero pronto puede llegar a ser más frecuente. Estamos rodeados por cámaras (que detectan la luz) y pantallas (que emiten luz mediante el uso de LED y otras tecnologías). La comunicación de datos se puede disponer en capas encima de estas pantallas si se codifica la información en el patrón que hace que los LED se enciendan y apaguen, y que está por debajo del umbral de la percepción humana. Esta forma de comunicarse con luz visible es segura por naturaleza, además de que crea una red de baja velocidad en los alrededores inmediatos de la pantalla. Esto podría permitir todo tipo de escenarios computacionales elegantes y ubicuos (Tanenbaum, 2003).

Las luces destellantes en los vehículos de emergencia podrían alertar a los semáforos cercanos ya los vehículos para ayudar a dejar libre el camino. Los anuncios informativos podrían difundir mapas. Incluso las luces de las festividades podrían difundir canciones sincronizadas con su pantalla (Tanenbaum, 2003).

2.2.9. Luz espectro electromagnético.

La luz visible la forma de energía radiante la que son sensibles nuestros ojos y las ondas de radio invisibles que pueden transmitir sonidos e imágenes a través del espacio son muy parecidas las ondas luminosas por ejemplo existen en una gama de energía que percibimos como colores, lo que hace que un color sea diferente de otro no es más que una diferencia de energía y

esto es lo único que hace a la luz diferente de cualquier otra forma de energía radiante, de manera que la luz que ilumina el interior de un horno microondas y la radiación de microondas que calienta el horno para hacer palomitas de maíz son en realidad formas diferentes del mismo fenómeno (Tanenbaum, 2003).

La radiación de microondas y la luz visible son solo unas pequeñas partes de un espectro mucho mayor lo que se llama “*espectro electromagnético*”, pero la luz visible es la única parte de él que son sensibles nuestros ojos, el espectro electromagnético incluye muchas formas de radiación que conocemos, los rayos cósmicos que vienen de alguna parte del espacio, los rayos gamma emitidos por sustancias radiactivas, los rayos x, los rayos ultravioleta invisibles, la luz visible y las invisibles ondas de radio infrarrojas que se emplean en el radar y los hornos de microondas y en los repetidores de microondas y en las emisoras de radio y televisión, todo ello forma parte del espectro electromagnético, aunque se han representado muchos tipos diferentes de radiación (Tanenbaum, 2003).

El hecho es que todas las ondas electromagnéticas son fundamentalmente las mismas, son campos vibratorios eléctricos y magnéticos que existen formando ángulos rectos entre sí y con sus direcciones de movimiento, pero podemos pensar en los dos juntos como una sola onda que puede moverse en el espacio vacío sin necesitar de ningún medio para su transmisión, en el espacio vacío se mueve a una velocidad constante, la velocidad de la luz y todas las radiaciones electromagnéticas se comportan como la luz, pueden reflejarse, refractarse y ser absorbidas, el movimiento de la onda desde cualquier punto al siguiente punto correspondiente se llama “*un ciclo*”, el número de ciclos por segundo que produce la onda es su “*frecuencia*” y la distancia entre dos puntos correspondientes dentro de un ciclo es la “*longitud de la onda*”, cuando más alta es la frecuencia más corta es la longitud de onda, cuanto más baja

es la frecuencia más larga es la longitud de onda, las ondas de baja frecuencia las ondas largas tienen menos energía que las ondas de alta frecuencia las más cortas (Tanenbaum, 2003).

Son solo estas diferencias en longitud de onda y de frecuencia que son en realidad diferencias en la energía las que hacen que un tipo de onda electromagnética sea diferente de otra, cuando las ondas electromagnéticas se ordenan según su frecuencia o longitud de onda forman un espectro electromagnético continuo que realmente no tiene un comienzo ni un fin y la luz visible no es más que una parte muy pequeña de él, podemos hacer que toda la variedad de ondas electromagnéticas trabajen para nosotros debido a nuestra capacidad para generarlas, transmitir las y capturarlas, una de sus aplicaciones es la transmisión sin cable de imágenes y sonidos, esto lo hemos conseguido aprendiendo como generar y luego modificar las ondas electromagnéticas en una gama de frecuencias dentro de la región de radio del espectro, en primer lugar los sonidos y las imágenes que han de transmitirse se convierten en variadas corrientes eléctricas, estas corrientes entonces cambian la onda de radio que se llama “*onda portadora*”, en una u otra de dos formas, las variaciones en la corriente pueden variar la amplitud de la onda portadora, esto se llama “*modulación de amplitud por radio AM*”, si no las variaciones de la corriente pueden hacer que varíe la frecuencia de la onda esto se llama “*modulación de frecuencia FM*”, estas ondas portadoras modificadas generadas en emisoras de radio y televisión mediante corrientes eléctricas alternas son emitidas desde las emisoras, cada emisora o compañía tiene asignada una cierta frecuencia, un receptor que este sintonizado con esa frecuencia de radio recibe las ondas y convierte sus variaciones en la amplitud o en la frecuencia en diversas corrientes eléctricas, estas corrientes ponen en funcionamiento unos altavoces que reproducen el sonido de la radio.

La radio AM los números de la sintonía de la emisora representan miles de ciclos por segundo, la unidad de medida es el KHz, en la banda de frecuencia modulada se cubren frecuencias más altas los números de las emisoras representan MHz millones de ciclos por segundo, la radio de onda corta opera con una energía mayor transmitiendo su señal con ondas más cortas que la radio AM o FM por lo tanto de una frecuencia más alta (Tanenbaum, 2003).

El sonido de la televisión se transmite por una banda de radio FM pero la onda portadora de la imagen tiene una longitud de onda más corta y una mayor energía la radio y la televisión son posibles a nuestra capacidad para generar enviar y recibir las ondas electromagnéticas.

2.3. Comunicación con luz visible

La comunicación con luz visible conocida como VLC, es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance con una variedad de aplicaciones, con los recientes avances tecnológicos en el desarrollo de equipos de alta potencia utilizando luz LED para su transmisión nos ofrece una alta eficiencia energética, siendo una alternativa limpia para la radio frecuencia RF.

El interés en los sistemas VLC ha crecido rápidamente en los últimos años con la utilización de diodos emisores de la luz de alta potencia LED, en casi todos los equipos e infraestructura que podemos visualizar en nuestro contorno.

La motivación de utilizar la luz de iluminación para la comunicación es el ahorro de energía, logrando al mismo tiempo que iluminamos la transmisión de la información, esta tecnología es “*verde*” si la comparamos con la tecnología de radiofrecuencia RF, tenemos listo

la infraestructura de iluminación únicamente nos faltaría desarrollar un sistema inalámbrico adicional.

La comunicación de luz visible es el nombre dado a un sistema de comunicación óptico inalámbrico que lleva la información utilizando la modulación de la luz dentro del espectro visible, como podemos analizar en la figura 4 el rango es de (400-700nm) que utiliza la luz visible principalmente para la iluminación. (Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012).

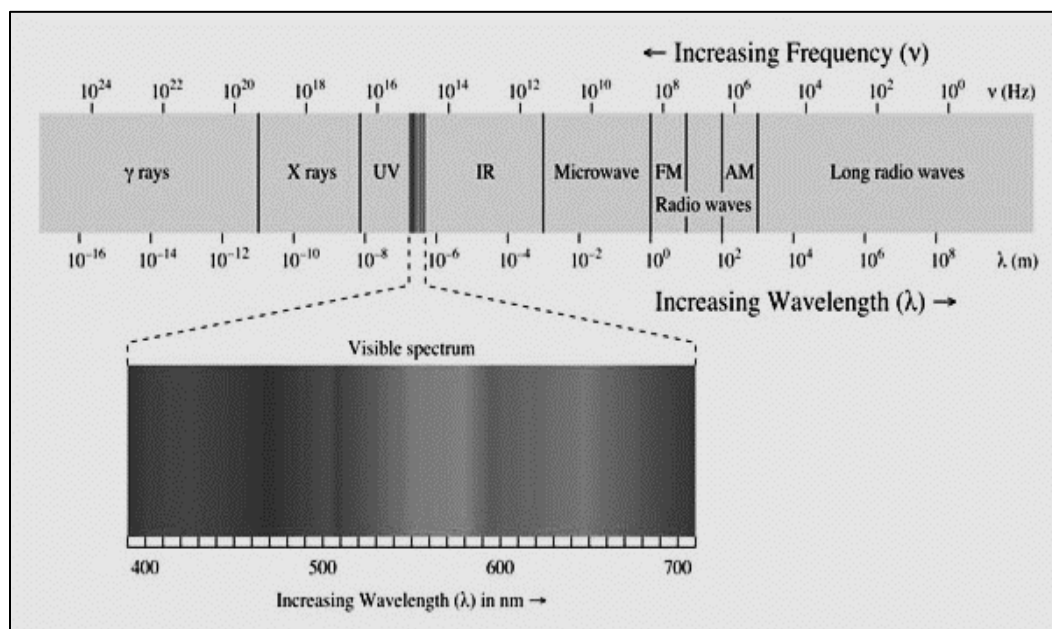


Figura 4. Espectro de luz visible

Fuente: Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012.

En los últimos años tenemos un crecimiento exponencial de la demanda para la conectividad inalámbrica que requiera una alta velocidad. Los seres humanos pasamos la mayoría del tiempo en el interior de una infraestructura ya sea en oficinas, locales o nuestro propio hogar, siendo evidente por sí mismo el sentido práctico de la tecnología VLC. Como se puede ver en la figura 5 que añadimos de forma fácil una red VLC que proporciona

comunicación inalámbrica a un computador portátil, smartphone, televisión y computador personal.

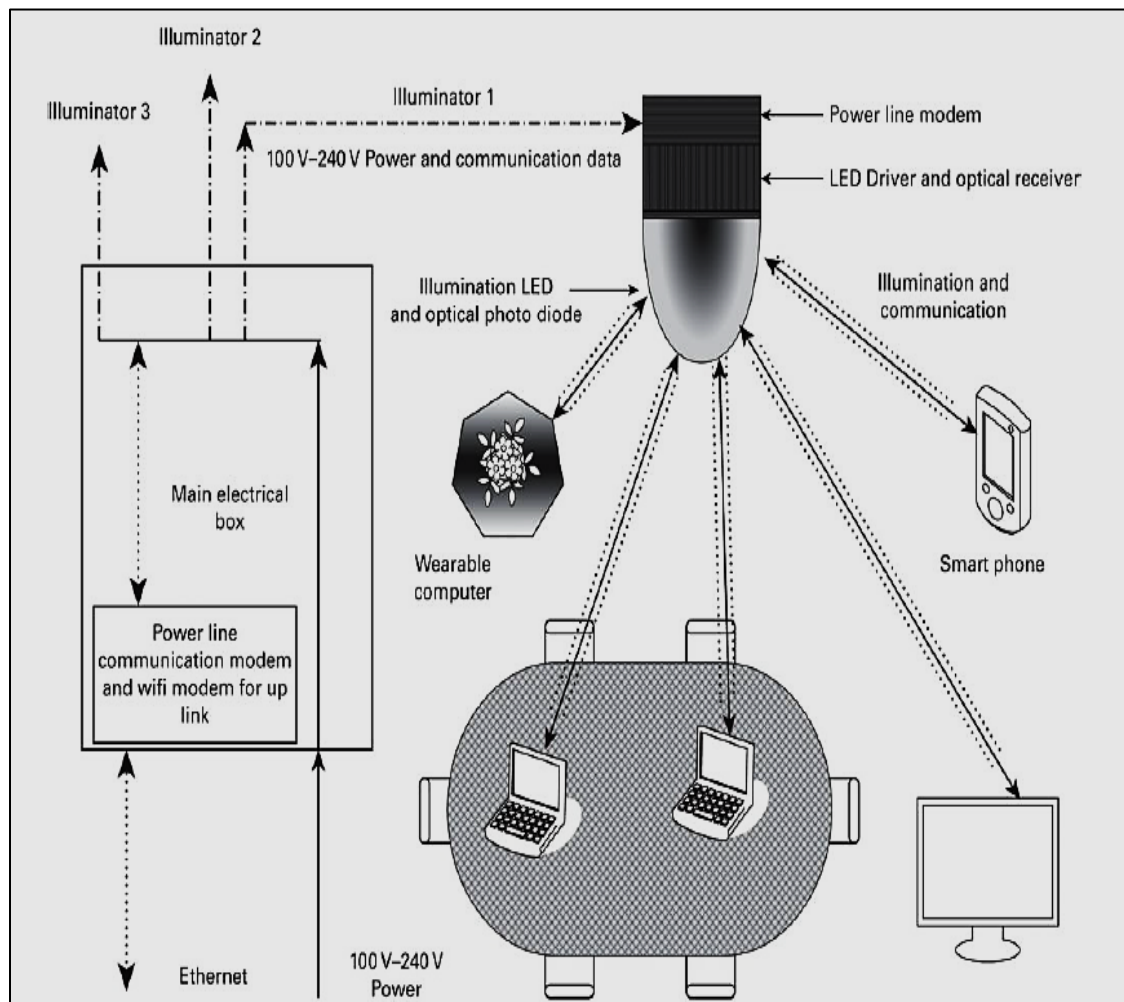


Figura 5. Red inalámbrica utilizando VLC

Fuente: Komine & Nakagawa, 2004.

El diseño de una red inalámbrica está conformada por un grupo de dispositivos principales siendo este un esquema general de la estructura de un sistema de comunicación por luz el mismo que se describe a continuación:

- Iluminación LED
- Caja eléctrica principal incluye Ethernet, línea eléctrica de comunicación PLC modem, Wi-Fi modem para enlaces ascendentes.
- Conductor LED que recibe una señal óptica entregado por un receptor dedicado dongle como parte del dispositivo.

La configuración puede basarse en algunos tipos de enlaces como:

- Enlace Wi-Fi
- Enlace infrarrojo IRDA
- Retro reflector

El retro reflector es un dispositivo óptico que refleja la luz siendo controlada la amplitud por una señal eléctrica como resultado de la modulación de la luz (Komine & Nakagawa, 2004). Reflejando una onda de luz en dirección contraria que la de incidencia. Este comportamiento no equivale al de un espejo, ya que únicamente refleja los rayos de luz en la dirección de incidencia cuando ésta es perpendicular a la superficie como se puede ilustrar en la figura 6 el ángulo de incidencia es 0.

En un futuro muy próximo miles de millones de aparatos, sensores e instrumentos tendrán una conectividad inalámbrica aplicando el concepto del internet de las cosas, donde los libros, termostatos, paquetería, lámparas, botiquines, partes automotrices, etc. estuvieran conectados a internet y equipados con dispositivos de identificación, VLC podría ser una tecnología de comunicación inalámbrica de gran revelación siendo simple y muy económico teniendo como gran ventaja el no inmiscuirse en ninguna parte del espectro electromagnético ya saturado.

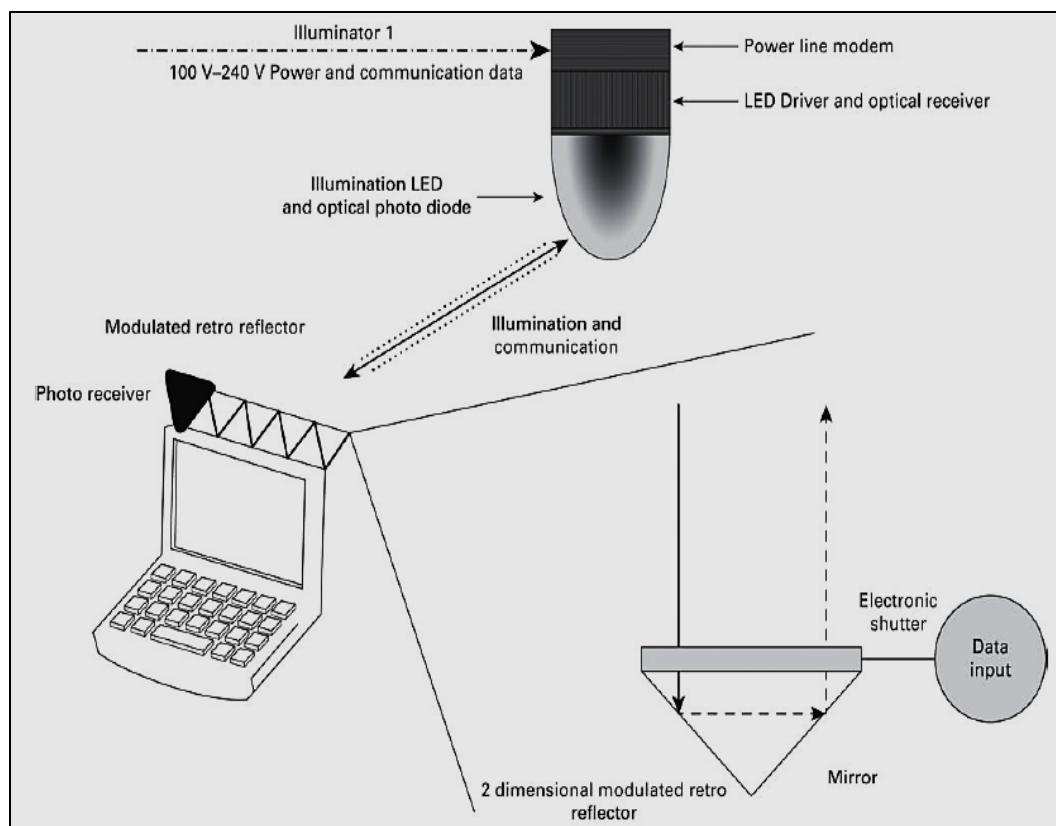


Figura 6. Red de comunicación inalámbrica basado en retro reflector

Fuente: Komine & Nakagawa, 2004.

2.3.1. Tecnología Li-Fi.

Esta nueva tecnología fue bautizada con el nombre de Li-Fi "*Light-Fidelity*", el desarrollo de esta tecnología se encuentra en estudios a nivel mundial por algunos grupos de científicos distribuidos en China, India, Japón, Francia y territorio Británico, los mismos que han invertido tiempo y recursos económicos para poder en un futuro muy cercano utilizar la luz como medio de transmisión de datos, los científicos esperan que en los últimos 25 años se pueda reemplazar en su totalidad las bombillas de cada casa por luz que conecte en forma inalámbrica a cualquier dispositivo electrónico.

Al ser una nueva tecnología, está todavía no es compatible con la infraestructura que tenemos en la actualidad, para lo cual, es necesario rediseñar muchos de los equipos o dispositivos electrónicos que funcionan como receptores o emisores de telecomunicaciones y poder establecer un protocolo nuevo que pueda realizar el emparejamiento con Li-Fi.

Las investigaciones realizadas permiten señalar que según la configuración que se aplique a esta nueva tecnología las capacidades de transmitir datos se pueden elevar en gran manera con la posibilidad de alcanzar hasta 10 Gbps (Americalfi, 2014), esto significa que podremos descargar una película de la alta definición desde internet en tan solo unos pocos segundos.

Es posible que a finales del 2017 se logre establecer una conexión de luz visible ultra paralela logrando multiplicar los colores de la luz para generar una conexión de alta amplitud a larga distancia, este proyecto tiene un costo aproximado de 5.8 millones de libras bajo los auspicios del consejo de ingenierías e investigación física de Reino Unido dirigido por el profesor "*Harald Hass*" (PureLifi Ltda, 2014).

2.3.2. Que es Li-Fi.

El nombre Li-Fi hace referencia a la tecnología que utiliza el medio de comunicación óptico para transmitir datos en el espectro visible de los humanos es decir, en espacio abierto, esta investigación se prolonga por algunas décadas con la finalidad de lograr convertir las bombillas LED convencionales que iluminan los ambientes en medios capaces de transmitir datos en frecuencias que van de 400 y 800 Thz.

2.3.3. Como Funciona Li-Fi.

Para lograr la transmisión de datos es necesario que la parte transmisora utilice un modulador que realizara el apagado y encendido del foco de manera muy rápida el cual será imperceptible para el ojo humano, creando de esta manera los ceros y unos binarios que son necesarios para la transmisión de información, en la parte receptora utilizaremos un fotodiodo el cual es encargado de recoger los cambios de luz y los pasara otra vez al dominio eléctrico.

Su funcionamiento no es complicado y se lo grafica en la figura 7 básicamente si el diodo emisor esta encendido “*on*” será posible transmitir un 1 digital, en el caso que se encuentre apagado “*off*” se enviaría un 0 digital, permitiendo que el LED pueda “*switchear*” de forma rápida generando una frecuencia necesaria para la transmisión de datos.

Para construir un sistema Li-Fi se requiere una serie LED y un controlador que pueda codificar los datos de dichos diodos y aplicar un mecanismo de variación para que el “*switching*” funcione con los datos que necesitamos transmitir.

La bombilla de led también utiliza un microchip encargado de la administración del flujo de datos con un rango de hasta 150 Mbps, si queremos aumentar su capacidad de transmisión es necesario incluir más leds logrando establecer una forma de transmisión paralela, o bien utilizar diodos rojos, azules y verdes para alterar la frecuencia que son rápidos no son visibles para el ojo humano de cada uno y crear canales de datos diferentes como se ilustra en la figura 7.

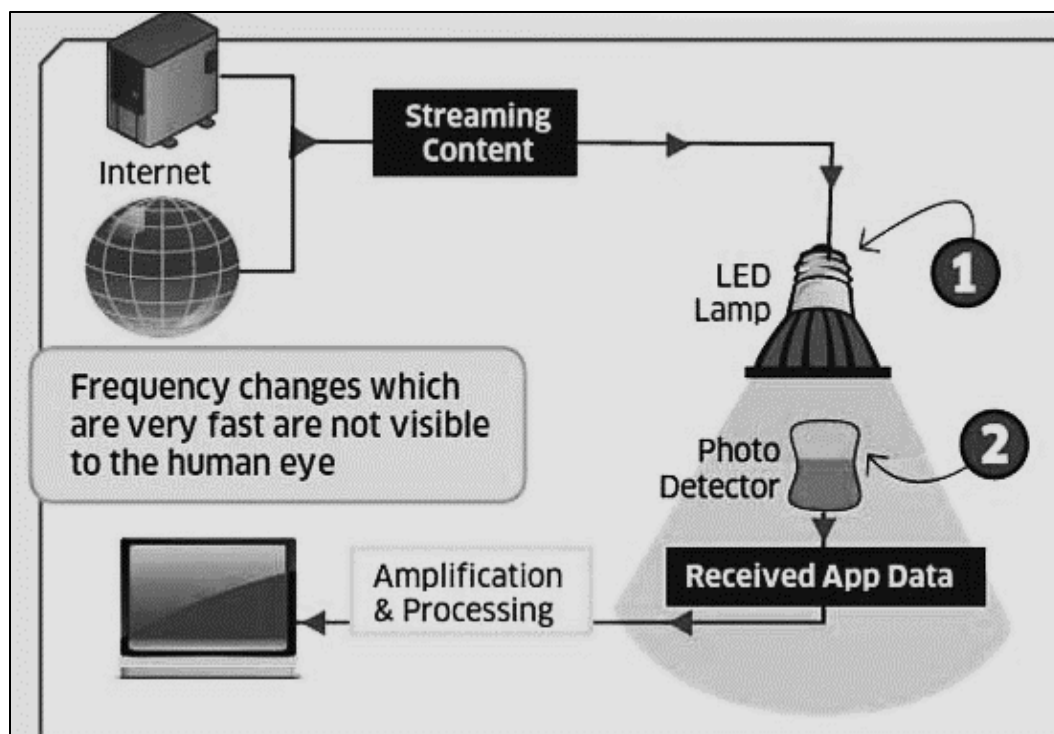


Figura 7. Sistema de transmisión inalámbrica Li-Fi

Fuente: PureLifi Ltda, 2014.

El término “*comunicación por luz visible*” implica la utilización de cualquier porción de luz de espectro electromagnético para transmitir información y es en el año 2010 cuando el físico Harald Haas de la Universidad de Edimburgo del Reino Unido fundó el proyecto “*D-Light*”. En el año 2011 empezó a promover esta tecnología para poder comercializarla. A finales del año 2011 diferentes grupos y compañías de esta industria formaron Li-Fi como consorcio con el fin de dar a conocer y promover esta tecnología (PureLifi Ltda, 2014).

Para conseguir disfrutar de esta tecnología como tenemos en la figura 8 está tecnología está formado por una bombilla que posee un chip emisor que la convierte en un router luminoso y así esa bombilla es capaz de emitir las ondas Li-Fi que será captada por los receptores luminosos como pueden ser móviles, cámaras, televisores, ordenadores o incluso otros

electrodomésticos inteligentes. Las ondas o impulsos luminosos que emite la bombilla sólo se emiten cuándo la bombilla está encendida y son imperceptibles para la vista humana.

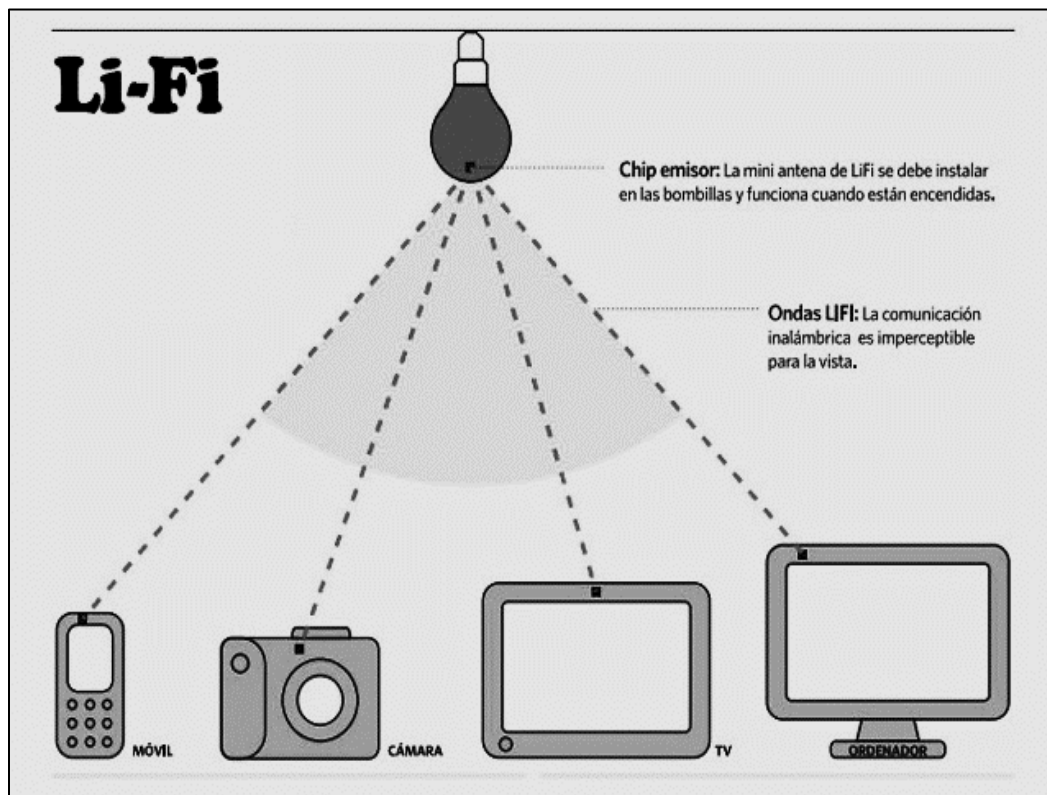


Figura 8. Bombilla con chip emisor de ondas Li-Fi

Fuente: PureLifi Ltda, 2014.

2.3.4. Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas.

Li-Fi es un término que se utiliza para describir la tecnología de transmisión de datos por luz visible, aplicada a la comunicación inalámbrica de alta velocidad. Adquirió este nombre debido a la similitud con Wi-Fi que utiliza radio en lugar de luz. Wi-Fi es ideal para la cobertura inalámbrica dentro de los edificios y Li-Fi es ideal para la cobertura inalámbrica de datos de alta velocidad en espacios reducidos y para aliviar los problemas de interferencia, por lo que las dos tecnologías se pueden considerar en diferentes aplicaciones.

Tabla 1:

Análisis comparativo de tecnologías.

Tecnología	Velocidad	Densidad Data
Wireless (actual)		
Wi-Fi IEEE 802.11n	150 Mbps	*
Bluetooth	3 Mbps	*
IrDA	4 Mbps	***
Wireless (Futuro)		
wiGig	2 Gbps	**
Giga-IR	1 Gbps	***
Li-Fi	>1 Gbps	****

Nota. Fuente: Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012.

La tabla 1 también contiene las tecnologías inalámbricas actuales que se pueden utilizar para la transferencia de datos entre dispositivos como Wi-Fi, Bluetooth e IrDA. Actualmente Wi-Fi ofrece velocidades de datos propios. El IEEE 802.11n en la mayoría de las implementaciones ofrece hasta 150 Mbps aunque en la práctica recibe mucho menos que esto. La tecnología Li-Fi no se ocupa de las ondas de radio, por lo que se puede utilizar fácilmente en lugares donde Bluetooth, infrarrojos, Wi-Fi e Internet están prohibidos.

2.3.5. Estructura básica de una red Li-Fi.

Li-Fi hace referencia al término “*Light Fidelity*” en inglés, o lo que sería lo mismo en español Fidelidad de la Luz, es la comunicación mediante luz visible, sí, luz visible (Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012). Esta luz lo que hace es transmitir datos ultra-rápidos de luz que son recibidos por un router óptico. Es un sistema de comunicación inalámbrico al igual que el Wi-Fi pero usando como medio la luz visible en lugar de ondas electromagnéticas. Li-Fi significa comunicación a través de impulsos de luz visible mediante los que se transfiere información, es decir, transmitir información a través de la luz (Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012).

2.3.6. Ventajas de la tecnología Li-Fi.

- En pruebas de laboratorio se demuestra que esta tecnología es capaz de generar velocidades de hasta 500 Mbps, esto quiere decir 5 veces más rápido que la fibra óptica utilizada por Wi-Fi.
- El precio de este producto al momento es muy elevado ya que se encuentre en pleno desarrollo pero se estima que en los próximos años será 10 veces más económico que los equipos Wi-Fi existentes.
- No es necesario armar una infraestructura de red de comunicación ya que cualquier bombilla se convierte en un potencial router transmisor de información eliminando por completo los cables.
- Este tipo de comunicación inalámbrica se convierte en un medio de transmisión más seguro por la propiedad que tiene la luz de no atravesar las paredes.

- La luz no necesita mantener ninguna costosa frecuencia radioeléctrica dejando de saturar las bandas de frecuencia, tampoco interfiere en las comunicaciones al no provocar interferencias con otros sistemas.
- Al utilizar la luz como medio de comunicación se podría decir que este sistema es energéticamente más eficiente que el Wi-Fi.

2.3.7. Desventajas de la tecnología Li-Fi.

- No funciona con luz apagada sin embargo es posible atenuar el brillo para simular que este apagado, esto puede ocasionar un aumento en la tarifa de luz.
- Solo funciona con aquellos dispositivos que tengan un receptor para esta tecnología.
- Su alcance es muy corto aproximadamente unos tres metros y cualquier objeto que se interponga entre emisor y receptor corta automáticamente la transmisión.
- Sensible al movimiento.

2.4. Elementos ópticos para la transmisión

En la transmisión inalámbrica con tecnología Li-Fi tenemos como elementos ópticos los diodos led, también conocidos como diodo emisor de luz y en la parte del receptor se encuentra el fotodiodo encargado de recibir la señal que son enviados por el diodo emisor de luz.

2.4.1. Evolución histórica.

En el año de 1907, “*Henry Joseph Round*”, especialista en las comunicaciones por radio, descubre el efecto físico de la electroluminiscencia. Durante muchos años, su hallazgo pasó desapercibido por la comunidad científica. El primer diodo led fue diseñado por “*Oleg Vladimirovich Losev*” quien fabricó un LED de óxido de cinc y carburo de silicio (Gago

Calderon & Fraile Vilarrasa, 2012). Losev publicó los detalles de su trabajo en 1927, en una revista científica rusa, y abrió el camino a los posteriores descubrimientos.

Considerado como el padre del led moderno, “*Nick Holonyak*” inventó en 1962 el primer led que emitía luz en el espectro visible, cuando trabajaba para “*General Electric*”.

Quince años más tarde, ya desde su cátedra en la Universidad de Illinois, descubriría el láser de punto cuántico, que abrió las puertas a las comunicaciones a través de la fibra óptica, los reproductores de cd y numerosas aplicaciones en el mundo de la medicina (Siddique & Thair, 2011).

Respecto a la aplicación industrial del LED, fue en los años 60 y 70 cuando tuvo un gran desarrollo. En 1962, en paralelo al hallazgo de Holonyak, sale al mercado el primer diodo luminiscente rojo. Servía como indicador, ya que su luz todavía no era suficiente para iluminar una gran superficie (Siddique & Thair, 2011). No es hasta 1971 que están disponibles LED en otros colores: verde, naranja y amarillo.

En la década de los 90, se desarrollaron los ultravioleta y azules, lo que permitió crear led de luz blanca, a través de conversión luminiscente en 1995 (Komine & Nakagawa, 2004). Este hecho y la gran luminosidad conseguida lo convierten en un elemento muy útil para la iluminación.

El LED es un elemento que ha estado y está en continuo desarrollo, durante más de treinta años, ha sido utilizado como señalización e iluminación industrial, en productos de consumo como teléfonos inteligentes, televisiones, automóviles, ordenadores, señales de tráfico o en el ámbito de la decoración (Gago Calderon & Fraile Vilarrasa, 2012) .

2.4.2. LED.

Por medio de aplicación de corriente a ciertos componentes semiconductores se obtiene emisión de luz, siendo el componente resultante más representativo de esta característica el diodo emisor de luz, que se conoce por LED “*Light Emitting Diode*” (Hermosa Donate, 2012).

Como es de conocimiento el LED es utilizado en la mayoría de aplicaciones electrónicas, por tal motivo es importante conocer la simbología que se encuentra representada en su aspecto básico en la figura 9 siendo los más utilizados los colores (rojo, verde y amarillo).

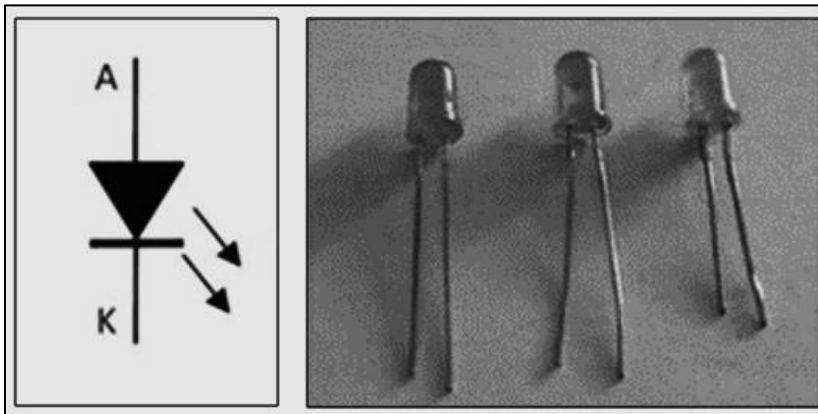


Figura 9. Simbología y aspecto básico del led

Fuente: Hermosa Donate, 2012.

La intensidad lumínica que emite el LED aumenta en función de la intensidad directa que circula por el diodo hasta un cierto límite, a partir del cual se produce una saturación; la luz empieza a cambiar de color y se avería (Siddique & Thair, 2011). Se obtiene valores normales de luz con una intensidad entre unos 5 a 20 mA, siendo la tensión caída directa de unos 1.8 V. Este es el componente normalmente utilizado en sustitución de las lámparas de filamento para indicar la puesta en marcha de los aparatos electrónicos (radio, tv, amplificadores de sonido, etc.), así como para la emisión de luz (Hermosa Donate, 2012).

Los diodos son componentes electrónicos que permiten el paso de la corriente en un solo sentido, en sentido contrario no deja pasar la corriente como si fuera un interruptor abierto, al ser polarizado de manera correcta produce una fuente emisora de luz. Tenemos que tener en cuenta que los diodos LED funcionan igual que un diodo de silicio o germanio, tienen una configuración PN, es decir que el voltaje con el que funcionan van entre los 1.5 y 2.2 voltios y una corriente de 20 y 40 mA, si se sobrepasa de estos valores se pueden llegar a quemar estos dispositivos, (Proakis, 1995) de igual manera es importante saber la forma de polarizar el diodo emisor de luz como en la figura 10 si se polariza mal al diodo LED no produce luz.

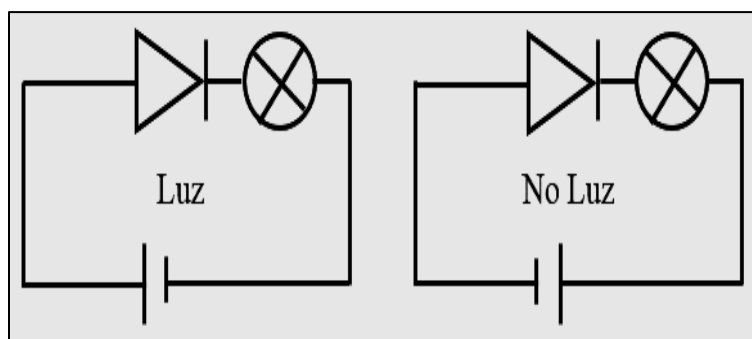


Figura 10. Polarización de un diodo emisor de luz

Fuente: Proakis, 1995.

El diodo se fabrica con un semiconductor, generalmente de la familia III-V, que presenta una banda prohibida directa, de manera que una fracción relativamente significativa de las recombinaciones libera su energía en forma de luz llamada recombinaciones radiantes. La geometría y el encapsulado del dispositivo permiten la salida de la luz al exterior (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013). Entre los materiales más habituales para la fabricación de LED está la familia $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$ ($0 < x < 1$) indica la composición química del material. El valor de la anchura de la banda prohibida varía linealmente con x desde 1.43 eV cuando $x=0$ el semiconductor es GaAs hasta 2.26 eV cuando $x=1$ el material es entonces GaP. En esta familia la banda prohibida solo es directamente cuando $x \leq 0.45$. Uno de los valores de x utilizados con más frecuencia es

0.4, con el que resulta una BP de 1.9 eV, lo cual supone una emisión de color rojo (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013).

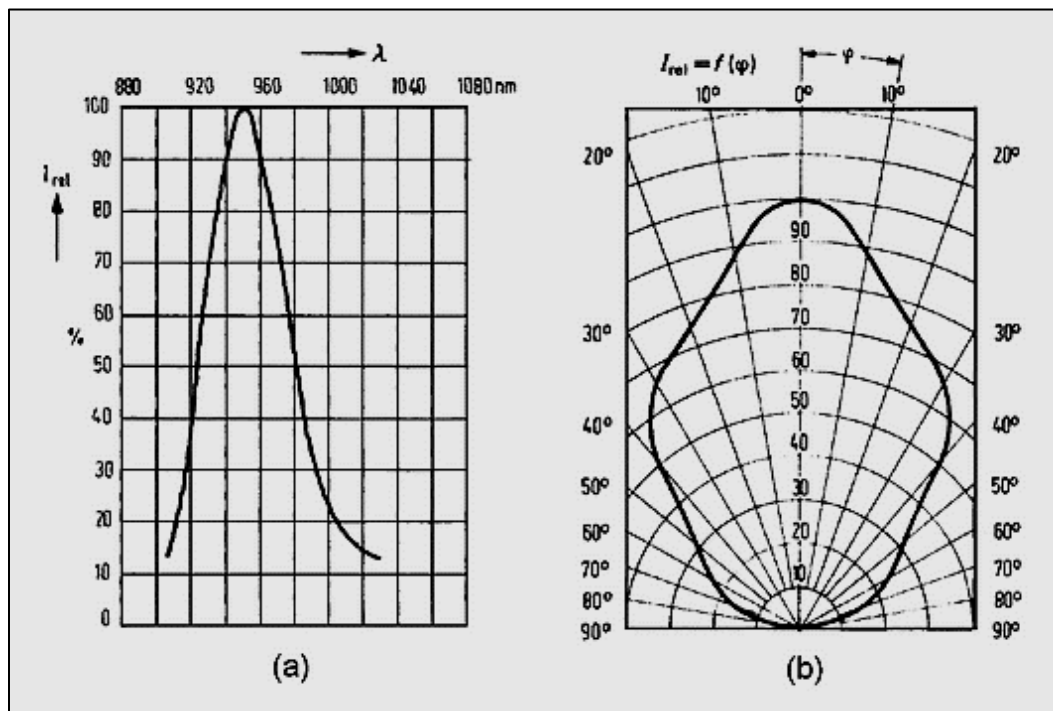


Figura 11. Distribución espectral de la radiación de un LED

Fuente: Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013.

El GaP es un semiconductor de BP indirecta que puede emitir luz cuando contiene determinadas impurezas, tales como el N (LED verdes y amarillos). También emite en el rojo cuando se dopa con Zn que sustituye al Ga, y con O, que sustituye al P. El mismo material emite el amarillo cuando se dopa con S (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013). Este proyecto investigativo estudia la distribución espectral y angular como se indica en la figura 11 de manera que se pueda desarrollar un modelo que facilite su uso en iluminación.

En el GaAs el Si es un dopante de los denominados anfóteros: es donador si sustituye al Ga, y aceptor si sustituye al As. Este hecho da lugar a una variedad de materiales, según el proceso de dopaje. Los LED resultantes emiten en varias longitudes de ondas, siempre

en el infrarrojo. La radiación de color azul se puede obtener con SiC y GaN. Uno de los conceptos relevantes en este dispositivo es el de eficiencia de emisión, definida como el cociente entre la potencia luminosa emitida y la potencia eléctrica consumida. Para calcularla se considera el caso de un diodo P+N, de modo que la mayor parte de los procesos de recombinación tiene lugar en la región neutra N (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013).

Se denomina τ_{pr} el tiempo de vida de los minoritarios correspondiente a los procesos de recombinación radiante, y τ_{pnr} el correspondiente a los procesos no radiantes. El tiempo de vida de los minoritarios es la composición.

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\tau_{pr}} = \frac{1}{\tau_{pnr}}$$

Si Q_p es la carga de minoritarios en exceso acumulada en la región neutra N, entonces el número de recombinaciones radiantes por unidad de tiempo vale:

$$N_f = \frac{Q_p/q}{\tau_{pr}} = \frac{I_D \tau_t}{q \tau_{pr}}$$

Donde I_D es la corriente que atraviesa el diodo y τ_t es el tiempo de tránsito, utilizado en el modelo dinámico del diodo. Si la combinación es de banda a banda (en ocasiones intervienen niveles de impureza en la banda prohibida) la potencia luminosa generada es:

$$P_L = N_f E_g = \frac{I_D \tau_t E_g}{q \tau_{pr}}$$

De cual solo una fracción Γ_{ext} emerge del dispositivo, mientras que el resto es reabsorbido en distintos puntos de la estructura donde:

$$P_{out} = \Gamma_{ext} P_L$$

La potencia eléctrica consumida vale:

$$P_i = I_D V_D$$

La eficiencia resultante es:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_i} = \Gamma_{ext} \frac{\tau_t}{\tau_{pr}} \frac{E_g}{qV_D}$$

Los valores habituales η en los led pueden estar entre unos pocos puntos porcentuales en las tecnologías antiguas hasta alrededor de un 50 % en la más avanzada (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013).

2.4.3. Generación de luz blanca led.

En la actualidad, uno de los grandes desafíos científicos y tecnológicos es la creación eficiente de luz blanca con materiales semiconductores, a los que se enfrenta la tecnología LED para poder implementar en aplicaciones de señalización y decoración y especialmente de iluminación general (Gago Calderon & Fraile Vilarrasa, 2012), la luz blanca se consigue por dos vías:

- Mediante la combinación de colores rojo, verde y azul bajo un mismo lente o superficie de proyección (generación aditiva de colores).
- Mediante la conversión con fosforo de radiaciones azules en un proceso similar al que se emplea en las lámparas de decoración de vapor de mercurio, aunque en estos casos a partir de radiaciones ultravioletas (Gago Calderon & Fraile Vilarrasa, 2012).

2.4.4. LDR.

Los semiconductores también son sensibles a la luz, de manera que también puede aumentar su conductividad en relación de la radiación luminosa recibida, de ahí que tengamos componentes electrónicos diseñados como elementos sensores (o detectores) de luz, entre los que destacan la fotocélula LDR, el fotodiodo y el fototransistor.

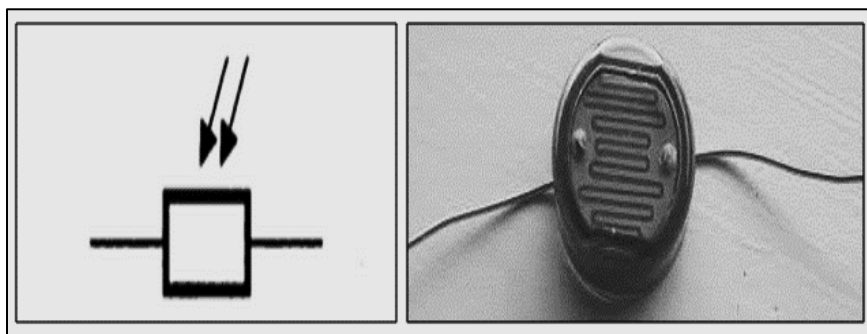


Figura 12. Dispositivo que aprovecha los efectos de la luz sobre el semiconductor

Fuente: Hermosa Donate, 2012.

El dispositivo más básico es la LDR vea figura 12 “*Light Dependent Resistor*”, que se comporta como una resistencia cuyo valor óhmico disminuye notablemente cuando más se ilumina. Es un componente de bajo precio y con el cual se obtienen muy fácilmente aplicaciones de control por medio de luz (Hermosa Donate, 2012).

2.4.5. Fotón

Los fotones son las partículas constituyentes de la luz. Un fotón se caracteriza por tener masa cero, así como por transportar energía electromagnética, los fotones poseen también un carácter ondulatorio, que determina sus propiedades de localización en el espacio y las reglas por las cuales interfieren y se difractan. La energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la correspondiente radiación.

$$E = h\nu$$

La constante de proporcionalidad, h , recibe el nombre de “*constante de Planck*” y su valor $6.63 \cdot 10^{-34}$ J. s. En el vacío, los fotones viajan a una velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s velocidad de la luz en el vacío (España Boquera, 2005).

2.4.6. Fotodetector.

Un fotodetector o detector de fotones, en sentido genérico, es un dispositivo capaz de convertir un flujo de fotones en una “*magnitud medible*”, las películas fotográficas o las células de la retina son ejemplos de fotodetectores, en el ámbito de los sistemas eléctricos, dicha “*magnitud medible*” consiste en una corriente o en una tensión. Dependiendo del mecanismo subyacente a su funcionamiento, los fotodetectores se clasifican en dos grupos: detectores térmicos y fotoeléctricos (España Boquera, 2005).

2.4.7. Detectores térmicos.

El material del que se hallan fabricados es calentado por la radiación absorbida, y este calentamiento provoca un cambio en el comportamiento del material, como, por ejemplo, modificar su conductividad.

Los bolómetros pertenecen a este grupo de detectores. A causa de su reducida velocidad de respuesta, las aplicaciones de los detectores térmicos en comunicaciones ópticas y otras áreas de fotónica son muy limitadas (España Boquera, 2005).

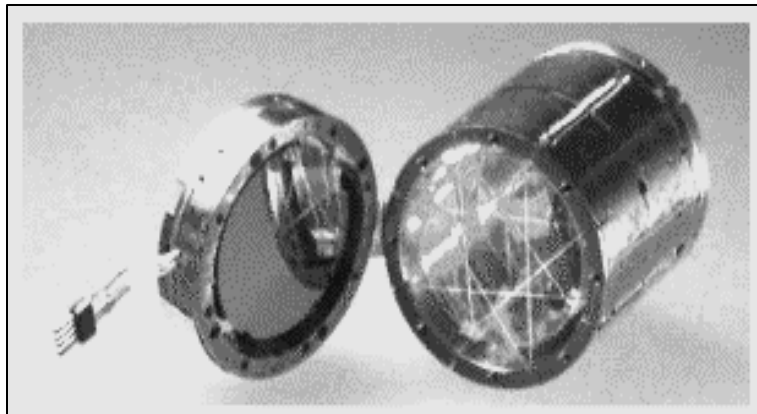


Figura 13. Bolómetro detector de materia oscura

Fuente: España Boquera, 2005.

Un bolómetro es un instrumento que mide la cantidad total de radiación electromagnética que viene de un objeto en todas las longitudes de onda, el mismo se encuentra ilustrado en la figura 13.

2.4.8. Detectores fotoeléctricos.

La absorción de fotones resulta en una transición de los electrones presentes en el material hacia niveles de energía superior, donde son susceptibles de ser transportados por un campo eléctrico, generando una corriente. Algunos detectores que basan su operación en ese fenómeno, conocido como fotoefecto, son las células fotoeléctricas, los fotoconductores, los fotodiodos y los fototransistores (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013).

2.4.9. Fotoconductor.

Material cuya conductividad aumenta a medida que lo hace la cantidad de fotones incidentes sobre él. Normalmente, dicho material es un semiconductor en el cual cada fotón absorbido da lugar a la generación de un par electrón-hueco. Cuando se aplica un campo eléctrico externo sobre el fotoconductor, los electrones y huecos son transportados, originándose

una corriente eléctrica. A mayor número de fotones absorbidos, mayor es la corriente producida (España Boquera, 2005).

2.4.10. Fotodiodo y fototransistor.

El fotodiodo es otro componente similar a la LDR. Es un tipo de diodo con una especie de ventana lente para recibir luz. Cuando recibe luz, aparece una corriente (inversa), que aumenta en función a la luminosidad (Hermosa Donate, 2012). Es un dispositivo semiconductor de dos terminales “*cátodo y ánodo*”; este diodo varía su conducción inversa al ser afectado por la luz en figura 14 el fotodiodo conjuntamente con el fotoresistor y fototransistor son dispositivos sensibles a la luz, en cambio el LED es un verdadero generador de luz (Wayne, 2003).

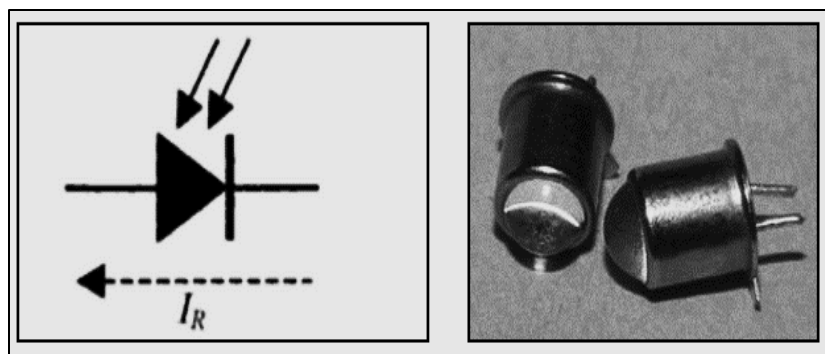


Figura 14. Sensor de luz de una corriente (inversa) en función de la luminosidad

Fuente: Wayne, 2003.

El fototransistor es uno de los optocomponentes más importantes, se basa en la acción del fotodiodo combinada con la función del transistor que es un amplificador de corriente, por lo cual se obtiene un componente muy sensible a la luz (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013). Estos dos componentes son especialmente utilizados para detectar la luz de control de los mandos a distancia en los aparatos de TV, videos, etc.

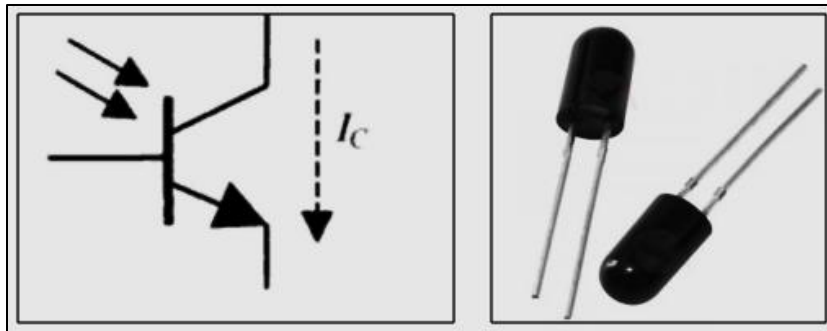


Figura 15. Corriente amplificada en función de la luminosidad que recibe

Fuente: Hermosa Donate, 2012.

Normalmente este dispositivo es sensible a los infrarrojos, la luz tiene incidencia sobre la región de base los cuales generan portadores en ella. El fototransistor en las figura 15 es más sensible que el fotodiodo por el efecto de ganancia propio del transistor, un fototransistor es básicamente igual que un transistor común con la diferencia que el fototransistor puede trabajar como un transistor normal con la corriente de base i_b “modo común” y también cuando la luz que incide en este elemento hace las veces de corriente de base i_p “modo de iluminación” (Hermosa Donate, 2012).

2.5. Detectores de luz.

Hay dos dispositivos que se suelen usar para detectar la energía luminosa en los receptores de comunicación con fibra óptica: los diodos PIN “tipo p -tipo n intrínseco” y los APD “fotodiodos de avalancha” (Wayne, 2003).

2.5.1. Diodos pin.

Un diodo PIN es un fotodiodo de capa de agotamiento, y es probable que sea el dispositivo más usado como detector de luz en el sistema de comunicación con fibra óptica (Wayne, 2003).

2.5.2. Construcción de un fotodiodo PIN.

Se indica el esquema básico de un diodo PIN. Una capa dopada muy ligeramente casi pura o intrínseca, ver figura 16 de material semiconductor tipo n se encierra entre la unión de dos áreas de contacto p y tipo n, muy dopadas. La luz entra al dispositivo a través de una ventana muy pequeña y cae sobre el material intrínseco carente de portadores. El material intrínseco se hace lo suficientemente grueso como para que la mayoría de los fotones que encuentren el dispositivo queden absorbidos por esta capa (Wayne, 2003).

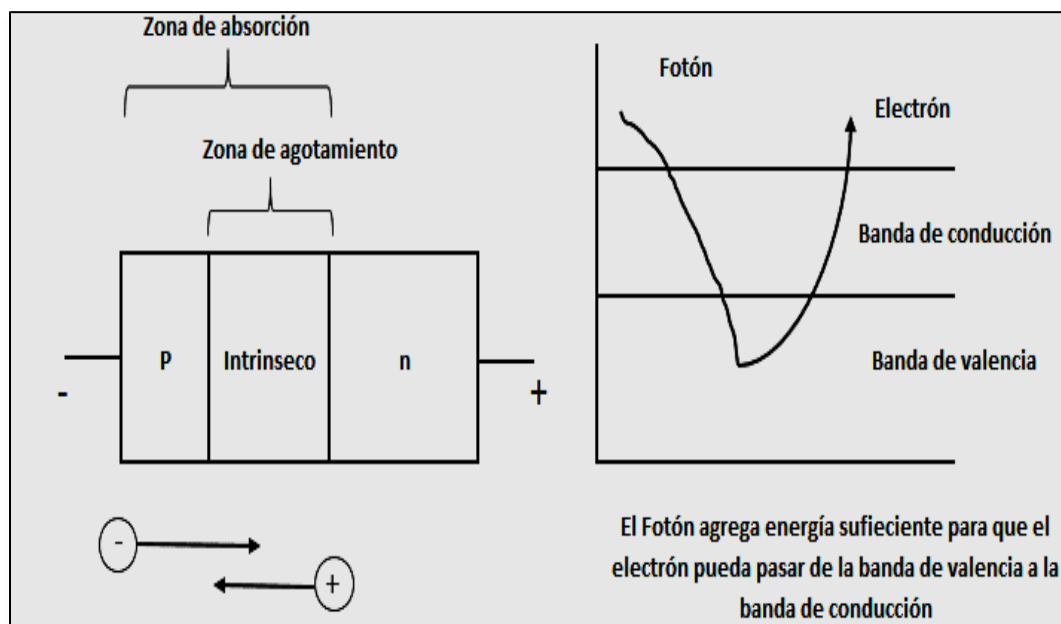


Figura 16. Diodo PIN

Fuente: Wayne, 2003.

Es decir, el fotodiodo PIN realiza su funcionamiento al contrario de un LED, quedando la mayoría de los fotones absorbidos por electrones de la banda de valencia del material intrínseco, en el momento que los fotones son absorbidos se agrega una energía lo bastante suficiente para generar portadores en la región de agotamiento, logrando con esto el paso de la corriente por dicho dispositivo.

2.5.3. Fotodiodo de avalancha.

Un APD es una estructura pipn, la luz entra al diodo y se absorbe en la capa n, delgada y muy dopada. Entre la unión i-p-n se desarrolla una gran intensidad de campo eléctrico por polarización inversa, que causa ionización por impacto. Durante la ionización por impacto un portador puede adquirir la energía suficiente para ionizar otros electrones enlazados (Wayne, 2003).

Estos portadores ionizados, a su vez, provocan más ionizaciones. El proceso continúa como en una avalancha, se representa en la figura17 que es equivalente de hecho a una ganancia o multiplicación interna de portadores. En consecuencia, los APD son más sensibles que los diodos PIN y requieren menos amplificación adicional. Las desventajas de los APD son los tiempos de transito relativamente grande, y ruido adicional, generando internamente, debido al factor de multiplicación por avalancha.

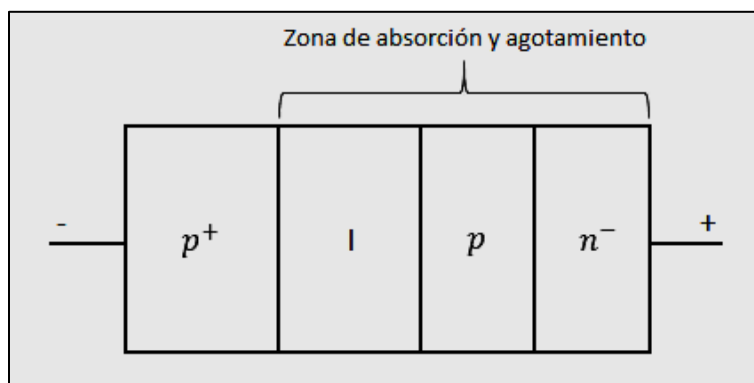


Figura 17. Construcción básica de un fotodiodo avalancha APD

Fuente: Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013.

2.5.4. Diodos laser.

Una modificación del dispositivo que se ha visto como LED permite disponer de una fuente de radiación laser que, por sus características de volumen, consume y coste, ha

hallado un gran número de aplicaciones, entre ellas, por ejemplo, la lectura de discos ópticos, tal como se esquematiza en la figura 18 (a) en un diodo laser se consigue la inversión de población en la ZCE de una unión PN situada entre dos regiones muy dopadas “*degenerada*”, que esta polarizada directamente. Obsérvese en la figura 18 que en la ZCE del diodo se produce una inversión de población elevada concentración de electrones de conducción y de huecos en el mismo punto (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013).

La estructura básica del dispositivo es la figura 18 (b). Las caras A y A' están pulidas para que sean reflectoras; se crea así una cavidad resonante A' debe ser parcialmente transparente. La luz reflejada se amplifica hasta alcanzar un valor de saturación, la densidad de radiación depende de las concentraciones de portadores y por lo tanto de la tensión de polarización del diodo. Alcanzando este punto, la emisión tiene una intensidad constante (Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013).

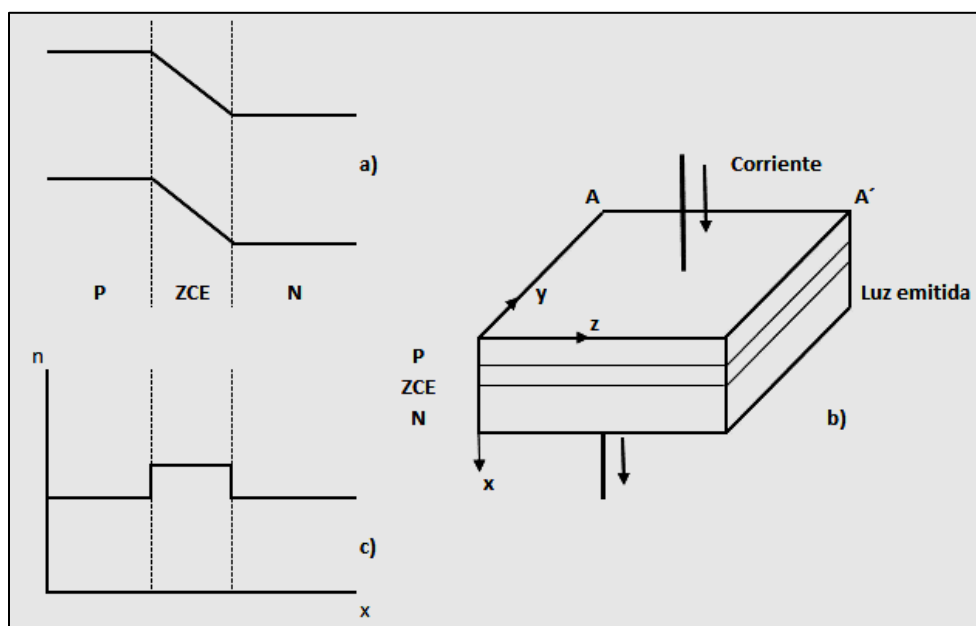


Figura 18. Estructura básica del diodo laser

Fuente: Prat Viñas & Calderon Cardona, 2013.

La radiación laser en forma visible o no, en la actualidad nos ofrece una gran cantidad de aplicaciones en especial para el campo de las comunicaciones, siendo especialmente útiles las fuentes constituidas por semiconductores.

2.6. Estándar de comunicación

La ventaja que tiene la comunicación de luz visible VLC es su fuente emisora inalámbrica de comunicación ya que utiliza luz LED (Komine & Nakagawa, 2004) . Los estándares para la iluminación cubren las conexiones entre la lámpara y la alimentación electrónica en términos de seguridad eléctrica, establecido en el IEC TC 34. El estándar para la comunicación de la luz visible necesita un número de protocolos entre la parte emisora y la parte receptora, como se especifica en PLASA E1.45 y IEEE 802.15.7; así como hacer frente a la seguridad eléctrica (Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012). Tenemos que considerar compatibilidades incluso del área de servicio de VLC, iluminación, proveedor, ya que los estándares son diferentes.

2.6.1. Compatibilidad áreas de servicio VLC.

Con esta tecnología podemos brindar servicio de comunicación en cualquier área que tenga un espacio iluminado (Kavehrad, 2013). Como un museo, centro comercial, oficina, restaurant, etc. existen dos tipos de servicios con VLC. Uno es para un área específica, como por ejemplo una empresa u organización donde podemos definir una marca de equipo VLC. El otro es para un área pública, en la cual deben existir normas de comunicación compatibles que permitan la conexión entre todos los equipos.

Cuando lo diseñamos para un área específica no es necesario la utilización de ningún estándar de comunicación siendo relativamente fácil su diseño basándose en la tecnología

propietario y no es un estándar definido como en (4) de la figura 19. Siendo de rápido despliegue y económico, pero tiene la desventaja de no ser compatible con otro equipo VLC dentro de una área de servicio como (2) (5) (6) de la figura 19.

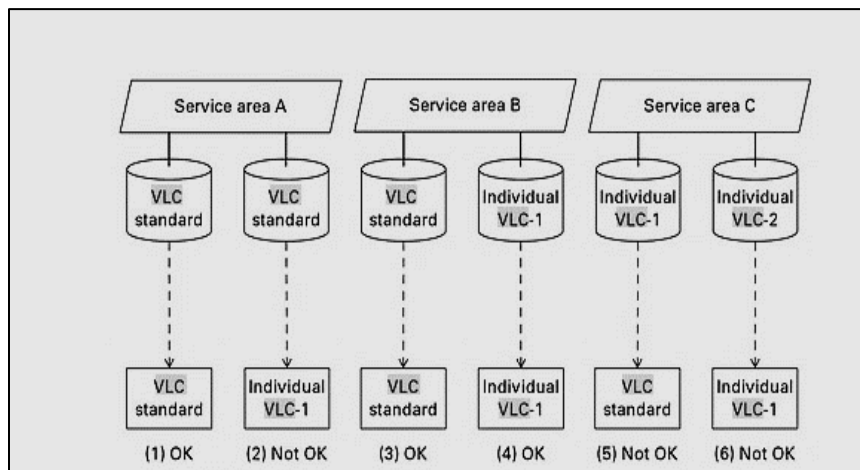


Figura 19. Compatibilidad dentro de un área de servicio

Fuente: Kavehrad, 2013.

Por tal motivo es necesario estándares que nos aseguren la compatibilidad de VLC en cualquier tipo de servicio. Las normas internacionales son IEEE 802.15.7 y PLASA E1.45.

2.6.2. Compatibilidad de iluminación en VLC.

Existe una alta gama de sistemas de iluminación LED, siendo importante que los estándares de comunicación de la luz visible sea aplicable a todo tipo de diodo emisor de luz. Para lo cual la IEC “*Internacional Electrotécnica Comisión*” es la encargada de realizar las normas internacionales para las tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas, la cual se encuentra desarrollando normas para los componentes digitales, incluyendo la luz visible de comunicación, siendo la TC 34 el estándar internacional que controla las siguientes áreas:

- Lámparas (incluye LED)
- Casquillos y portalámparas
- Control de lámparas
- Luminarias

Existen como 50 países que mantienen una membresía con la IEC siendo estos países afiliados a esta comisión de la cual Ecuador no forma parte, el país más cercano al nuestro que conforma parte del comité internacional es Colombia en la ciudad de Bogotá su Comité Nacional representa al IEC como presidente el Sr Alemán Nava hasta el 2018.

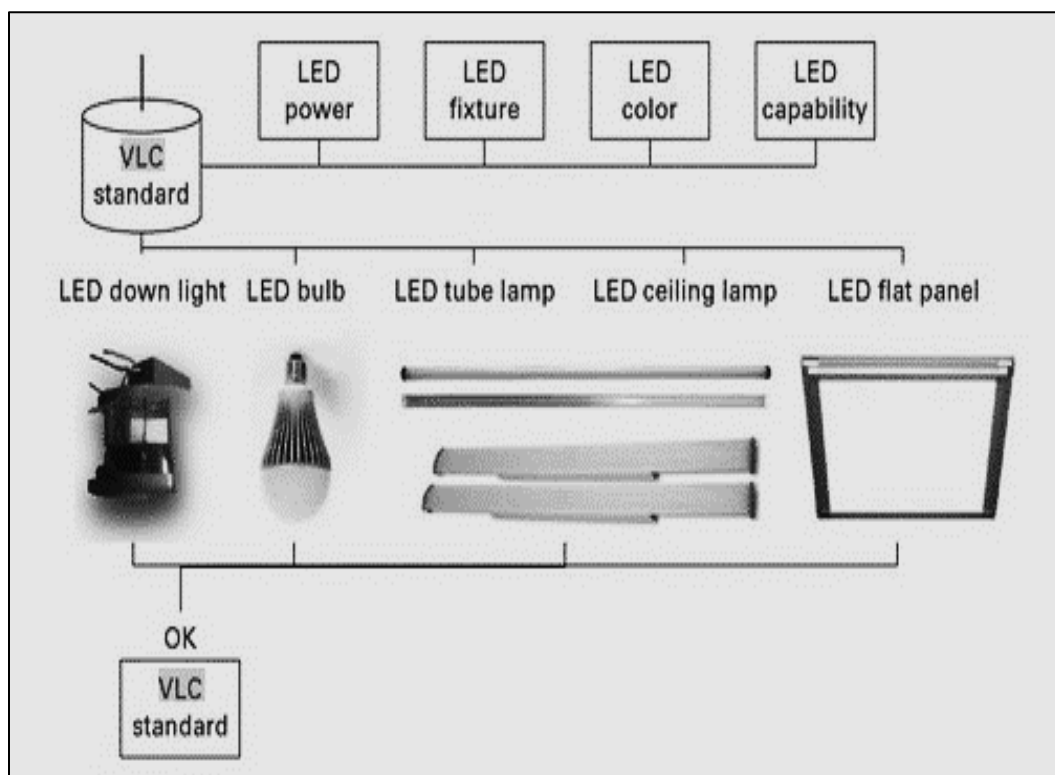


Figura 20. Componentes VLC que incluyen compatibilidad

Fuente: Kavehrad, 2013.

Es necesario saber los estándares de iluminación LED que son emitidas por la IEC TC 34 con la finalidad de poder desarrollar nuevos estándares con componentes VLC que

incluyan compatibilidad como se ilustra en la figura 20, de esta forma poder conectar cualquier dispositivo sin importar el uso que le demos, la potencia de iluminación, el fabricante, accesorios, etc.

2.6.3. Compatibilidad del proveedor con VLC.

La compatibilidad es un trabajo que se encuentra en desarrollo teniendo como finalidad el apoyar al comprador para que este pueda reemplazar su equipo en cualquier momento sin tener la necesidad de seleccionar ningún proveedor o producto específico, si esto no se aplica cualquier fabricante podrá introducir y retirar sus productos de iluminación libremente sin ningún estándar o llegar al final de su vida útil ocasionando un problema al comprador debido a la falta de compatibilidad.

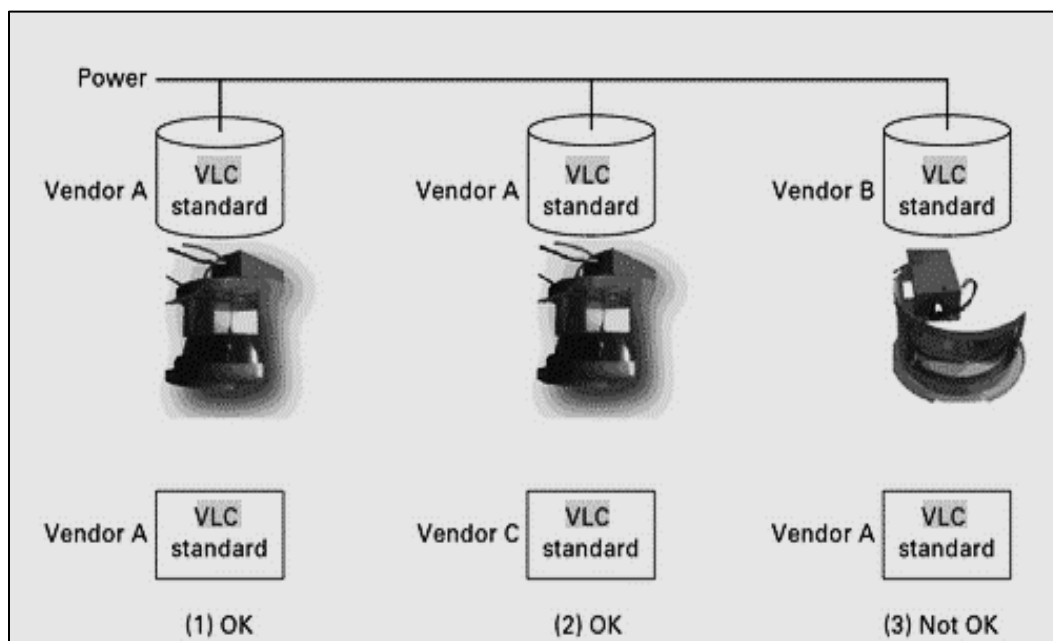


Figura 21. Compatibilidad con el proveedor VLC

Fuente: Komine & Nakagawa, 2004.

En la figura 21 se representa la falta de compatibilidad del vendedor B, esto ocasiona problemas de funcionamiento al momento de reemplazar la parte defectuosa.

Como podemos analizar si nosotros queremos lograr la compatibilidad entre los proveedores como primer paso es necesarios los estándares, en el caso que no podamos comprar un producto compatible tendríamos que volver a colocar otros terminales de recepción y transmisión como también podríamos abandonar el VLC, lo que no es posible es abandonar la infraestructura de iluminación la cual es obligatoria para nuestras vidas.

2.7. Estándar de compatibilidad

Existen otras normas relativas a la comunicación de la luz visible, entre las que podemos destacar la IEEE 802.15.7 VLC PHY / MAC, PLASA E1.45 DMX- 512A VLC, LED iluminación del motor Zhaga. Estándares internacionales o nacionales pueden desarrollarse simultáneamente por muchas organizaciones de normalización o grupos de trabajo, que pueden compartir sus actividades de normalización y proyectos a través de intercambio de documentos. Esto debería garantizar la compatibilidad en los estándares, donde un nuevo estándar debe estar por escrito para asegurar la compatibilidad hacia adelante y hacia atrás de cualquier estándar.

2.7.1. IEEE 802.15.7 VLC.

En los últimos años aumentado el interés en las redes inalámbricas, en este caso de estudio utilizando la luz visible como medio de comunicación siendo un área complementaria para los equipos que utilizan radio frecuencia.

El estándar IEEE 802.15.7 consisten en dos tipos de nodos, es decir un coordinador que inicializa y gestiona la red y un dispositivo remoto que se comunica a través del coordinador. El estándar IEEE 802.15.7 define tres tipos de topologías como podemos analizar en la figura 22 la cuales son: peer to peer, estrella, broadcast.

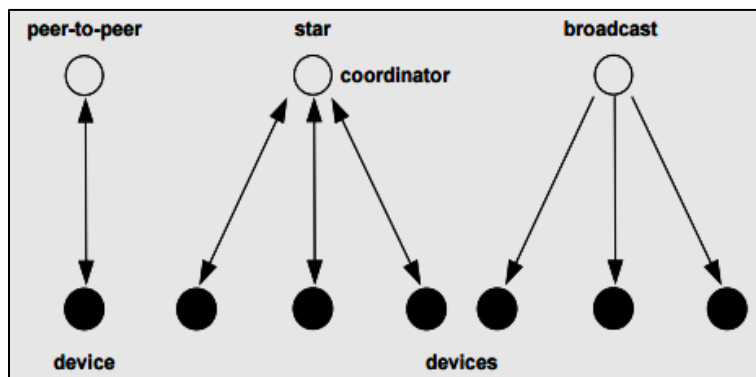


Figura 22. . Topología estándar IEEE 802.15.7

Fuente: Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012.

2.7.2. Topología peer to peer.

Es una red de computadoras donde una serie de nodos que se comportan como iguales entre sí. Es decir, actúan simultáneamente como clientes y servidores respecto a los demás nodos de la red. Las redes P2P permiten el intercambio directo de información, en cualquier formato, entre los ordenadores interconectados, ver figura 23.

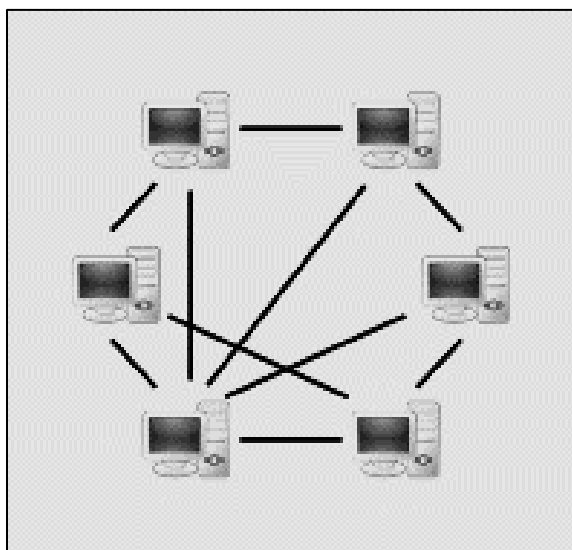


Figura 23. Topología peer to peer

Fuente: Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012.

El hecho de que sirvan para compartir e intercambiar información de forma directa entre dos o más usuarios ha propiciado que parte de los usuarios lo utilicen para intercambiar archivos cuyo contenido está sujeto a las leyes de copyright, lo que ha generado una gran polémica entre defensores y detractores de estos sistemas (Tanenbaum, 2003). Este tipo de red también suele usarse en telefonía VoIP para hacer más eficiente la transmisión de datos en tiempo real.

2.7.3. Topología estrella.

Una red en estrella es una red de computadoras donde las estaciones están conectadas directamente a un punto central y todas las comunicaciones se hacen necesariamente a través de ese punto “*conmutador, repetidor o concentrador*”. Los dispositivos no están directamente conectados entre sí, además de que no se permite tanto tráfico de información. Dada su transmisión, una red en estrella activa tiene un nodo central “*activo*” que normalmente tiene los medios para prevenir problemas relacionados con el eco, ver figura 24.

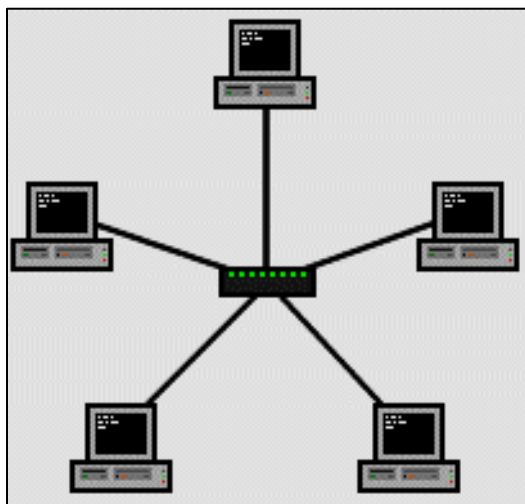


Figura 24. Topología estrella

Fuente: Tanenbaum, 2003.

Se utiliza sobre todo para redes locales LAN. La mayoría de las redes de área local que tienen un enrutador o encaminador “*router*”, un conmutador “*switch*” o un concentrador “*hub*” siguen esta topología. El punto o nodo central en estas sería el router, el switch o el hub, por el que pasan todos los paquetes de usuarios.

2.7.4. Topología lógica broadcast.

Es una forma de transmisión de información donde un nodo emisor envía información a una multitud de nodos receptores de manera simultánea, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo (Tanenbaum, 2003).

Este tipo de topología, significa que cada host envía sus datos hacia todos los demás hosts del medio de red. No existe una orden que las estaciones deban seguir para utilizar la red, ver figura 25.

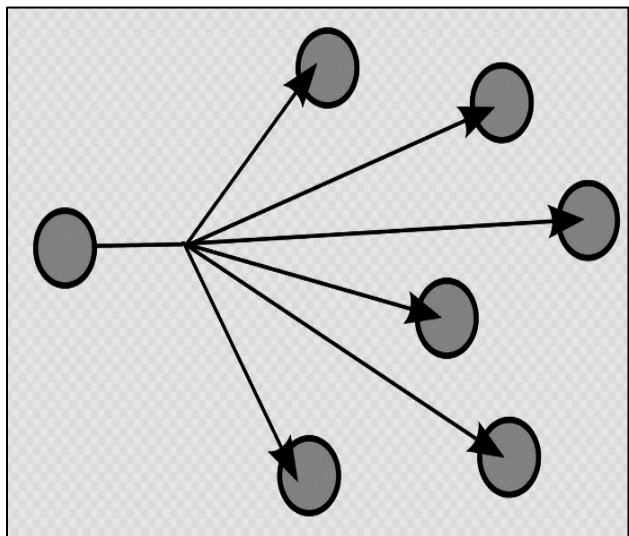


Figura 25. Topología lógica broadcast

Fuente: Tanenbaum, 2003.

2.7.5. Capa física PHY.

Las redes 802.11 tienen en común todas las capas del modelo ISO/OSI, a excepción de la capa MAC y la capa física PHY como en la figura 26 se encuentran optimizadas para la transmisión inalámbrica. Las IEEE 802.15.7 define las dos primeras capas del protocolo ISO/OSI, que incluye Control de Acceso Físico (PHY) en (1) y control de acceso al medio (MAC). en (2).

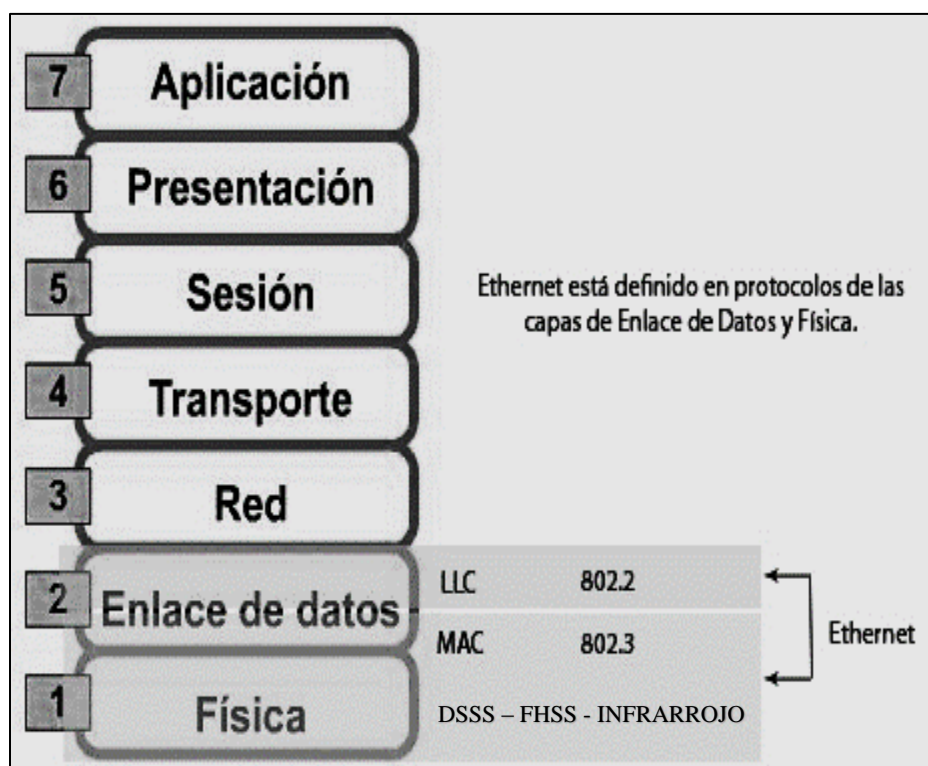


Figura 26. Capas del modelo OSI

Fuente Kavehrad, 2013.

La capa física PHY es la interfaz entre el MAC y el medio inalámbrico. Provee de tres niveles de funcionalidad: intercambiar tramas entre PHY y MAC, utilizar portador de señal “*signal carrier*” y modulación de espectro ensanchado “*spread spectrum*” para transmitir tramas a través del medio y proveer al MAC de un indicador de detección de portadora “*carrier sense indication*” para señalar actividad en el medio. El PHY está dividido en dos sub-capas, el

PLCP “*Physical Layer Convergence Procedure*” más cercano al MAC y el PMD “*Physical Medium Dependent Layer*”, que interacciona con el medio inalámbrico WM en sus siglas en inglés.

El estándar original define tres opciones para el PHY operando a 1 y 2 Mbps en la banda de 2,4 GHz. Éstos son el FHSS “*Frequency Hopping Spread Spectrum*”, el DSSS “*Direct Sequence Spread Spectrum*” y una especificación de infrarrojo IR. En 1999 dos nuevos PHY fueron ratificados, por un lado el 802.11b que, usando técnicas DSSS, provee velocidades de 1, 2, 5.5 y 11 Mbps y por otro lado el 802.11a que usando técnicas OFDM en la banda UNII “*Unlicensed National Information Infrastructure*” de 5GHz ofrece velocidades de acceso de hasta 54Mbps. Todas las tramas que utilizan los PHY descritos incluyen una cabecera y un preámbulo PLCP.

El preámbulo se utiliza por el receptor para adquirir la señal entrante y sincronizar con el demodulador. La cabecera PLCP contiene información acerca del paquete MAC transmitido, tal como la duración o la velocidad de transmisión utilizada. La información incluida depende del PHY utilizado. El conjunto de cabecera PLCP, preámbulo PLCP y paquete MAC, llamado MPDU “*MAC Protocol Data Unit*”, conforma lo que se llama PHY “*Protocol Data Unit*” PPDU. Es importante destacar que la cabecera y preámbulo PLCP se transmitan siempre a 1Mbps para que todas las estaciones que cumplan el estándar sean capaces de decodificarlos y analizarlos.

2.7.6. Control de acceso al medio MAC.

El control de acceso al medio conocido por las siglas MAC, del inglés “*Media Access Control*” es el conjunto de mecanismos y protocolos de comunicaciones a través de los

cuales varios interlocutores “*dispositivos en una red*”, como computadoras, teléfonos móviles se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común por lo general, un cable eléctrico o fibra óptica, o en comunicaciones inalámbricas el rango de frecuencias asignado a su sistema. Es un concepto distinto que la multiplexación, aunque esta última es una técnica que pueden utilizar los mecanismos de MAC.

El estándar IEEE 802.11 define nueve servicios MAC “*Medium Access Control*”. Seis de estos servicios están destinados a la transmisión de paquetes MSDUs entre STA “*estaciones*”. Los tres servicios restantes se utilizan para controlar el acceso a la LAN 802.11 y para proporcionar confidencialidad a la transacción de datos. Los servicios son: entrega de MSDUs “*MSDU delivery*”, distribución, integración, asociación, reasociación, desasociación, autenticación, desautenticación y privacidad. Algunos de estos servicios van ligados a la funcionalidad de las STA mientras que el resto están asociados a la funcionalidad del DS. Cada uno de estos servicios está soportado por una o más tramas de tipo MAC. Algunos de ellos son soportados por tramas MAC de gestión “*management*” y otros por tramas MAC de datos.

El protocolo MAC del estándar IEEE 802.11 distingue tres tipos de tramas: tramas de control, de datos y de gestión “*management*”. Los mensajes de gestión se utilizan para soportar los servicios de 802.11. Los mensajes de control se utilizan para la correcta entrega de tramas y los mensajes de datos transportan la información de los usuarios.

El método básico de acceso al medio del protocolo MAC 802.11 es la llamada DCF “*Distributed Coordination Function*” basada en CSMA/CA “*Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance*” y se utiliza tanto en redes en modo infraestructura como en redes ad-hoc. También se puede incluir de forma opcional la llamada PCF “*Point Coordination Function*”, que tan sólo se puede utilizar en redes conectadas en modo infraestructura.

2.7.7. PLASA E1.45 DMX- 512A VLC.

PLASA es el organismo internacional que vela por los intereses de sus miembros y trata de influir en las prácticas comerciales y el desarrollo de competencias a través de la industria. PLASA posee y administra los PLASA Show y PLASA Focus eventos y publica revistas líderes en la industria de iluminación y sonido internacional así como sus protocolos.

PLASA juega un papel clave en la elaboración de normas con el objetivo de crear consenso de la industria sobre las mejores prácticas técnicas y de negocios. Expertos en la materia participan en el desarrollo de estas normas, muchos de los cuales son utilizados por la industria de todo el mundo.

PLASA E1.45 DMX-512A VLC está encargada de la comunicación de datos en la luz visible y la transferencia entre la iluminación LED y un servidor de control. En América del Norte, PLASA lidera el ANSI acreditado Programa de Normas Técnicas (creado por ESTA), que es responsable del desarrollo de las normas y prácticas recomendadas que facilitan el uso de equipos nuevos y existentes y promover condiciones de trabajo seguras en la industria. Bajo el TSP, PLASA facilita una serie de grupos de trabajo liderados por la industria se centran en los protocolos de control, energía eléctrica, la niebla y el humo, cañón de seguimiento de posición, fotometría, entre otros.

En Europa, la organización trabaja en estrecha colaboración con la BSI en el Reino Unido y el CENELEC en Europa para apoyar el desarrollo de normas para la industria. A nivel mundial, PLASA es un elemento clave para el desarrollo de normas internacionales ISO y tiene numerosos representantes que forman parte de los organismos de normalización de decisiones.

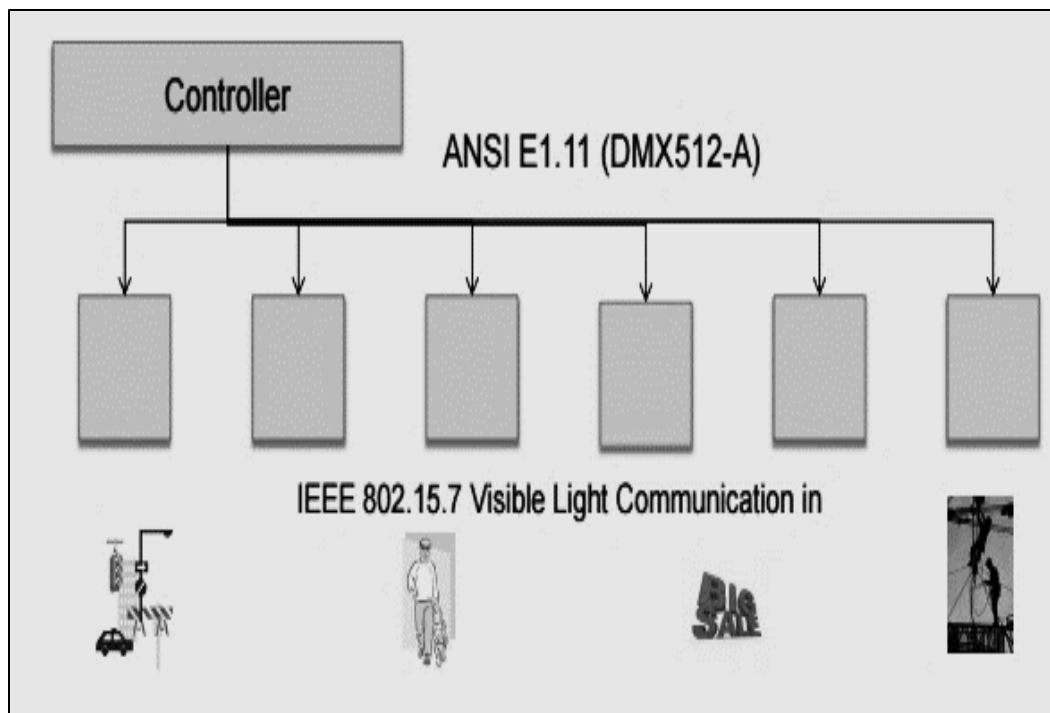


Figura 27. Transporte unidireccional de ANSI E1.11 (DMX512-A)

Fuente: Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012.

El transporte unidireccional en la figura 27 ANSI E1.11 (DMX512-A), la norma define los métodos para el transporte en la IEEE 802, la motivación principal es permitir la comunicación de los datos de 802 para las luminarias como los que se utilizan en la Comunicación por medio de luz visible.

2.7.8. LED iluminación del motor zhaga.

Motor de zhaga aplica a las fuentes de iluminación LED de encendido y apagado con esta conmutación se puede controlar el uso de redes inalámbricas: ZigBee, IrDA, Bluetooth y Wi-Fi. A medida que la tecnología LED continúa su rápido avance, zhaga se ha fundado con la esperanza de que la normalización de las interfaces de motores de luz LED impedirá la fragmentación del mercado en soluciones incompatibles.

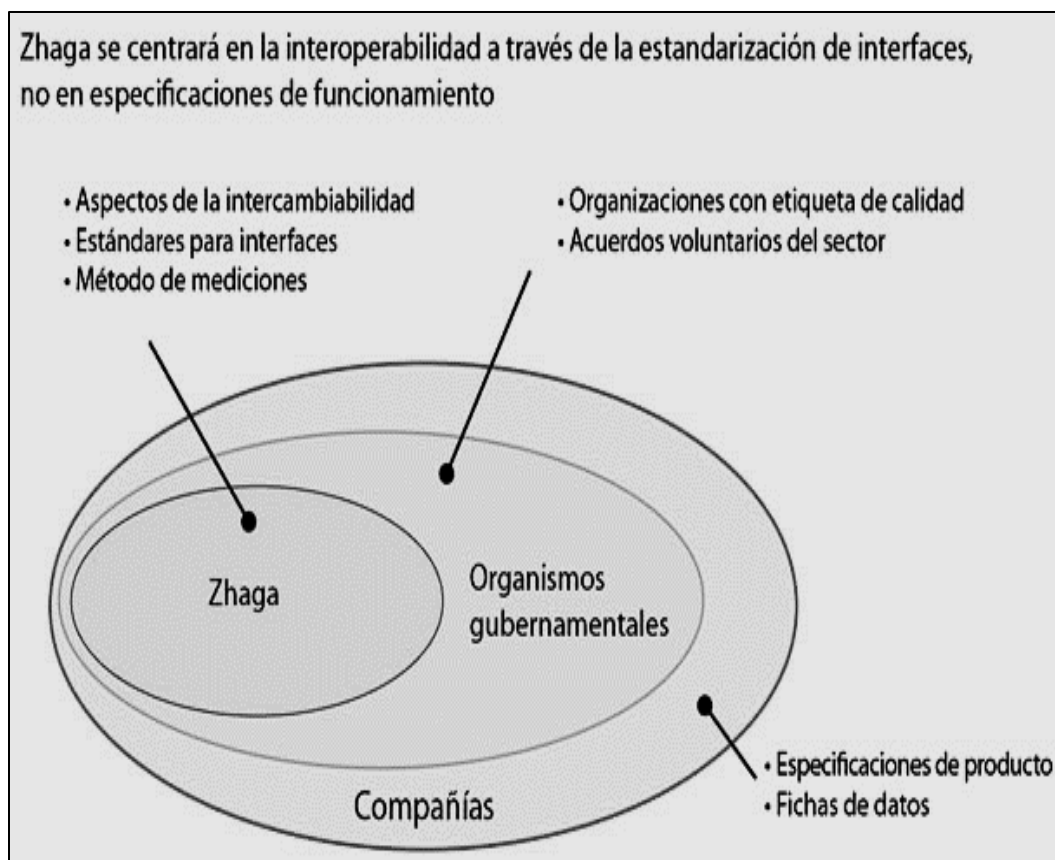


Figura 28. Modelos de Iluminación led Zhaga

Fuente: Komine & Nakagawa, 2004.

La capacidad de intercambio se obtiene mediante la definición de interfaces para una serie de motores de luz específicos para ciertas aplicaciones. Los estándares de zhaga ver figura 28 cubren las dimensiones físicas así como el comportamiento fotométrico, eléctrico y térmico de los motores de luz LED, proporcionarán a los consumidores y profesionales la confianza para especificar y adquirir productos LED que se pueden sustituir fácilmente y que estén comercialmente disponibles, a la vez que disfrutarán continuamente de las mejoras de rendimiento que proporciona la tecnología LED. Esto ayudará a acelerar la innovación y a aumentar la competencia en la aplicación de la iluminación LED en general.

2.8. Estándar de modulación VLC

La IEEE 802.15.7 VLC tiene tres diferentes capas físicas las cuales dependen de la aplicación estas se definen como PHY I, PHY II, PHY III.

- PHY I está diseñado para el uso de exteriores con aplicaciones que dispongan de datos a baja velocidad (Siddique & Thair, 2011). Este modo utiliza OOK “*on-off keying*” y la modulación variable por posición de impulso VPPM con velocidades de datos de decenas a cientos de kb/s.
- PHY II está destinado al uso en interiores con las aplicaciones de velocidad de datos moderado. Este modo utiliza OOK y VPPM con velocidades de datos en las decenas de Mb/s.
- PHY III está diseñado para aplicaciones que utilizan modulación por desplazamiento de color CSK que tienen múltiples fuentes de luz y detectores con velocidades de datos en las decenas de Mb/s.

2.8.1. Modelo PHY I.

Se aplica el modelo en ambiente de exteriores con una velocidad baja de transmisión de decenas a cientos de Kb/s, estableciendo un rango desde los 11,67 kb/s a 267,6 Kb/s. Para lo cual mostramos un diagrama de bloques en la figura 29 que representa el transmisor y receptor utilizando el modelo PHY I.

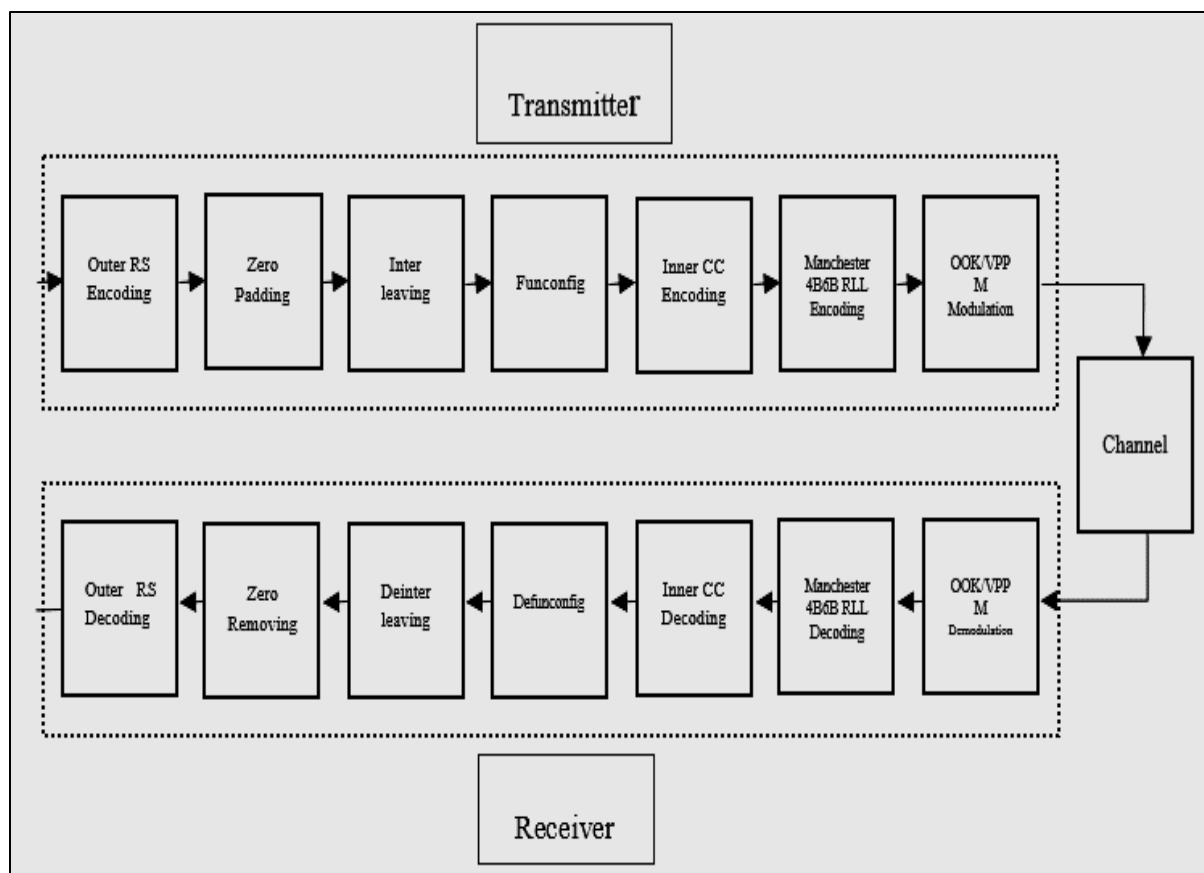


Figura 29. Modelo PHY I estándar IEEE 802.15.7

Fuente: Wang & Zhong, 2012.

Siendo la entrada de los bits utilizando la codificación denominada RS “*Reed Salomon*”, codificando K símbolos que son palabras de código a mensajes teniendo como consecuencia cada una n símbolos, para posteriormente hacer un relleno de ceros, teniendo como resultado la intercalación pasando por un codificador convolucional.

Luego se pasa por un codificador RLL aplicado Manchester o 4B6B, teniendo a la salida un símbolo formado por 2,4 o 6 bits respectivamente. Finalmente pasa por el módulo OOK o VPPM y se envía por un canal con una sola fuente de luz (Wang & Zhong, 2012).

Tabla 2:

Comportamiento del modelo PHY I

Modo de operación	Velocidad de datos	Modulación	Código RLL	Velocidad de reloj óptico	Codigo exterior	Codigo interior
PHY I.a	11.67 kb/s				15.7	1/4
PHY I.b	24.44 kb/s				15.11	1/3
PHY I.c	48.89 kb/s	OOK	Manchester	200 kHz	15.11	2/3
PHY I.d	73.3 kb/s				15.11	Ninguno
PHY I.e	100 kb/s				Ninguno	Ninguno
PHY I.f	35.56 kb/s				15.2	Ninguno
PHY I.g	71.11 kb/s	VPPM	4B6B	400 kHz	15.4	Ninguno
PHY I.h	124.4 kb/s				15.7	Ninguno
PHY I.i	266.6 kb/s				Ninguno	Ninguno

Nota. Fuente: Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012.

En el receptor se recupera la información utilizando un detector de umbral, esta información se demodula por OOK o VPPM dependiendo de lo que se utilizó en la modulación. Se realiza procesos inversos a los de modulación es decir, se pasa por un decodificador de RLL luego por un desintercalador RS para recuperar y obtener la información enviada (Wang & Zhong, 2012). En la tabla 2 se describe el comportamiento del modelo PHY I aplicando diferentes velocidades y modulaciones.

2.8.2. Modelo PHY II.

Este modelo se utiliza en ambientes internos con una velocidad media que va en las decenas de Mb/s. Es decir una velocidad desde 1,25 Mb/s hasta 96 Mb/s. Podemos visualizar en la figura 30 el diagrama de bloques del modelo PHY II en el estándar IEEE 802.15.7.

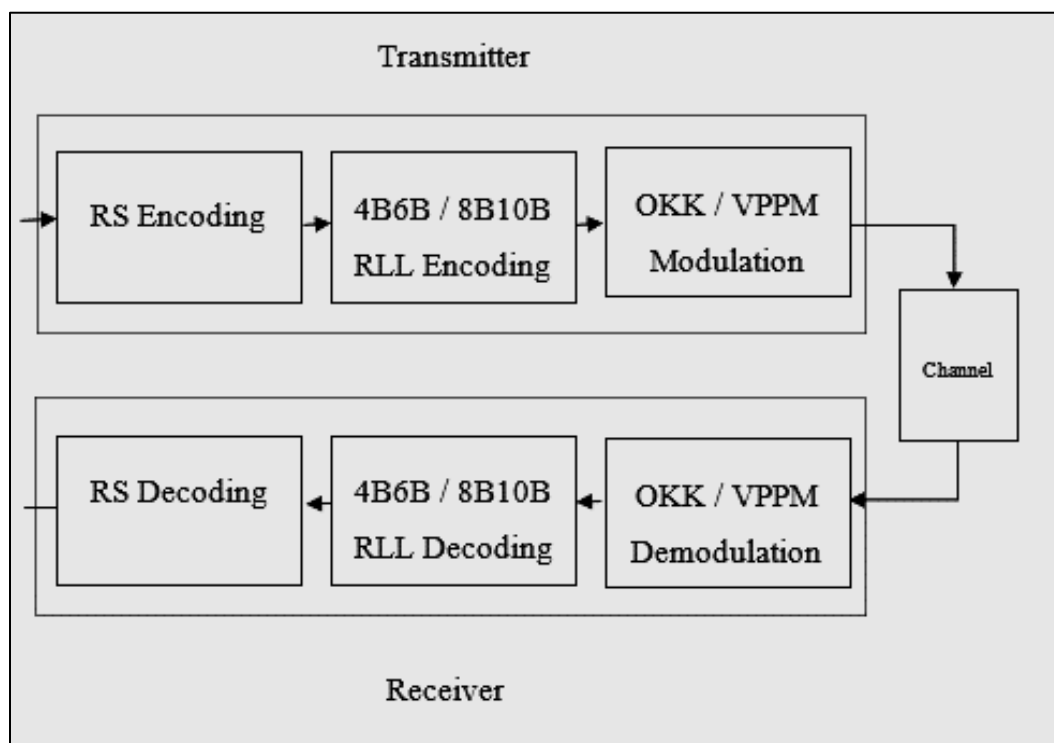


Figura 30. Modelo PHY II estándar IEEE 802.15.7

Fuente: Panta & Armstrong, 2012.

Este esquema es mucho más sencillo y eficiente comparado con el modelo PHY I, de igual manera los bits de entrada son codificados por un codificador RS “*Reed Salomon*”, la salida de esta codificación ahora pasa por un codificador RLL donde el símbolo estará formado por 2,4,6,8 bits como se desee. Finalmente en el transmisor se modulara como en el modelo PHY I con OOK o VPPM. Esto determina que es una comunicación SISO, es decir se envía la información por un solo Led (Panta & Armstrong, 2012).

Tabla 3:
Comportamiento del modelo PHY II

Modo de operación	Velocidad de datos	Modulación	Código RLL	Velocidad de reloj óptico	FEC
PHY I.a	1.25 Mb/s	VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)
PHY I.b	2 Mb/s				RS(160,128)
PHY I.c	2.5 Mb/s				RS(64,32)
PHY I.d	4 Mb/s			7.5 MHz	RS(160,128)
PHY I.e	5 Mb/s				Ninguno
PHY I.f	6 Mb/s				RS(64,32)
PHY I.g	9.6 Mb/s	OOK	8B16B	15 MHz	RS(160,128)
PHY I.h	12 Mb/s				RS(64,32)
PHY I.i	19.2 Mb/s			60 MHz	RS(160,128)
PHY I.j	24 Mb/s				RS(64,32)
PHY I.k	38.4 Mb/s			120 MHz	RS(160,128)
PHY I.l	48 Mb/s				RS(64,32)
PHY I.m	76.8 Mb/s	RS(160,128)			
PHY I.n	96 Mb/s			Ninguno	

Nota. Fuente: Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012.

Para recibir la información se demodula con OOK o VPPM y pasa por los decodificadores RLL y RS respectivamente para recuperar la información enviada. Podemos ver en el tabla 3 el comportamiento de este modelo sometido a diferentes pruebas.

2.8.3. MODELO PHY III.

Este a diferencia de los anteriores modelos trabaja bajo un sistema MIMO múltiples entradas con múltiples salidas. Ofreciendo velocidades con un rango que va desde 12 Mb/s hasta 96 Mb/s. Este modelo podemos utilizar en aplicaciones con muchas fuentes de luz por donde se enviara la información al mismo tiempo que tendrá múltiples receptores de luz los captara y recibirán las señales emitidas. Podemos visualizar en la figura 31 el diagrama de bloques del modelo PHY III en el estándar IEEE 802.15.7.

De igual manera pasamos por un bloque de codificación de RS el cual servirá para convertir la cadena de bits en tramas largas más pequeñas y aleatorias, para luego ser nuevamente codificadas por un codificador RS. La diferencia radica en la modulación CSK que se refiere a una modulación mediante incrustación de color.

El espectro de luz se divide en 7 grupos, cada uno de ellos tiene un código específico, teniendo un valor en x-y respectivamente. La modulación CSK lo que hace es trabajar con 3 de estos 7 grupos, con los puntos respectivos en x-y, formar los vértices del triángulo y así formar las constelaciones que son necesarias.

Los datos que ingresan para ser modulados son analizados en $\log(M)$ donde M representa el tamaño de la modulación. Cada uno de estos valores tiene una posición x-y cada tres valores van formando los vértices del triángulo que son las constelaciones, para luego estos

puntos ser pasados a valores RGB, se normalizan las intensidades de los Leds y se puede enviar la información (Lee & Park, 2011).

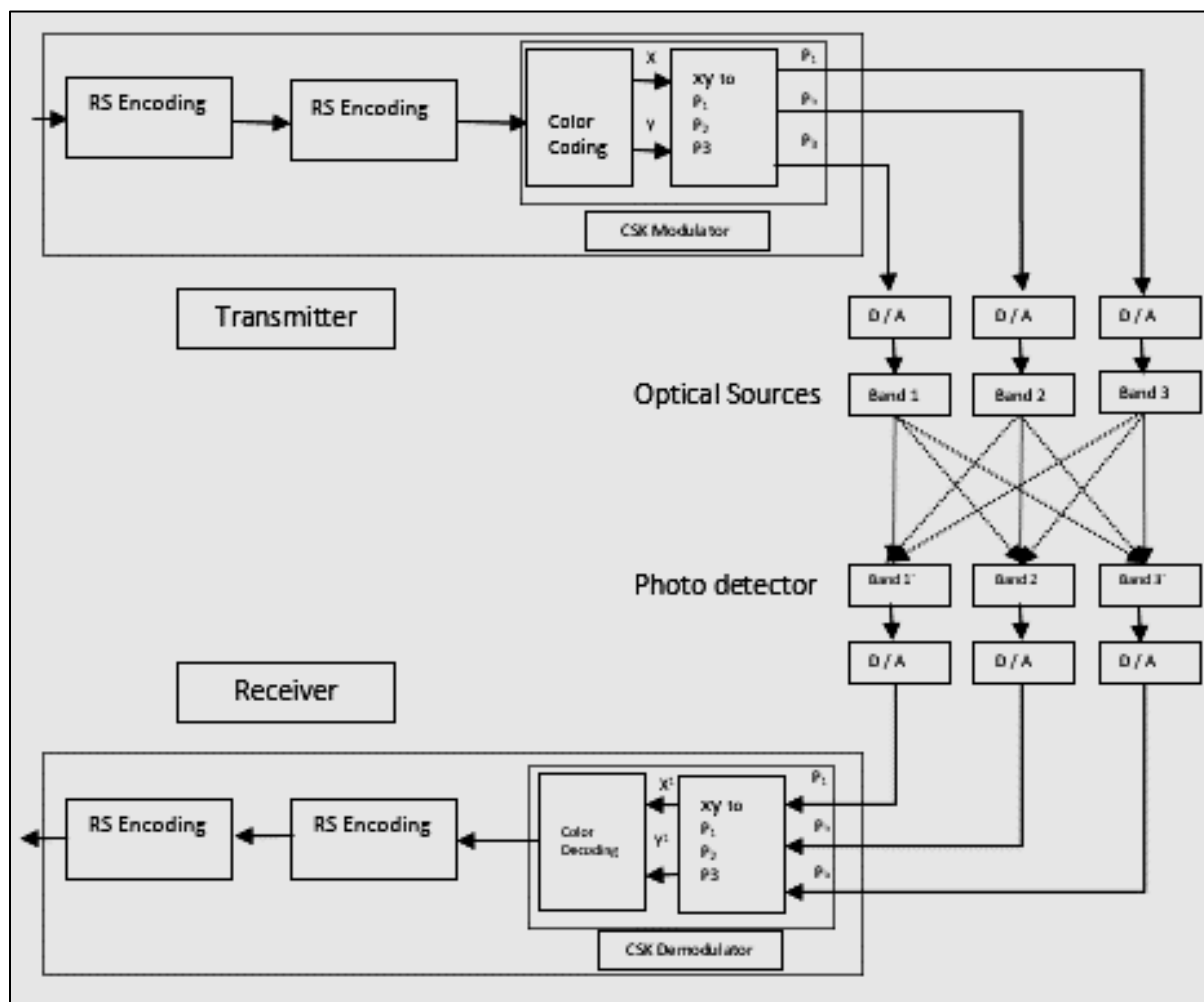


Figura 31. Modelo PHY III estándar IEEE 802.15.7

Fuente: Panta & Armstrong, 2012.

Para el receptor se tiene tres fotos receptores donde cada uno va a detectar un color diferente ya que tiene tres longitudes de ondas distintas que da cada color. Entonces se procede a ser un trabajo inverso al transmisor es decir la intensidad receptada son inversamente asignadas a los valores de $x-y$, con la ayuda de un detector de distancia mínima corregir y determinar los valores de $x-y$, con la ayuda de un detector de distancia mínima corregir y determinar los verdaderos símbolos de cada constelación y finalmente pasar por un decodificador

RS y obtener la información enviada (Fath & Hass, 2013). Podemos ver en el tabla 4 el comportamiento de este modelo sometido a diferentes pruebas.

Tabla 4:
Comportamiento del modelo PHY III

Modo de operación	Velocidad de datos	Modulación	Velocidad de reloj óptico	FEC
PHY I.a	12 Mb/s	4-CSK	12 Mhz	RS (64,32)
PHY I.b	18 Mb/s	8-CSK		RS (64,32)
PHY I.c	24 Mb/s	4-CSK		RS (64,32)
PHY I.d	36 Mb/s	8-CSK	24 Mhz	RS (64,32)
PHY I.e	48 Mb/s	16-CSK		RS (64,32)
PHY I.f	72 Mb/s	8-CSK		Ninguno
PHY I.g	96 Mb/s	16-CSK		Ninguno

Nota. Fuente: Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012.

2.8.4. Modulación variable por posición de pulso VPPM.

La comunicación por luz visible necesita una estrategia de modulación que le permita tener un control de oscurecimiento de la iluminación, siendo la modulación variable por posición de pulsos VPPM.

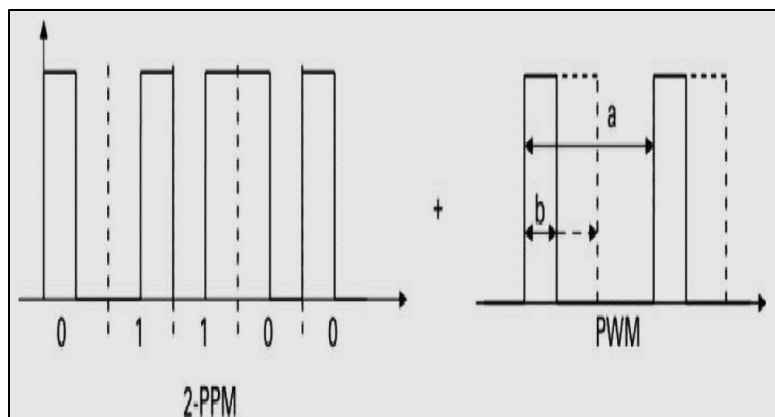


Figura 32. Principio de modulación variable por posición de impulso VPPM

Fuente: Wang & Zhong, 2012.

Es compatible con el control de atenuación ya que esta varía el ciclo de trabajo o anchura de pulsos para lograr la atenuación. VPPM combina PPM con PWM para el control de regulación. Los bits “1” y “0” en VPPM se distinguen por la posición de un pulso, determinando el ancho del pulso por la relación de atenuación (Wang & Zhong, 2012). Este principio se ilustra en la figura 32.

2.8.5. Línea de codificación.

El código de línea 4B6B expande cada bloque de cuatro bits en un bloque codificado de seis bits con equilibrio DC. Esto significa que siempre habrá exactamente tres ceros y tres unos en cada bloque de seis bits codificados.

2.8.6. VLC estándar de transmisión de datos.

Hay dos tipos de transmisión de datos de la comunicación de la luz visible. Uno de datos es fijo, y el otro es de datos variables dentro de la iluminación para la comunicación de la luz visible. Los datos variables se pueden cambiar de acuerdo con los protocolos de transmisión por cable y protocolos de transmisión inalámbrica.

2.8.7. Protocolo de transmisión con cable.

Existen dos tipos de protocolos de transmisión de datos de comunicación de luz visible por cable los cuales están representados en el cuadro 5 los cuales son: PLASA E1.45 DMX- 512A VLC y IEC 62386 DALI VL. PLASA E1.45 DMX- 512A VLC puede ser utilizado para la transmisión de datos en publicidad de exterior en las fachadas con iluminación LED (Siddique & Thair, 2011).

Tabla 5:

Protocolo de transmisión por conexión de cable para luz visible

Especificación del estándar	Organización	funciones
E1.45 DMX-512 ^a VLC	PLASA	DMX512-A enlace de datos para transmisión de datos de aquellas luminarias que utilizan la luz visible la comunicación, IEEE 802.15.7
IEC 62386 DALI	IEC TC 34	Un protocolo para el control por las señales digitales de aparatos de iluminación electrónica

Nota. Fuente: Siddique & Thair, 2011.

La Comisión Electrotécnica Internacional IEC es la organización mundial que prepara y publica estándares internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas, IEC 62386 interfaz direccionable de iluminación digital DALI especifica un protocolo para el control por señales digitales de iluminación en equipos electrónicos. DALI se puede utilizar para el control de atenuación de iluminación de interior.

2.8.8. Protocolo de transmisión inalámbrica.

Existen protocolos complementarios para la transmisión inalámbrica: ZigBee, IrDA, Bluetooth y LAN inalámbrica, debido a la comunicación unidireccional en el sistema VLC es necesario mantener habilidades adicionales como por ejemplo en ZigBee que se encuentra definida en IEEE 802.15.4, se utiliza en aplicaciones que requiere una baja tasa de datos en redes seguras con una velocidad de transmisión de 250 kbit/s. ZigBee puede ser utilizado para interruptores inalámbricos, incluyendo controles de regulación manteniendo una batería de larga duración.

2.9. Estándar de iluminación VLC

La ventaja que tiene la comunicación por luz visible es la utilización de la iluminación LED como medio de transmisión utilizando la infraestructura tradicional como canal de transmisión la cual ya tenemos instalado. La norma TC 34 que fue establecida en 1948 se encuentra preparando normas internacionales para la utilización de lámparas y otros dispositivos relacionados.

2.9.1. Interfaz de origen de iluminación led.

El consorcio internacional Zhaga se encuentra desarrollando las especificaciones para la interfaz la cual permita realizar la intercambiabilidad de fuentes de luz led entre diferentes fabricantes. Zhaga en su resumen de normativa ya describe las interfaces entre luminarias led y motores de luz led, permitiendo acelerar la adopción de soluciones de iluminación led en el mercado.

La comunicación por luz visible utiliza la luz led, cuando desarrollamos una comunicación con luz visible integrando PHY a un servicio de aplicación debemos considerar las especificaciones del módulo zhaga LED.

2.9.2. Interfaz de sistema led de iluminación inteligente.

La comisión TC 34 del comité internacional de electrotecnia ha sido el desarrollador de normas en materia de especificaciones técnicas para lámparas LED, incluyendo portalámparas, equipos de control de luz, luminarias y otros equipos que no han sido cubiertos en proyectos en otros comités técnicos. IEC TC 34 todavía no tiene desarrollado las especificaciones técnicas para la comunicación de la luz visible ya que es necesario combinar la misma iluminación con la comunicación inalámbrica utilizando luz.

La IEC TC 34 con la integración de un grupo especial encargado de analizar el sistema inteligente de iluminación se reunió por primera vez en enero del 2014, teniendo como misión el lograr la convergencia entre la industria de la iluminación tradicional con las tecnologías de información y las comunicaciones TICs.

Se representa en la figura 33 que la comunicación con tecnología Wireless puede adaptarse utilizando ZibBee, Bluetooth, IrDA e inalámbrico LAN de acuerdo a los requerimientos técnicos de la aplicación, siendo introducido las funciones de la iluminación LED como parte de las comunicaciones inalámbricas o por cable. La comunicación con luz visible requiere el desarrollo de los estándares en luminarias con la cooperación de otras tecnologías de la informática como la comunicación inalámbrica.

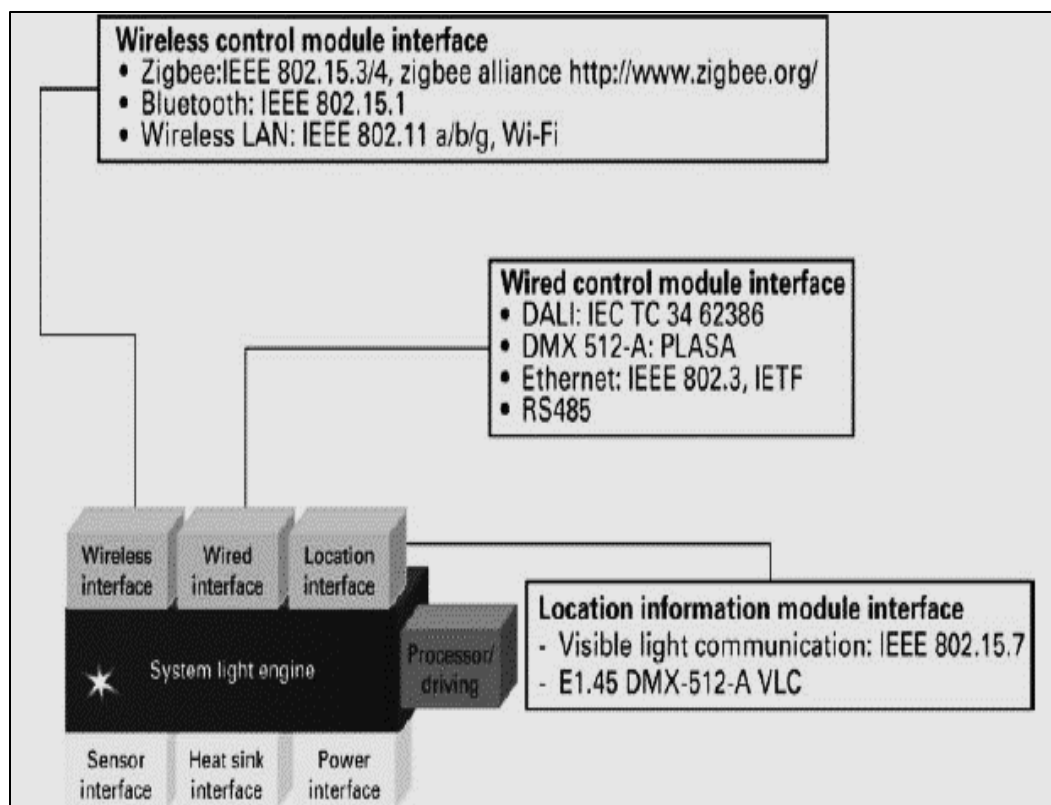


Figura 33. Motor de luz led con sistema de comunicación de la luz visible

Fuente: Siddique & Thair, 2011

2.9.3. Estándar de servicio VLC.

Se encuentra las normativas para la comunicación con luz visible en los estándares IEEE 802.15.7, IEC TC 34, PLASA CPWG, TTA VLC WG, VLCC y UIT-T SG 16. Se puede incluir como aplicaciones de comunicación con luz al sistema de orientación VLC, navegador de interiores VLC, sistemas de apoyo a la conducción de automóviles VLC, sistema de guía VLC el cual utiliza lámparas para iluminar el patio, en instalaciones para orientación.

Un navegador de interior VLC utiliza lámparas con luz visible para la comunicación, las áreas de ventas en lugares donde no se admite GPS. Un automóvil VLC como

sistema de apoyo utiliza lámparas incluyen los faros antiniebla, intermitentes, y freno luces para una conducción segura.

El grupo de trabajo de VLC denominado WG4021 desarrollo cinco especificaciones de estándar VLC en el 2008 los cuales abarcan las configuraciones básicas del transmisor PHY para la comunicación con luz visible, configuraciones básicas para el receptor PHY para la comunicación con luz visible, configuración básica del interfaz LED para la iluminación con luz visible, configuración básica para servicios de localización que usan comunicación con luz visible y la configuración básica para la identificación de la comunicación con luz visible.

También se desarrollaron normas relacionadas con el control en el 2013 a cargo del grupo VLC WG4021 denominado TTA 23. Las ocho especificaciones se centran en la manera de poder combinar la comunicación con luz visible conjuntamente con las tecnologías de iluminación. La comunicación con luz visible nos pueden ofrecer servicios creativos pero aún no se han desarrollado las normas pertinentes, sin embargo, la especificación PHY VLC en IEEE 802.15.7 Y VLC en PLASA E1.45 están disponibles.

Para lograr una apertura del mercado en comunicación con luz visible es necesario proporcionar una guía para los usuarios desde el punto de vista de aplicación que mantengan de forma clara sus especificaciones técnicas y estándares de servicio.

2.10. Problemas de sincronización en VLC

En un futuro muy cercano se prevé que la comunicación por luz visible se convierta en la tecnología de iluminación y comunicación que se encuentre involucrado ya en el círculo familiar, en las oficinas, carretas e incluso los juguetes. Con el aumento exponencial de la

velocidad de transmisión inalámbrico por medio de luz visible denota una amplia gama de aplicaciones. En la industria de semiconductores también se encuentra desarrollando fuentes de luz que podrían proporcionar una alta velocidad de datos, teniendo como prioridad aumentar la velocidad abre la necesidad de incluir nuevos métodos de modulación para poder satisfacer la necesidad particular de mantener una iluminación y comunicación de forma simultánea.

Para lograr extraer la información transmitida llamado demodulación de la señal es necesario mantener una sincronización muy estricta, para lograr esto se presenta para el VLC cinco métodos de modulación que son:

- OOK (*on off keying*)
- PPM (*pulse position modulation*)
- VPPM (*variable pulso position modulation*)
- BER (*bit error rates*) que nos describe la tasa de error de bit
- IPPM (*inverse pulse position modulation*)

Si bien el sistema VLC en principio es relativamente fácil ya que el transmisor necesita una señal eléctrica la cual es convertida en señal óptica modulada por la fuente de luz y llevado al receptor por la luz que ilumina, para realizar este proceso es necesario mantener métodos de modulación que nos permitan encapsular la información dentro de la luz, estos métodos podemos dividirlo e tres familias que son:

- **Color de iluminación**
CSK (*color shift keying*)
- **Subportadoras**
DMT (*digital multi tone*)

OFDM (*ortogonal frequency división multiplexing*)

- **Intensidad medido en el dominio del tiempo**

OOK (*on off keying*)

PPM (*pulse position modulation*)

IPPM (*inverse pulse position modulation*)

VPPM (*variable pulse position modulation*)

Estos métodos nos dan la posibilidad de lograr el uso de la luz como una herramienta para llevar la información de una manera relativamente sencilla. Sin embargo, el método de modulación de intensidad medido en el dominio del tiempo es extremadamente sensible a la sincronización del tiempo y la fluctuación de la fase de reloj.

2.10.1. Métodos de modulación de VLC en el dominio del tiempo.

Describimos con más detalle cuatro métodos de modulación diferentes que encapsulan la información en el dominio del tiempo para la comunicación de luz visible. La principal diferencia entre los escenarios de comunicación convencionales y VLC es el requisito de mantener el rendimiento de comunicación adecuada, junto a la necesidad de atenuar la intensidad de la luz. Ahora revisamos a) OOK, b) PPM, c) IPPM, y d) VPPM.

2.10.2. ON OFF KEYING OOK.

Este tipo de modulación consiste en suministrar al diodo láser una corriente I_{ON} , superior a la corriente umbral del diodo láser para que tenga lugar la radiación, cuando se desea emitir el bit "1" (Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012). En caso de transmitir el bit "0" la potencia óptica emitida por el láser debe ser nula, por lo que la corriente aplicada I_{OFF} , debe ser menor que el umbral. Emplear una

corriente I_{OFF} próxima a cero tiene como ventaja que la potencia residual asociada a los bits "0" debida a las emisiones espontáneas es mínima, incrementando el cociente de extinción y por tanto reduciendo la probabilidad de error (Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012).

Existen aplicaciones en las que el diodo láser debe genera unos pulsos ópticos muy estrechos, cuya duración sea menor que el intervalo entre pulsos consecutivos (Lee & Park, 2011). En esta situación se aplica al láser un pulso de corriente que durante un breve intervalo de tiempo este por encima de la corriente umbral para la oscilación del láser. Este modo de operación se denomina conmutación de la ganancia (Lee & Park, 2011).

On keying off (OOK) también conocida como modulación binaria es una forma de modulación de señal binaria en la que un bit se codifica por transmisión de energía óptica de T segundos si la información es " 1 ", mientras que cuando la información es " 0 ", no se transmite energía óptica en el T-segundo de intervalo de tiempo (Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012).

Atenuación de la luz se implementa mediante la reducción de la energía del pulso transmitido de acuerdo con el porcentaje de atenuación requerida, denota en la figura 34 la forma más sencilla de modulación ASK que representa datos digitales con la presencia o ausencia de una señal portadora.

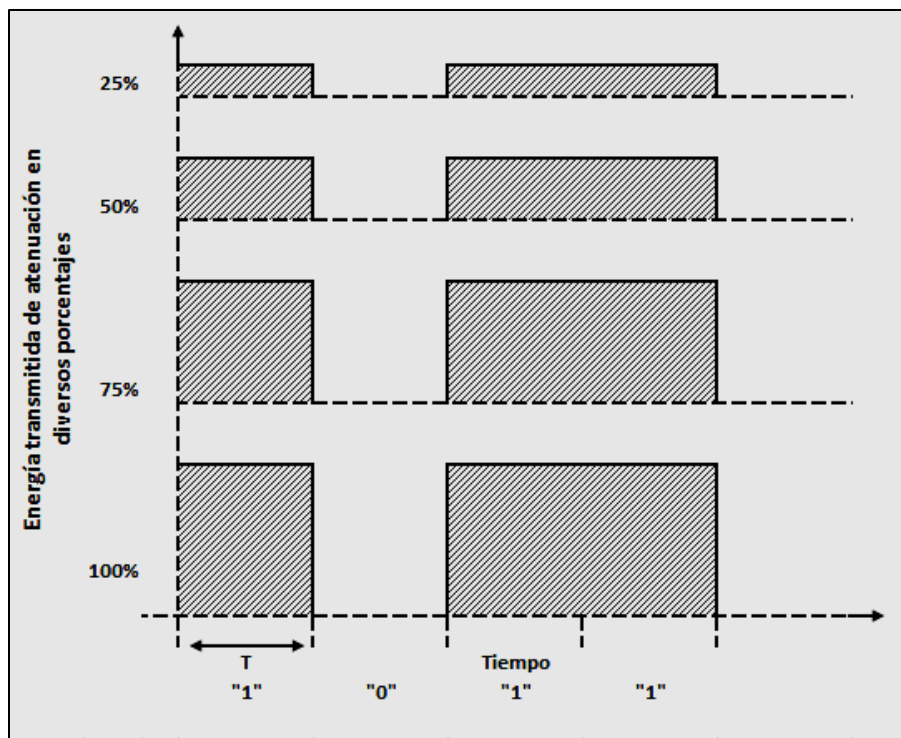


Figura 34. OOK con diferentes porcentajes de atenuación, donde la información codificada es "1 0 1 1"

Fuente: Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012.

2.10.3. Modulación por posición de pulso PPM.

La modulación PPM es una modulación digital cuya señal de salida es una señal binaria en la cual la posición de los valores lógicos altos depende del valor de la señal de entrada, en PPM la muestra analógica determina la posición de un pulso estrecho relativo al tiempo de sincronización. La modulación por posición de pulso PPM en donde la amplitud y el ancho son fijos y la posición variable es una forma de modulación de la señal en la que M bits es codificada por la transmisión de un único pulso que puede encontrarse en alguna de las $2^M = N$ posiciones posibles, donde N corresponde al tipo de modulación PPM (N -PPM).

Si esto se repite cada X segundos (tiempo de símbolo), la tasa de transmisión es de M/X bits por segundo (Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012). La atenuación de la luz

se implementa mediante la reducción del impulso transmitido de acuerdo con el porcentaje de atenuación requerida. Este sistema se utiliza donde tiende a haber poca o ningún tipo de interferencia por caminos múltiples. En la figura 35 podemos verificar el comportamiento de (PPM) aplicando diferentes porcentajes de regulación.

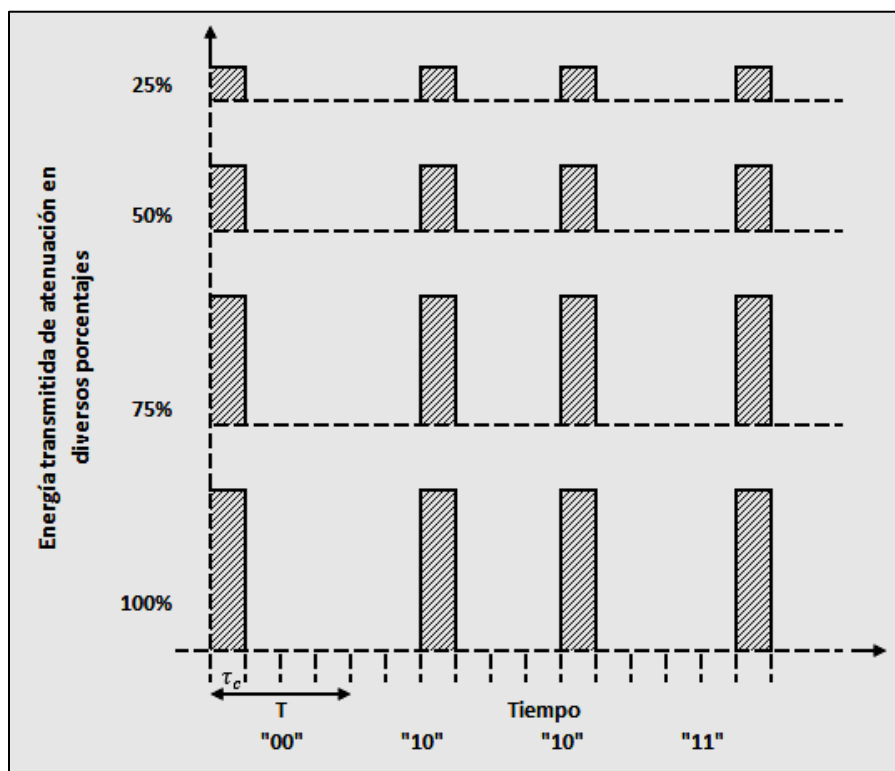


Figura 35. (PPM) con diferentes porcentajes de regulación, donde la información codificada es "00 10 10 11"

Fuente: Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012.

2.10.4. Modulación inversa por posición de pulso IPPM.

Modulación inversa por posición de pulso (IPPM) es una forma de modulación de la señal en la que M bits de mensaje se codifican mediante la transmisión de energía para T segundos, a excepción de una "abertura" en uno de los 2M posibles cambios de tiempos.

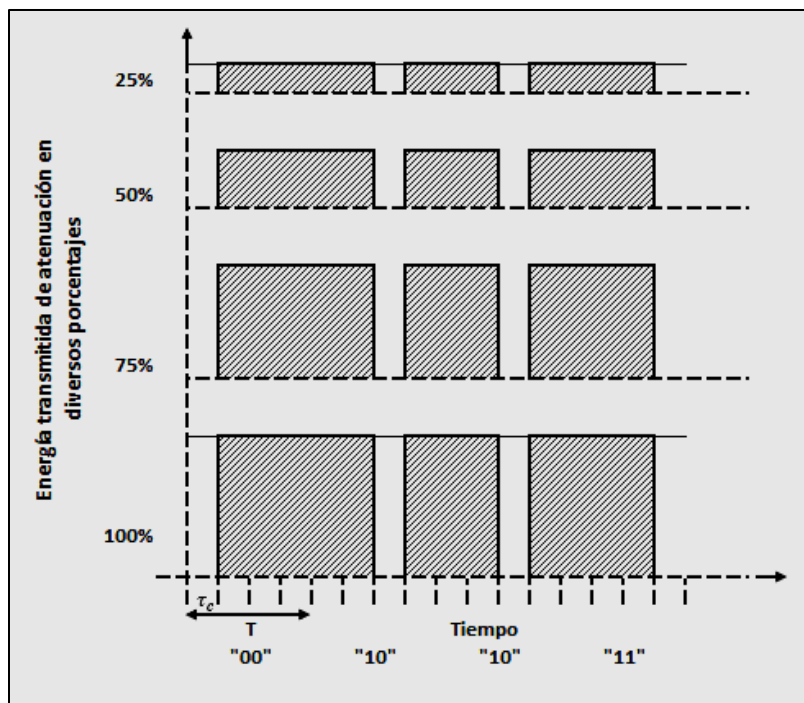


Figura 36. . (IPPM) con diferente porcentaje, donde la información codificada es "00 10 10 11"

Fuente: Arnon, Advanced Optical Wireless Communication Systems, Cambridge University Press, 2012.

La duración de la "abertura" es $TC = T/2M$. Este esquema es repetido cada T segundos, de modo que la tasa de bits transmitida es M/T bits por segundo (Grobe, Paraskevopoulos, & Hilt, 2013). La atenuación de la luz se implementa mediante la reducción de la potencia del pulso transmitido de conformidad con el porcentaje de atenuación requerida. En la figura 36 podemos verificar el comportamiento de (IPPM) aplicando diferentes porcentajes de regulación.

2.10.5. Modulación de posición de pulso variable VPPM.

Modulación por posición variable de pulso VPPM es una forma de modulación de la señal en la que el bit de mensaje se codifica mediante la transmisión de un pulso al comienzo del símbolo para el "0" y al final del símbolo de "1".

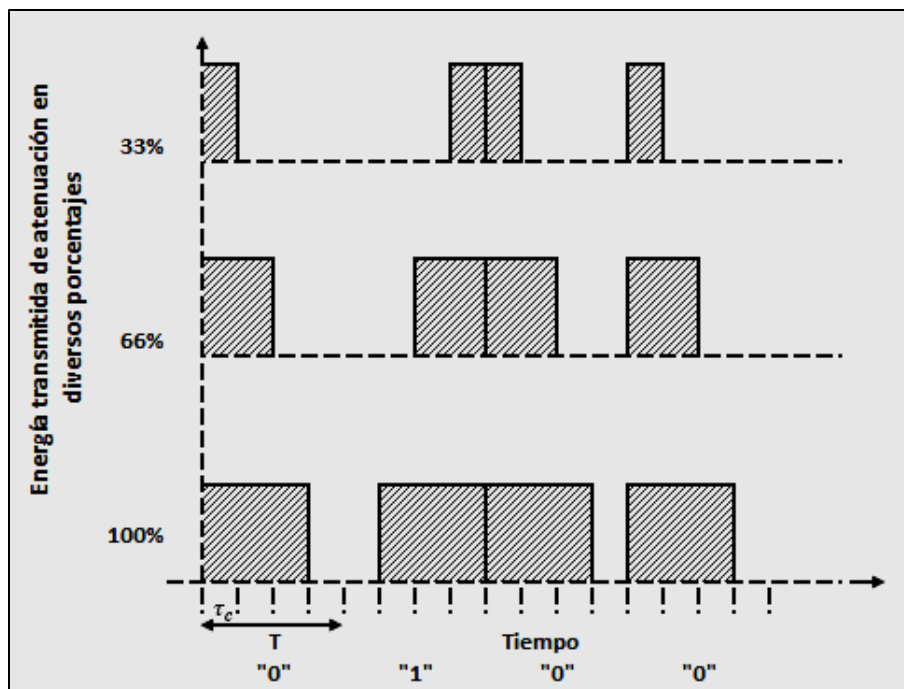


Figura 37. . (VPPM) con diferente porcentaje, donde la información codificada es "0 1 0 0"

Fuente: Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012.

La duración del pulso se determina de acuerdo con el porcentaje de iluminación requerida (oscurecimiento) (Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012). La ventaja principal de este método es que la comunicación no se ve afectada por un cambio de la cantidad de oscurecimiento, siempre y cuando se mantenga cierta iluminación.

Este esquema se repite cada T segundos, de modo que la tasa de bits transmitida es $1 / T$ bits por segundo. En la figura 37 se verifica el comportamiento de VPPM aplicando diferentes porcentajes de regulación.

2.10.6. OOK VER.

OOK es una forma de modulación de intensidad de la señal binaria, que puede ser implementado con receptores de detección directa en la que la potencia óptica se convierte en

señales electrónicas por un fotodetector. La relación de conversión es descrita por responsividad del detector R.

Denotamos la resultante de la señal eléctrica, antes de la toma de decisiones por y, el receptor integra las señales recibidas y la decisión si un “1” o “0” fue transmitido realizando un acuerdo con un criterio algorítmico dado. Supongamos que el ruido eléctrico junto con el ruido de fondo es la fuente de ruido dominante y es modelado por un ruido blanco gaussiano que es estadísticamente independientes entre intervalos de tiempo (Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012).

La media del ruido es cero y la covarianza de σ_1^2 y σ_0^2 para señales 1 y 0, respectivamente. Después de la integración, la señal se describe mediante las siguientes densidades condicionales:

$$P(y| "1") = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} e^{-\frac{(y-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}$$

$$P(y| "0") = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} e^{-\frac{(y-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}}$$

Luego analizamos el “*jitter*” que es la primera consecuencia de un retraso de señal y el análisis de su respectiva compensación llamado “*offset*”, para lo cual es necesario realizar una reorganización de la expresión para la señal y ruido de modo que la señal del bit/símbolo mantenga una duración T, siendo parte de la señal.

La señal es descrita por la raíz cuadrada de la energía de modo que $\mu_1 = \eta_{Dimming} R P_1 T^{0.5}$ y σ_1^2 y $\sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming} R P_1$ son la señal óptica recibida y la desviación estándar del receptor de ruido respectivamente. $\mu_0 = 0$ y $\sigma_0^2 = \sigma_{TH}^2$, es la señal óptica recibida del recetor de

ruido cuando no recibe energía, P_1 representa la potencia óptica, σ_{TH}^2 incluye los ruidos térmicos y de fondo y $\eta_{Dimming}$ es el factor de atenuación de la iluminación si $0 < \eta_{Dimming} \leq 1$.

El algoritmo de decisión en este caso se basa en la máxima probabilidad a posteriori (MAP) criterio, que mapea la señal recibida de acuerdo a lo siguiente:

$$\hat{S} = \underset{s}{MAX} \left\{ \frac{P\left(\frac{y}{s}\right) P(s)}{P(y)} \right\}$$

donde $P(y|s)$ es la probabilidad condicional de que si se transmite un bit s (teniendo uno de los dos valores, 1 ó 0), será recibido a y , $P(s)$ es la probabilidad a priori de que un 1 o un 0 es transmitido y $P(y)$ es la probabilidad a priori de y . El denominador es idéntica para todas las señales y por lo tanto no afecta a la decisión (Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012).

En sistemas de comunicación, las probabilidades de transmisión de 1 y 0 bits son, en la mayoría de los casos, igual, por lo que podemos simplemente invocar a la operación anterior y utilizar el estimador de máxima verosimilitud (ML).

En ese caso, la función de probabilidad viene dada por:

$$\hat{y} = \frac{P(y/on)}{P(y/off)}$$

$$= \frac{\sigma_{TH}}{\sqrt{\sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming}RP_1}} \exp \left(-y^2 \left(\frac{1}{2(\sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming}RP_1)} - \frac{1}{2\sigma_{TH}^2} \right) + \left(\frac{y\eta_{Dimming}RP_1\sqrt{T}}{(\sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming}RP_1)} \right) - \frac{(y\eta_{Dimming}RP_1\sqrt{T})^2}{2(\sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming}RP_1)} \right)$$

En el caso donde $\sigma_{TH}^2 \gg 2q\eta_{Dimming} R P_1$ puede ser simplificada tomando el logaritmo natural, $\ln(x)$, de ambos lados de la ecuación, la cancelación de factores comunes, y reordenación. Debido a la complejidad de esta expresión, es común utilizar una aproximación para la probabilidad de error de bit (BER) dada por:

$$BER \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\eta_{Dimming} R P_1 \sqrt{T}}{\sqrt{2} \left(\sqrt{\sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming} R P_1} + \sqrt{\sigma_{TH}^2} \right)} \right)$$

La solución IPPM fue examinado y demostró que la función apropiada de reloj es crítica con el fin de proporcionar información precisa sincronizada y para conseguir el BER requerido. El objetivo principal en el diseño de VLC es lograr una mayor eficiencia de la iluminación. Sin embargo, en muchos casos la eficiencia disminuye cuando se aumenta la velocidad de conmutación (Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012). En adición, el tiempo de respuesta de los sistemas de iluminación a base de fósforo es bastante lento. Como resultado, la fuente de modulación de la velocidad de la luz es baja y tiene un tiempo de respuesta finita. Estos factores limitan la velocidad de comunicación, pero se prevé que una nueva generación de LEDs podría eliminar estas limitaciones logrando ser modulados a velocidades muy altas hasta 10 Ghz.

2.11. Transmisión de alta velocidad con VLC

La luz blanca más pura se convierte en un objetivo clave para la industria de la iluminación LED y su fabricación se logra mediante la combinación de LEDs que emiten luz en distintos colores de manera que posicionando adecuadamente los pixeles de color rojo, verde y azul (RGB, tricromática) o rojo, amarillo, verde y azul (BGYR, tetracromática), el resultado final

de esta combinación fuera una luz blanca, otra posibilidad para obtener luz blanca es utilizar fósforo para transformar de un LED azul en blanco (YB, dicromática).

Las fuentes de luz blanca RGB y BGYR nos proporciona una fuente de salida deseada para lograr una velocidad alta transmisión sin embargo es necesario la utilización de múltiples LEDs que provoca una distorsión en el color (Komine & Nakagawa, 2004). La combinación (YB, dicromática) en la actualidad es la utilizada para generar luz blanca en dispositivos para la iluminación con VLC de bajo costo.

El tipo de combinación nos proporcionara el ancho de banda para la transmisión, es decir si utilizamos YB LEDs es mucho menor, de unos pocos MHz, esto se debe a la respuesta lenta que produce la capa de fosforo amarillo. Mientras los de tipo RGB y BGYR LEDs nos pueden ofrecer unos 3 dB la modulación del ancho de banda de unos 10 MHz.

Para tener un ancho de banda de algunas decenas de MHz se puede lograr cuando exista la ausencia de la capa de fósforo recibiendo solo el componente azul de la luz y aprovechar de mejor manera la modulación, las técnicas de ecuaciones nos podrían servir para combatir la influencia del fosforo.

La tecnología LED evoluciona en tres categorías:

- LED de fósforo. Se pueden alcanzar velocidades de hasta 40 Mbps.
- LED-RGB. Se pueden alcanzar velocidades de hasta 100 Mbps.
- RCLED o LED de cavidad resonante.

Se pueden alcanzar velocidades de hasta quinientas Mbps. En VLC el canal de luz visible se define por diferentes longitudes de onda que van aproximadamente de 375 nanómetros

(color violeta) a 750 nanómetros (color rojo) o bien por el intervalo de frecuencias que va aproximadamente desde 400 THz. (color rojo) a 800 THz. (color violeta) (Siddique & Thair, 2011). La tecnología VLC es una categoría de las tecnologías OWC “*Optical Wireless Communications*” que incluye además a la tecnología IR “*Infra Red*” y a la tecnología UV “*Ultra Violet*”.

Cabe señalar que además de los LEDs (inorgánicos) comúnmente utilizados en sistemas de iluminación, existen también los OLEDs (orgánicos) que se basa en una capa electroluminiscente formado por una película de componentes orgánicos que reaccionan a una determinada estimulación eléctrica, generando y emitiendo luz por sí mismo, convirtiéndose en atractivo para la sustitución de las fuentes luminosas para grandes áreas, estos sistemas de iluminación orgánicos también son considerados en VLC, sin embargo ofrecen una modulación de ancho de banda inherente en un intervalo aproximado de 100 kHz y por lo tanto no son de interés en esta investigación.

2.11.1. Consideraciones para una modulación de alta velocidad.

Con el objetivo de poder desarrollar sistemas de comunicación inalámbrico por luz visible de una forma simple y de bajo costo es importante elegir formatos de modulación digital simples como OOK con su acrónimo en inglés “*on-off-keying*”, la modulación por ancho de pulsos conocida como PWM siendo una técnica que modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, o la modulación de impulsos de amplitud M-PAM que se pueden aplicar de forma directa utilizando la modulación de la intensidad (Wang & Zhong, 2012).

Como se puede analizar existen algunas opciones para la modulación con una gran cantidad de propuestas a nivel de baja velocidad, pero existen algunos ejemplos de velocidades

de 100 Mbits/s que se han podido obtener con la modulación OOK, sin embargo si son necesarias velocidades de transmisión más altas se requiere una técnica de espectro más eficiente tales como MSM “*multiple-subcarrier modulation*”, esta tipo de modulación se aplica con la finalidad de explotar de mejor manera el ancho de banda del LED.

Una nueva alternativa de modulación denominada SIM-OFDM ha sido propuesta recientemente la cual utiliza diferentes frecuencias de portadoras para transmitir información dando un mayor rendimiento en comparación con la modulación convencional OFDM, además su estructura innovadora puede conducir a una disminución de la potencia máxima del sistema que es altamente beneficioso en el contexto de la comunicación inalámbrica óptica.

La selección de un formato de modulación adecuado es crucial, pero también es necesario analizar los efectos en el rendimiento del LED tales como su degradación debido al envejecimiento o variación de temperatura en condiciones de operación dentro un sistema VLC.

2.11.2. Modulación DMT.

La modulación MSM es una técnica donde la información es modulada en subportadoras ortogonales, la suma de las subportadoras moduladas se modula entonces sobre la potencia instantánea del transmisor, por lo general MSM se implementa mediante multiplexación por división ortogonal de frecuencias OFDM, la cual ha sido ampliamente utilizada en las dos formas de comunicaciones digitales cableadas e inalámbricas.

La modulación por división ortogonal de frecuencia, se la conoce también con el nombre de DMT “*Discreet Multitone Modulation*” llamada modulación por multitono discreto, es una modulación que consiste en enviar información modulado en QAM o en PSK un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias, normalmente se realiza la modulación OFDM tras pasar

la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión, esta modulación se llama COFDM (*Coded OFDM*).

La modulación DMT es una generalización de la modulación QAM en la que en lugar de tener una única portadora, se emplea N portadoras equi-espaciadas (denominadas subportadoras), cada una de las cuales están moduladas en QAM por una parte del flujo total de bits que se han de transmitir. En este tipo de modulación el flujo de bits a transmitir se divide en N nuevos flujos, cada uno de ellos integrado por un número variable de bits, número que depende de la relación señal/ruido estimada para la subportadora correspondiente durante la fase de inicialización (Lee & Park, 2011). A cada uno de los flujos resultantes se les modula en QAM a su correspondiente subportadora. El conjunto de las subportadoras moduladas en QAM se suman y la señal resultante es la que se transmite por el par metálico. Al igual que la modulación QAM, de la que no es más que una generalización, la modulación DMT es paso banda: si se elige adecuadamente la frecuencia inicial de las subportadoras, se puede conseguir que el espectro de una señal modulada en DMT no se solape con los espectros de señales correspondientes al servicio telefónico básico o al acceso básico RDSI, y que la separación de las señales transmitida y recibida en sistemas full-dúplex sobre un único par de cobre pueda realizarse mediante técnicas FDD (Lee & Park, 2011). La modulación DMT es la que en la actualidad se está usando de forma más generalizada como tecnología básica en los modem ADSL comerciales, en los sistemas DSL, como en todos los sistemas de transmisión, se producen errores de transmisión que hay que detectar y corregir.

Es importante señalar que DMT también es de relevante importancia para transmisiones ópticas de corto alcance por su bajo consumo, por lo general la modulación en múltiples subportadoras de diferentes frecuencias para una transmisión simultánea así como para

su demodulación están basadas en la transformada discreta de Fourier (DFT), transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) y transformada rápida de Fourier (FFT).

2.11.3. Modulación por índice de sub-portadora SIM-OFDM.

La diferencia de este modelo con respecto a OFDM tradicional, es que la información que va a ser transmitida, donde B es el flujo binario de datos que se divide en dos grupos iguales a los que denominamos B_{OOK} y B_{QAM} .

El transmisor SIM se encarga de dos procesos, primero del bloqueo de bits B_{OOK} , se identifican la mayor cantidad de 1 o 0, que se repiten en este vector. En la figura 38 podemos visualizar que B_{OOK} tiene más valores 1 que se repiten, los cuales servirán para realizar una modulación OOK, esto quiere decir que solo en la posición donde se tenga un valor de 1 en B_{OOK} se enviara los valores mapeados del bloque B_{QAM} , a los valores de B_{QAM} se realizara un mapeo de M-QAM donde M es el tamaño de la constelación.

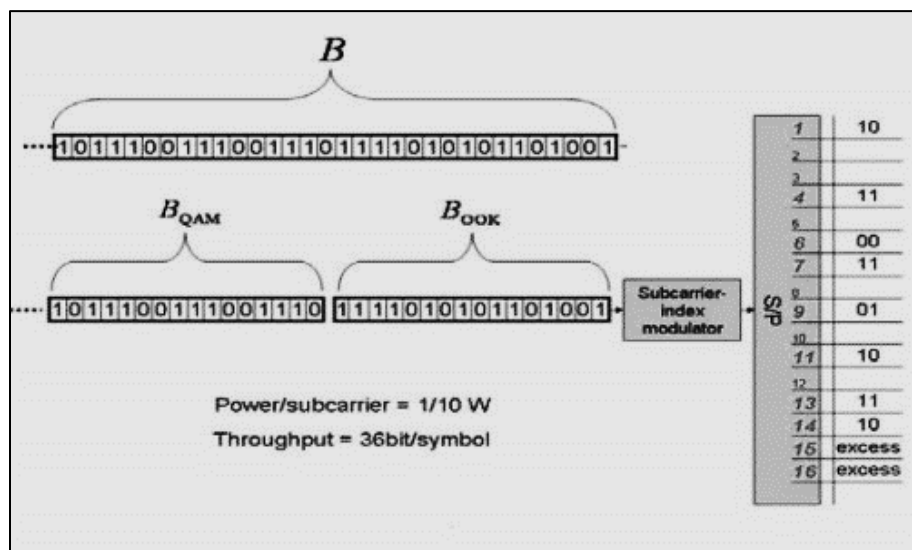


Figura 38. Modulación Por Índice De Sub-portadora (SIM-OFDM)

Fuente: Fath & Hass, 2013.

En la parte del receptor de la figura 38 se realiza los procesos inversos para obtener la información enviada. SIM-OFDM es una modificación del esquema clásico OFDM, en el cuál un número n de diferentes portadores de frecuencias son modulados con una señal basados en un régimen como el Quadrature Amplitude Modulation QAM.

El nuevo enfoque que presenta SIM-OFDM es la explotación de una nueva dimensión adicional en el cuadro OFDM que proviene del estado de cada subportadora activa o inactiva. Esta dimensión adicional es empleada para transmitir datos en un modo On-Off Keying (OOK).

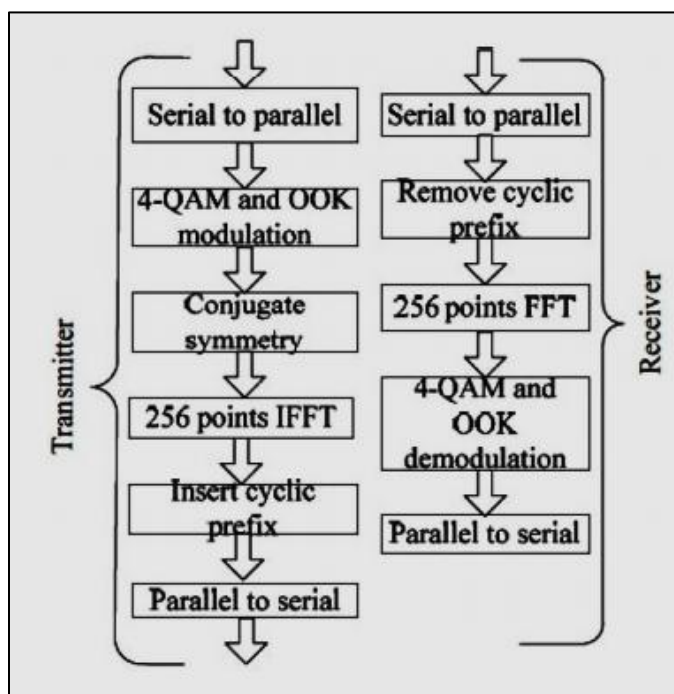


Figura 39. Transmisión y Recepción con SIM OFDM

Fuente: Fath & Hass, 2013.

El motivo fundamental para la realización de este nuevo concepto fue la optimización de potencia, ya que en cada bit transmitido se logra ahorrar un porcentaje de potencia, es decir Li-Fi es un sistema de comunicación "verde".

2.11.4. Espectro ensanchado.

En el caso de que se desee implementar múltiples canales de baja velocidad, tales como redes de sensores en aplicaciones domóticas, es necesario implementar un control de acceso al medio. Estas técnicas se pueden clasificar en división en el tiempo TDMA, en frecuencia FDMA o en código CDMA. Los sistemas de espectro ensanchado, parecen ser una interesante opción para implementar sistemas basados en VLC, ya no sólo porque implementan intrínsecamente el acceso al medio por división de código, sino también por la buena respuesta que poseen ante interferencias de banda estrecha, la baja densidad espectral de potencia, que puede permitirle lograr la compatibilidad con otros sistemas, o una buena respuesta ante el fenómeno de la multipropagación (Wang & Zhong, 2012).

Existen tres tipos de técnicas de espectro ensanchado:

- DSSS “*Direct Sequence Spread Spectrum*” se modula una portadora con una secuencia de código digital cuya tasa de bit es mucho mayor que el ancho de banda de la señal de información.
- FHSS “*Frequency Hopping Spread Spectrum*”: en este caso, se utiliza la secuencia de código para seleccionar, entre un conjunto de posibilidades, la frecuencia de la señal portadora.
- THSS “*Time Hopping Spread Spectrum*” esta técnica implica un envío de los bits de datos espaciados a intervalos de tiempo aleatorios determinados por la señal de código.

La técnica del salto en el tiempo, hasta el momento, se ha considerado sólo como una modulación auxiliar para mejorar algunas prestaciones en enlaces de radiofrecuencia. Sin embargo, en lo que a las comunicaciones ópticas se refiere, este esquema de modulación presenta

algunas características que lo hacen idóneo para este entorno (Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012). El uso de pulsos muy estrechos para codificar los datos a transmitir reduce el consumo de potencia utilizado, mientras que el corto tiempo de señal en el canal permite la coexistencia con otros usuarios de la red de forma sencilla. Además, conserva el resto de característica de los sistemas de espectro ensanchado ya comentadas, que mejoran el comportamiento de los enlaces ópticos no guiados. El funcionamiento de un sistema de estas características se basa en dividir el tiempo de bit en secciones “*slots*”, de forma que, las secuencias de código pseudoaleatorio generadas determinan los slots a transmitir dentro de la trama. De esta forma, las demás franjas de tiempo puedan ser utilizadas por otros usuarios, lográndose con ello el acceso múltiple al canal. Para aumentar su robustez, es posible transmitir N pulsos en cada una de las tramas generadas en cada transmisor a costa de dividir por el mismo factor la tasa máxima de datos alcanzable (Panta & Armstrong, 2012). En un principio, la codificación utilizada en cada slot era una simple OOK, pero varios estudios realizados en el grupo han demostrado con una codificación 2-PPM se logran mejorar las probabilidades de error a costa de duplicar la frecuencia máxima del sistema.

2.12. Tendencias tecnológicas aplicado en Li-Fi

2.12.1. Sistema de educación.

Al igual que con el avance de la ciencia la tecnología más avanzada es la Li-Fi que es el servicio de acceso a Internet de alta velocidad, por lo que esta nueva tecnología lleva a la sustitución de Wi-Fi en las instituciones y en las empresas de forma que todos las áreas pueden hacer uso de Li-Fi a una misma velocidad de transmisión.



Figura 40. Sistema de educación

2.12.2. Aerolíneas.

Cada vez que se viaja a través de un avión enfrentamos el problema con los medios de comunicación, porque toda la comunicación de los aviones se realiza sobre la base de las ondas de radio. Para superar este inconveniente se introduce Li-Fi.



Figura 41. Aerolíneas

Con esta solución es posible utilizar la luz disponible en cada asiento del avión con la finalidad de mantener conectados los equipos sin ocasionar ningún tipo de interferencia en todo momento, con la ventaja de poder atenuar la luz que nos permitiría disfrutar del vuelo sin la molestia de la claridad del led manteniendo la transmisión de datos.

2.12.3. Difusión de información multimedia en pasajeros.

La transmisión inalámbrica mediante luz visible podría proporcionar información a los pasajeros por medio de la iluminación en las estaciones del metro, en este caso el sistema de interior requiere la transferencia de datos unidireccional “*streaming*”, la funcionalidad básica en este tipo utilizan muy baja velocidad manteniendo un amplio campo de visión sin embargo la tecnología actual permite velocidades de hasta algunos Gbit/s. Podrían acceder a este beneficio de forma gratuita al público en general y sin la presencia de marcas comerciales que auspicien como información de actividades culturales, educativas y sociales de convocatoria masiva tales como obras de teatro, exposiciones, ciclos de cine, cursos, charlas, mapa de sitio etc.



Figura 42. Difusión de información multimedia

2.12.4. Control de tráfico.

Los semáforos se pueden comunicar con todos los vehículos para controlar el tráfico. Los vehículos tendrían faros basados en LED, para que se pueden comunicar entre sí y evitar accidentes mediante el intercambio de información.



Figura 43. Control de tráfico

2.12.5. Hospitales.

En hospitales siendo útil en los instrumentos médicos modernos, en las salas de maternidad para proteger a mamás y bebés y a las incubadoras no tendrán que estar expuestas a las perturbadoras y pulsantes microondas del Wi-Fi, e incluso con GeoLiFi podría ayudar a los visitantes a encontrar su camino o permitir a los médicos y enfermeras cualquier tipo de información en tiempo real mientras estos están junto al paciente se podría desplegar automáticamente el historial clínico en una Tablet.



Figura 44. Hospitales

2.12.6. Línea de producción.

En los entornos industriales donde existan condiciones electromagnéticas severas que de igual manera mantenga una alta exigencia en materia de seguridad y fiabilidad por lo que es difícil o incluso imposible el uso de sistemas de radiofrecuencia. VLC podría proporcionar enlaces adecuados bidireccionales de alta velocidad.



Figura 45. Línea de producción

2.12.7. Red de comunicación urbana.

Hay millones de lámparas de la calle desplegadas en todo el mundo que solo nos dan luz, con esta nueva tecnología se aprovecha cada una de esas lámparas que puede transformarse en un punto de acceso para datos gratuito.



Figura 46. Red de comunicación urbana

2.12.8. Planta petroquímica.

La seguridad y la confiabilidad son los factores más importantes para la selección de un producto de transmisión de datos inalámbrico siendo más seguro la luz visible que la radio frecuencia, por lo tanto, puede ser utilizado en lugares donde la radio frecuencia no se puede utilizar como plantas petroquímicas.



Figura 47. Planta petroquímica

2.12.9. Máquina a máquina.

Una red LAN inalámbrica donde el enlace descendente es proporcionado por comunicación de luz visible y el enlace ascendente se realiza mediante luz infrarroja. Entre equipos se espera que la comunicación sea un servicio adicional muy importante para el intercambio inalámbrico de grandes volúmenes de datos en escenarios donde la transmisión inalámbrica por radiofrecuencia se encuentre saturada.

Capítulo 3. Sistema prototipo de transmisión de datos inalámbrico por luz visible

3. Componentes básicos del sistema prototipo Li - Fi

La proliferación de las aplicaciones móviles utilizando frecuencias de radio ha acentuado la preocupación sobre la disponibilidad de espacio en la banda de radiofrecuencia así como los límites de la capacidad de transmisión en las redes inalámbricas, en tal sentido se puede ofrecer una opción adicional para los enlaces de datos inalámbricos actuales utilizando VLC para introducir este sistema de comunicación donde no es posible utilizar un enlace de radio.

3.1. Proceso de envío y recepción de datos

Los componentes básicos de un sistema genérico VLC se lo pueden comparar con los antecedentes históricos y el uso de la transferencia de mensajes a través de esquemas como el código morse donde se utiliza el principio de manipulación por interrupción de encendido o apagado que utilizamos para la modulación y transmisión de la información a través de los dispositivos, en este caso hacemos referencia a la modulación digital de amplitud (OOK) (Wang & Zhong, 2012), conocido también como modulación binaria sencilla esta representa la modulación digital con la presencia o ausencia de una señal portadora.

En el lado del receptor de la figura 40, la detección directa se aplica utilizando un fotodetector para la conversión de la señal optoelectrónica, mientras que los sensores de imagen pueden ser utilizados en sistemas de baja velocidad.

Es posible codificar datos en la luz variando la tasa a la que el LED parpadea de ON a OFF para dar diferentes cadenas de unos y de ceros binarios. La intensidad del LED se modula tan rápido que el ojo humano no lo percibe (Panta & Armstrong, 2012). Ya se han

alcanzado velocidades de 500 Mbps, las altas tasas de datos exigen un sistema PIN o fotodiodo Avalancha (APD) como dispositivo para la detección óptica. Existen muchos beneficios al momento de la implementación de un sistema Li-Fi, ya sea por su costo y facilidad de instalación, ya que realmente es un sistema barato ya que sus transmisores solo son bombillas LED con un microchip incorporado.

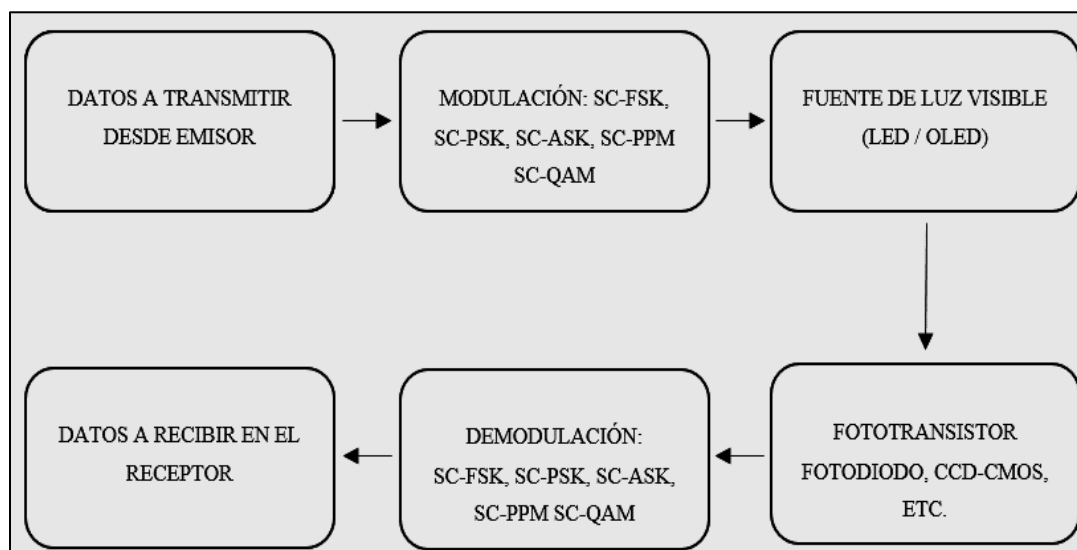


Figura 48. Proceso de envío y recepción de datos en VLC

Fuente: Panta & Armstrong, 2012.

El calor emitido por la luz LED tiene una relación directa con la velocidad de transmisión, si la luz se encuentra más lejos del blanco cálido, su transmisión será más rápida, esto es posible ya que puede usarse un mayor espectro de frecuencia, las bombillas de luz LED que están diseñadas para la transmisión de datos Li-Fi están constituidas por los siguientes elementos que se representan en la figura 48.

- Bombilla
- Circuito amplificador de Radio Frecuencia (PA)
- Circuito impreso (PCB)

Para realizar una transmisión inalámbrica es necesario un transmisor y un receptor, en el caso del Wi-Fi, se utiliza antenas para poder realizar esta acción. Por esta razón este método de transmisión resulta novedoso, el cual está rompiendo esquemas, ya que esta transferencia inalámbrica es óptica, es decir mediante luz.

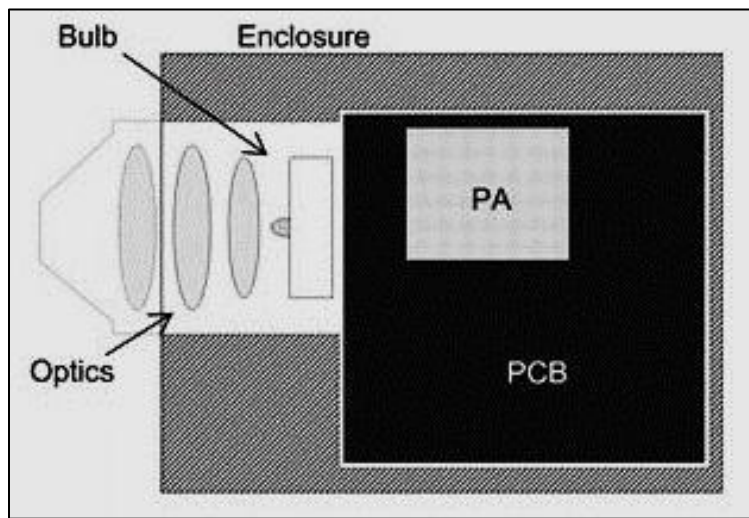


Figura 49. Diagrama de Bloques Sistema Li-Fi

Fuente: (Komine & Nakagawa, 2004)

Este bloque de construcción de la figura 49, representa un sistema de transmisión de luz visible básico para cortas distancias, la modulación del ancho de banda que ofrece los LED's actuales permiten una alta capacidad para enlaces en interiores siendo su alcance hasta aproximadamente unos 20 metros. Esto depende mucho de las aplicaciones ya que pueden ser emisión o transmisión de video o transferencia de archivos, siendo sus enlaces de forma unidireccional o bidireccional, configuración punto a punto o multipunto. La capacidad del canal inalámbrico óptico depende de la modulación del LED para poder ser explotado su capacidad al máximo.

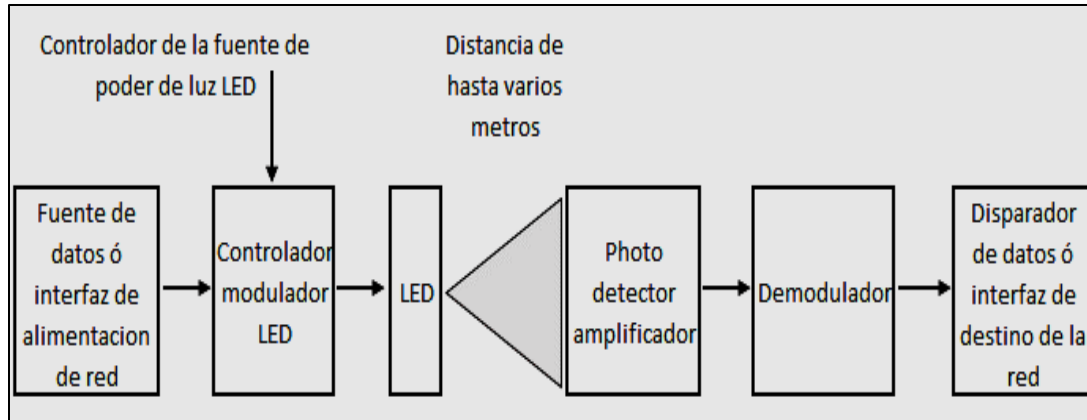


Figura 50. Componentes Básicos Del Sistema Prototipo VLC

Fuente: Komine & Nakagawa, 2004.

En transmisión VLC básica nos encontramos con tres componentes fundamentales:

3.1.1. Unidad transmisora.

Genera luz utilizando diversos tipos de LED para emitir luz visible modulada por los datos que se desean transmitir de forma unidireccional/simplex, bidireccional HDX o FDX (Arnon, *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press, 2012).

Algunos métodos y esquemas de modulación son:

- VPPM “*Variable Pulse Position Modulation*” similar al PPM pero permite controlar la anchura del impulso para soportar la bajada de la luz.
- SM “*Spatial Modulation*” este permiten determinar la fuente de una señal óptica. Si se puede determinar su fuente puede utilizar múltiples fuentes de información para transportar múltiples flujos de datos independientes (uno de cada fuente) o se puede emplear la fuente de la señal como parte de la propia codificación de la información varias fuentes pueden ser varios LED’s dentro de un único dispositivo o luminaria.

- OFDM “*Orthogonal Frequency Division Multiplex*” utiliza un conjunto de sub-portadoras cada una en diferentes frecuencias pero armónicamente relacionadas. Presenta una buena eficiencia espectral pero es algo complejo de implementar.
- PWM “*Pulse Width Modulation*” permite transportar la información codificada en la duración de los impulsos. Se pueden transportar más de un bit de datos en cada impulso, pero pueden ser necesarios mayores las longitudes de los impulsos que para OOK, de modo que no presenta grandes ventajas. Es fácil de implementar.
- CSK “*Colour Shift Keying*” se utiliza en sistemas que emplean LED-RGB. Combinando los diferentes colores de la luz, los datos de salida se pueden transportar por medio del color en sí, de modo que la intensidad de la salida puede ser constante. Su implementación es compleja.
- PPM “*Pulse Position Modulation*” los datos se codifican utilizando la posición del impulso dentro de una trama. Se pueden enviar más de un bit en cada impulso, sin embargo la duración de la trama debe ser mayor que para un único bit OOK, de modo que no necesariamente es más eficiente. En cada trama se contiene la misma cantidad de energía óptica, ver figura 50.
- OOK “*On-Off Keying*” los datos se generan encendiendo y apagando el LED. El uno lógico se consigue poniendo el LED a ON y un cero lógico se obtiene poniendo en OFF el LED. Es simple de implantar pero no es óptimo en lo relativo a control de iluminación y caudal de datos.
- PAM “*Pulse Amplitude Modulation*” la información se transporta en la amplitud del impulso. PAM puede transportar más datos en cada impulso que OOK pero es más susceptible al ruido del canal óptico. Por ejemplo en la modulación 256-ASK cada

elemento de señal transporta logaritmo en base dos de 256 cuyo resultado es 8 bits, ver figura 50.

- Otros esquemas son 512-QAM (mezcla ASK en amplitud y PSK en fase), 1024-PSK, BFSK “*Binary Frequency Shift Keying*” en frecuencia, SS-kPPM “*SubCarrier-Pulse Position Modulation*” donde k es un número potencia de dos, por ejemplo dos o cuatro.

Los datos se representan por presencia y ausencia de la onda de la portadora o carrier.

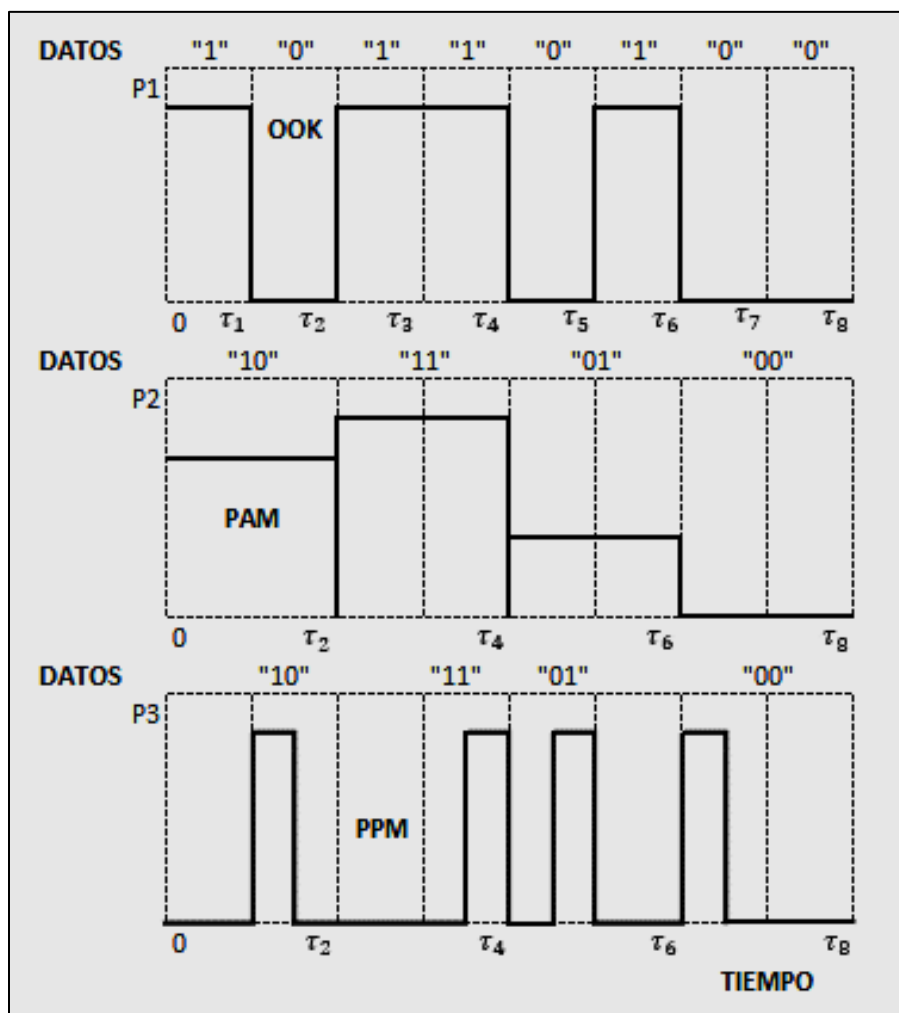


Figura 51. Modulaciones en banda base OOK, PAM, PPM

Fuente: Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012.

3.1.2. Unidad receptora.

Utilizan diversos elementos para demodular y decodificar la luz en datos recibidos, se utilizan foto-detectores como fotodiodos, matrices CCD, fototransistores, etc. y mecanismos criptográficos estenográficos adecuados para desocultar los cifrados visibles y desocultar lo subliminar de los datos no observables/identificables (Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012).

Existen dos tipos de dispositivos ampliamente expandidos en el mercado: los fotodiodos PIN y los APD. El primero de ellos se basa en una unión PN en la que si llega un fotón con suficiente energía, se genera un hueco que, con una correcta polarización provocara una corriente.

Por su parte, el APD genera una corriente que es multiplicada debido a un efecto de ionización de impacto. Si bien esto es una ventaja debido a que se puede lograr mayores distancias, estos dispositivos son bastantes más caros y necesitan una circuitería asociada muy compleja para lograr un correcto funcionamiento. Normalmente los fotodiodos comerciales están diseñados para una determinada longitud de onda, sin embargo, como su respuesta espectral es bastante ancha, pueden ser utilizados para recibir todo el espectro de luz visible obteniendo buenos resultados.

3.1.3. El canal.

El canal óptico no guiado se caracteriza entre otras propiedades por la presencia de manera prácticamente ineludible, de señales interferentes producidas por fuentes de iluminación artificial. Este tipo de interferencias dificultan los desarrollos de sistemas de comunicación ópticos no guiados, que deben incluir circuitos específicos en los receptores para reducir el

efecto de dichas interferencias (Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012). Las interferencias producidas por las fuentes de iluminación introducen componentes de banda estrecha a diferentes frecuencias dependiendo del tipo de lámparas utilizado. Las lámparas incandescentes introducen armónicos de 100 Hz hasta aproximadamente 800 Hz. Esto se debe a que la frecuencia de red es de 50 Hz y a que la luz generada por la lámpara es igual para el semiciclo positivo y negativo de la señal eléctrica.

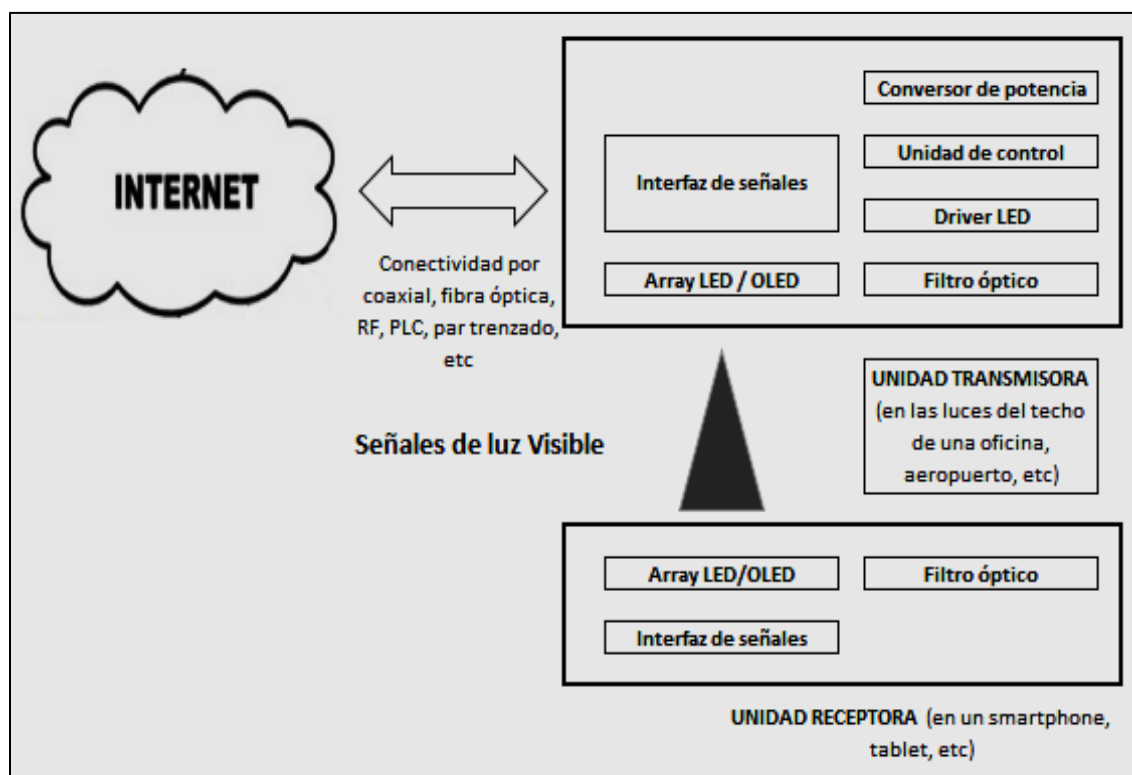


Figura 52. Esquema de un sistema Vlc Li-Fi

Fuente: Arnon, Barry, Schober, & Karagiannidis, 2012.

Para reducir los efectos de estas interferencias, los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas utilizan diferentes esquemas. Una posibilidad es el uso de filtros ópticos se analiza en la figura 52, que eliminan las longitudes de onda diferentes a aquella con las que se está estableciendo el enlace de comunicaciones. Además, el circuito receptor suele contar con una etapa de filtrado paso alto que elimina la banda con mayor presencia de interferencias,

aunque también puede eliminar parte de la señal de datos recibida. Por último, también se utilizan técnicas de modulación de la señal de datos, que permiten desplazar la comunicación a bandas de frecuencias libres de las interferencias e introducir algoritmos de corrección de errores.

3.2. Equipo prototipo li-fi lámpara led

El Li-Fi es una nueva tecnología de comunicación inalámbrica que utiliza la luz emitida desde un LED Lámpara Li-Fi READY, con este prototipo se puede probar y demostrar al cliente así como también crear una gran cantidad de aplicaciones nuevas e innovadoras basadas en el sistema de posicionamiento en interiores Geo Li-Fi (Oledcomm, 2015).

Este prototipo incluye cinco componentes importantes que se describen a continuación:

3.2.1. Led lámparas Li-Fi faro.

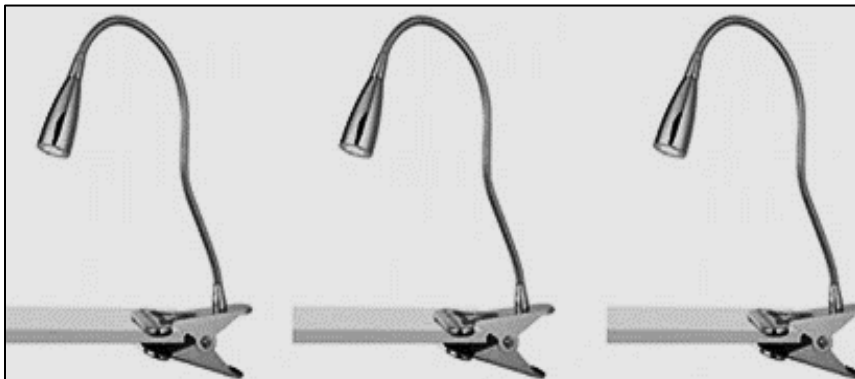


Figura 53. Led Lámparas Li-Fi Faro

Este equipo incluye tres lámparas LED como en la figura 54, los cuales mantienen un tipo de transmisión unidireccional siendo el primer equipo de esta tecnología que logra transmitir datos a un fotodiodo instalado en una Tablet a pocos kbps.

3.2.2. Android tablet Li-Fi ready.

El teléfono Android fue modificado mediante la sustitución de la cámara de frente por un sensor de luz y corrientes pulsantes de luz que se utiliza para la transmisión de información (Oledcomm, 2015).

Después de instalar una aplicación especial en el teléfono, al realizar el acercamiento del dispositivo con la luz de la lámpara desencadenara una serie de eventos, incluyendo la visualización de ciertas imágenes, la reproducción de un vídeo o el arranque de juegos específicos, se considera que esta tecnología Li-Fi, ver figura 55, también puede ser utilizado para la localización basada en la publicidad, similar a lo que Apple está haciendo con el ibeacon en sus tiendas al por menor.

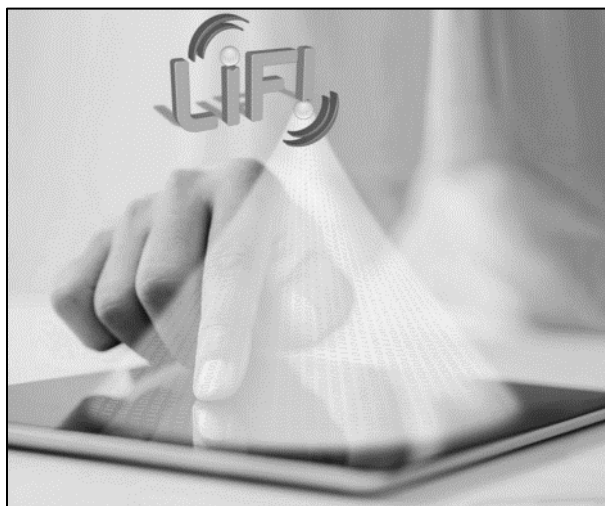


Figura 54. Android Tablet Li-Fi Ready

3.2.3. Aplicación basada en localización.

Es un conjunto de herramientas que nos ayudan a la localización geográfica del usuario o algún objeto, proporcionando información precisa sobre su localización, mediante dispositivos móviles como teléfonos, tabletas, etc. Estas aplicaciones no necesariamente son

utilizadas para localizar a una persona, existen muchos sistemas que utilizan estos servicios con aplicaciones en zonas específicas como supermercados para ofrecer descuentos basados en el hábito de compra de los clientes (Americalifi, 2014).

3.2.4. Descripción física.

QR Code Reader anteriormente conocida como Scan es un lector de códigos para Android logrando obtener la información de cualquier código QR que se encuentren, e incluso de códigos de barra comunes como UPC, EAN e ISBN.

El código QR es un código legible para la máquina, ver figura 56 normalmente se utiliza para almacenar las direcciones URL o cualquier otra información para la lectura por la cámara en un teléfono inteligente (Oledcomm, 2015).



Figura 55. Código QR

El código LR es un código legible que es muy similar al tradicional QR, ver figura 57 pero este es utilizado en la comunicación por luz visible, para el modo en línea es necesario una conexión Wi-Fi/3G y poder acceder a los contenidos de la web.



Figura 56. Código LR

Se configura al dispositivo en modo bloqueado en el cual el archivo multimedia desaparecerá al momento que la fuente de luz se apaga a este fuera de alcance y se podrá visualizar en la pantalla el mensaje que no se ha detectado ningún código LR. En modo desbloqueado el archivo continuara reproduciéndose sin la necesidad de que la fuente de luz este alineada. Para transferir fotos o imágenes del PC a la Tablet es necesario conectar e cable USB en la PC, pulse el botón activar almacenamiento USB para copiar los archivos que se encuentran en su PC. Antes de apagar el almacenamiento USB desconecte “*eject*” el cable USB del ordenador en el botón desactivar almacenamiento USB.

3.3. Equipo prototipo transceiver Li-Fi-Net

3.3.1. Ámbito de aplicación.

El producto transceiver Li-Fi-Net es una gama de Li-Fi lámpara NET, que puede entregar una potencia de salida de hasta 100W. Se ha diseñado específicamente para la iluminación de interiores LED.

Li-Fi lámpara Net tiene:

- 1 Ethernet puerto de entrada
- fuente de alimentación 220-110 V CA a 18 V DC 1 Amp
- 100W lámpara, LIFI receptor neto.

3.3.2. Descripción del prototipo.

Esta es la nueva generación de equipos con tecnología Li-Fi-Net el cual transforma cualquier tipo de sistema de comunicación en iluminación bidireccional, esto nos permite asegurar el acceso al internet con una alta velocidad de 400 kbps con una iluminación led de hasta 100W.

Para su funcionamiento requiere una instalación y mantenimiento relativamente fácil ya que el receptor tiene que ser empotrado con la ventaja de contar con un router de peso ligero como vemos en la figura 58. El transmisor cumple con normas de comunicación Li-Fi-NET IEEE 802.15.7 para la luz visible conjuntamente con normas y directrices europeas.

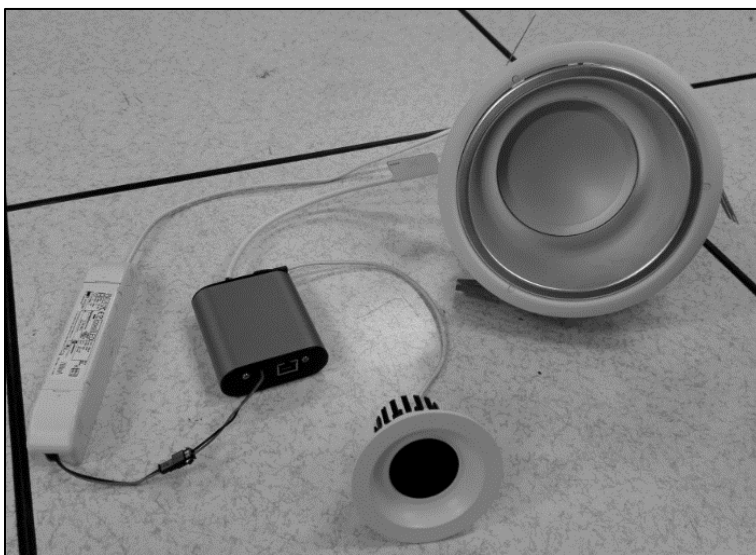


Figura 57. Transceiver Li-Fi - Net

3.3.3. Esquema de transmisión.

En la figura 59, se grafica el esquema de transmisión que utilizamos para el funcionamiento de este prototipo el cual se encuentra compuesto por las siguientes partes:

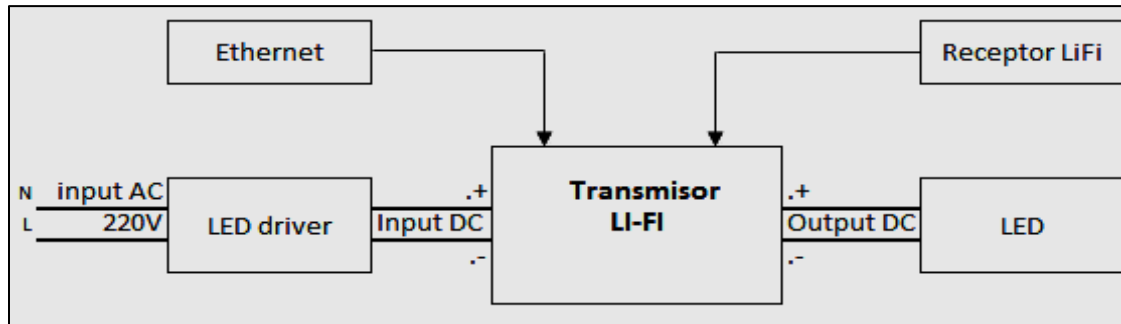


Figura 58. Esquema transceiver transmisión

- La entrada del router transmisor Li-Fi Net se encuentra conectado a la salida del controlador LED.
- La salida del router transmisor Li-Fi Net se encuentra conectado al LED.
- El receptor Li-Fi Net está conectado al emisor Li-Fi Net.
- El Ethernet está conectado al router transmisor Li-Fi Net.
- La potencia entregada por el router Li-Fi Net es hasta 100W.

3.3.4. Normas de certificación.

- CEM: EN55015; EN61547; EN55022; EN55024.
- Sécurité Electrique: EN60598; EN61347; EN60950.
- Sécurité Photo-biologique: EN62471. RoSH. R&TTE (Radio). DEEE.

Capítulo 4. Ajuste y conexión del prototipo Li-Fi de alta velocidad

4. Arquitectura y conexión del prototipo Li-Fi Net

4.1. Arquitectura VLC.

VLC permite establecer canales dedicados y comunicaciones simplex, “*Half-Duplex*” y “*Full-Duplex*”. Un sistema VLC puede transmitir señales digitales controlando la repetición ON/OFF de un dispositivo generador de luz como un LED “*Light Emitted Diode*” de estado sólido o tecnología emergente como OLED “*Organic Light Emitted Diode Flexible*” utilizada en HDTV y smartphones o el color-frecuencia de la luz transmitida (Lee & Park, 2011). Los focos led tienen un circuito interno, el cual hace que varíe su amplitud a altísimas velocidades sin que lo perciba el ojo humano, partiendo del principio que utiliza VLC “*Visible Light Communication*” el cual tiene un ancho de banda enorme en comparación que el uso de ondas de radio frecuencia que se maneja en Giga Hertz para transmitir datos como lo hace el sistema Wi-Fi, por esta razón la transmisión de datos óptica, junto con los principios de transmisión de la fibra óptica pueden manejar transmisiones de gran capacidad en un tiempo más reducido, ya que por el ancho de banda que maneja no se satura como en el caso del Wi-Fi. Analizando la figura 53 podemos simplificar la arquitectura VLC en una entrada y salida de señal análoga la cual se transforma en digital manteniendo en su estructura las capas física y mac alimentado por un led que reflejara su información transformada en luz visible hacia un fotodiodo receptor.

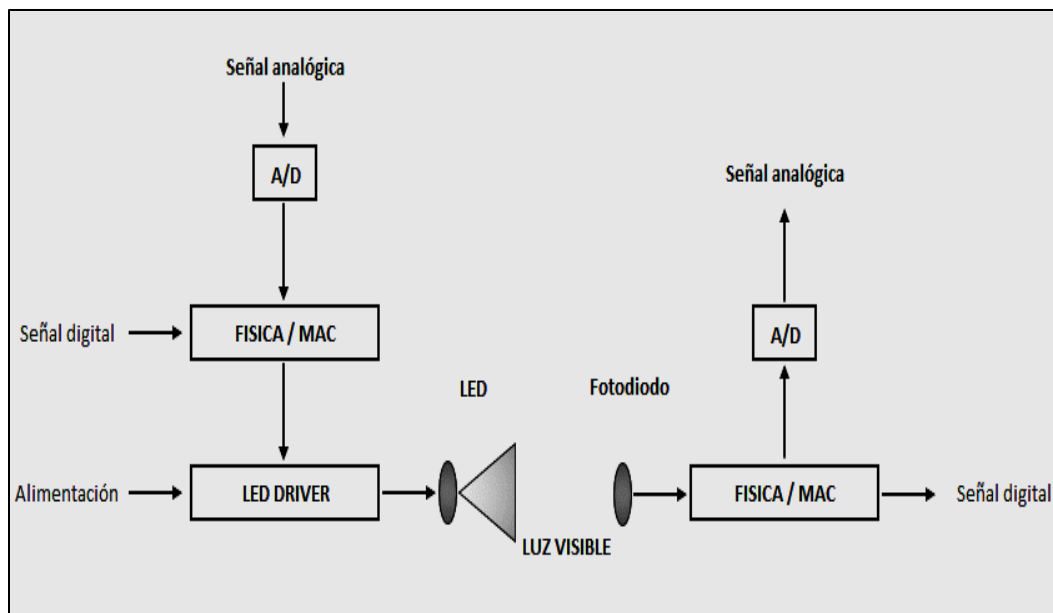


Figura 59. Arquitectura VLC

Fuente: Wang & Zhong, 2012.

Los datos a transmitir deben llegar de alguna manera a los drivers de las lámparas colocadas en el techo, para ello existen multitud de posibilidades tales como la fibra óptica, el cable Ethernet, o el Wi-Fi. Sin embargo, es la tecnología PLC “*Power Line Communication*” ofrece mayores ventajas, ya que es un sistema que no necesita de ninguna instalación de cables adicional para comenzar a funcionar (Wang & Zhong, 2012). Esto es debido que se caracteriza por utilizar la instalación eléctrica para transmitir datos codificados en OFDM “*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*” llegando a alcanzar tasas de transmisión cercanas a los 100 Mbps.

El LEDs RGB, si bien son algo más caros, no tienen el problema del fósforo y además, como poseen 3 LEDs independientes, se triplica la tasa máxima de datos alcanzable excitando con 3 señales diferentes cada uno de los dispositivos (Gago Calderon & Fraile Vilarrasa, 2012). Además, poseen la capacidad de generar diferentes tonalidades y luces de ambiente únicamente modificando la corriente que circula por cada uno de ellos

Las principales propiedades de la tecnología VLC son:

- Es de tipo LOS “*Line Of Sight*”. En principio emisor y receptor deben estar alineados.
- Permite alta densidad de comunicaciones inalámbricas. Permite reutilizar el espacio.
- Es una tecnología libre, su espectro no está sujeto a licencias.
- No se ve afectado por el ruido de radio frecuencia o RF.
- No afecta ni da problemas a la salud de las personas cosa que si produce las emisiones RF sobre todo las de elevada tasa de voltios dividido entre metro (V/m).
- Utiliza luz y nuestra sociedad esa inundada por luz por todas partes.
- Permite posicionamiento indoor y geo-localización en interiores.
- Utilizar FSO (Free Space Optics).
- Los datos pueden estar presentes donde haya luz.
- La luz puede transmitirse debajo del agua.
- La luz no penetra paredes, las señales de RF sí, por tanto, esto mitiga posibles escuchas clandestinas, no obstante puede ser interceptada y capturada por reflejos.
- La luz no se ve afectada por interferencias electromagnéticas RF, ni por inhibidores de RF, en cambio las transmisiones basadas en señales RF pueden inhabilitarse utilizando dichos dispositivos, imposibilitando por ejemplo hablar por móvil en las cercanías de estos dispositivos.

Actualmente existe un extenso y variado ecosistema de desarrolladores de tecnologías VLC como consorcio Li-Fi, IEEE 802.15.7, la especificación IEEE 802.15.7 define un canal de siete colores para la capa física L1 en VLC (Panta & Armstrong, 2012). Este estándar en evolución permite esquemas de modulación como OOK/VPPM y CSK, VLC Ltd. Intel, Samsung, ETRI, VLCC “*Visible Light Communication Consortium*”. Formado por Casio,

Toshiba, Sony, NEC, Sharp, NTT, etc.), Siemens, ByteLight, LVX System, Philips, IBSEMtelecom, MIT, JEITA (*Japan Electronics and Information Technology Industries Association*), UCR, etc. A nivel Europeo se destacan las actividades en VLC en el Proyecto OMEGA.

4.2. Arquitectura Li-Fi Net

Li-Fi se basa en el principio de la luz visible de comunicación el cual funciona de 380 nm a 780 nm de banda óptica que es la luz visible y de ahí procede el nombre de VLC. Las normas o estándar VLC define tres clases de topologías, esto dependiendo del rango de cobertura, velocidad de datos entre otros requisitos.

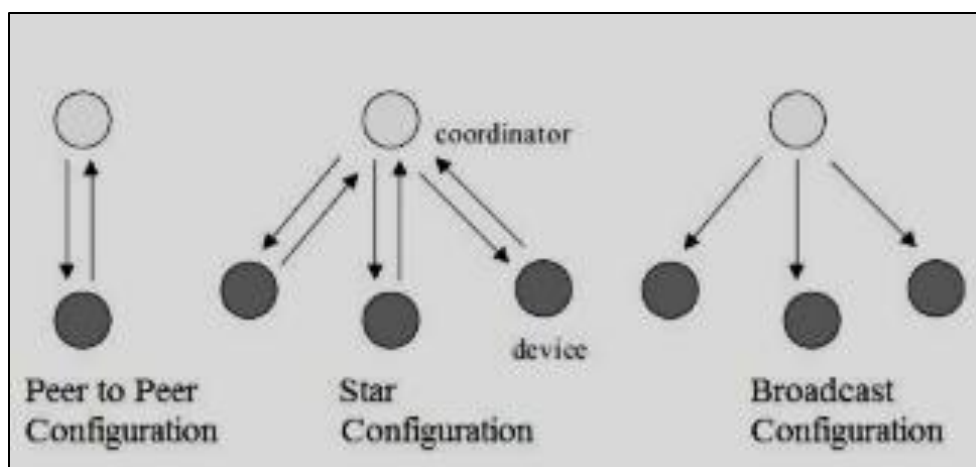


Figura 60. Topología VLC

Con respecto al prototipo Li-Fi NET se utiliza la configuración peer to peer, en la cual cada equipo que se conecte a la red Li-Fi deberá disponer de una bombilla led individual y de esta forma fijar su transmisión de datos inalámbrico.

4.2.1. Protocolos utilizados en Li-Fi Net.

En la figura 61, se representa la pila de protocolos que utiliza un dispositivo VLC típico, en la cual consta de PHY, MAC y capas superiores, la capa MAC proporciona acceso al canal para todos los tipos de datos y transmisiones de mensajes de control, un SAP se encuentra como interfaz en la capa física que lo conecta con el medio óptico, dicho medio óptico se encuentra compuesto por una fuente óptica o detector óptico.

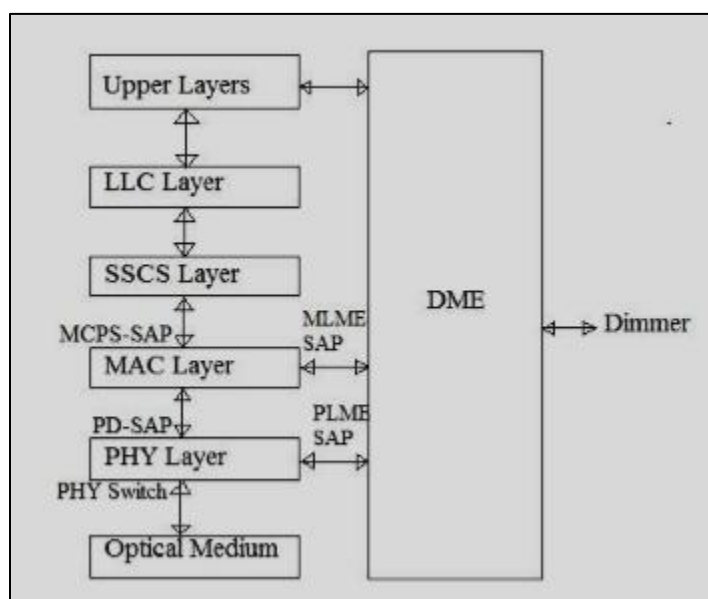


Figura 61. Pila de protocolos VLC

Fuente: Fath & Hass, 2013.

Las capas superiores se componen de las capas de red que se encarga de proporcionar la configuración y manipulación de la red, la capa de aplicaciones se encarga de proporcionar el funcionamiento deseado.

4.2.2. Funcionamiento de la capa física.

Existen tres diferentes tipos de capa física como se analiza en capítulos anteriores que son PHY I, PHY II, PHY III con sus respectivos diagrama de bloques, siendo la capa física

encargada de proporcionar la corrección de errores así como para activar y desactivar el transceptor VLC, nos ayuda en la sincronización en el receptor utilizando preámbulos incorporados en la estructura de la trama.

La versión PHY I ha sido desarrollada para cumplir con requisitos de baja velocidad de datos de 12 a 267 Kbps los cuales son utilizados por el prototipo Li-Fi lámpara led la cual no cumple los requerimientos de transmisión full dúplex y por su baja velocidad no permite mantener una comunicación en red.

Li-Fi PHY II satisface las necesidades de velocidades superiores a 267 Kbps hasta un máximo de 96 Mbps, ideales para aplicaciones de interiores como vemos en la figura 62 utilizando una modulación VPPM, esto quiere decir que nuestro prototipo Li-Fi Net se encuentra enmarcado de acuerdo a su modo de funcionamiento y velocidad en la capa física versión 2.

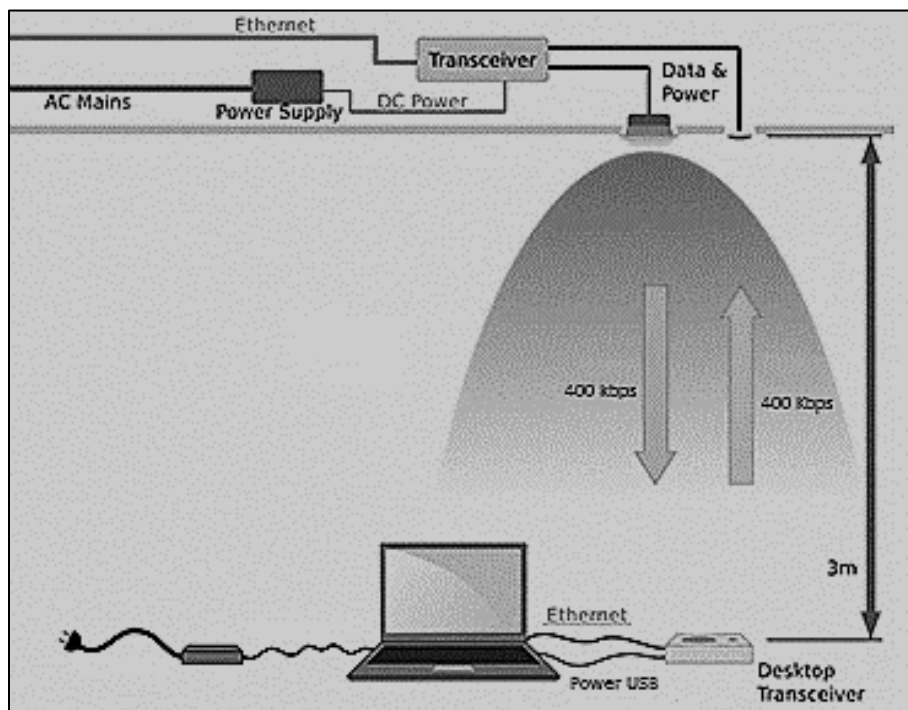


Figura 62. Modo de funcionamiento Li-Fi Net

La arquitectura de la red internet Li-Fi del prototipo se puede describir como componentes principales la lámpara LED la cual se conecta al internet por medio de un software controlador de lámpara LED, siendo a posterior ubicadas en red en diferentes lugares según los requerimientos de la oficina o el hogar siendo funcional para múltiples usuarios. En el caso del prototipo el dongle puede ser utilizado para cualquier equipo o usuarios que necesite conectarse al internet, siendo el único requisito que disponga de un puerto Ethernet, el dongle Li-Fi está compuesto de un fotodetector el cual aplica procedimientos de amplificación dependiendo el tipo de dato, ver figura 63. Li-Fi Net prototipo proporciona una velocidad de transmisión de datos de 400 Kbps con la ayuda de la bombilla LED.

Las pruebas realizadas determinan que no existen problemas de interferencia similares a las ondas de radiofrecuencia ya que no dispone de puntos de accesos “routers” cercanos, así también su interferencia resulta menor al poder pasar incluso a través de agua de mar salada siendo factible su trabajo en ambientes de alta densidad.

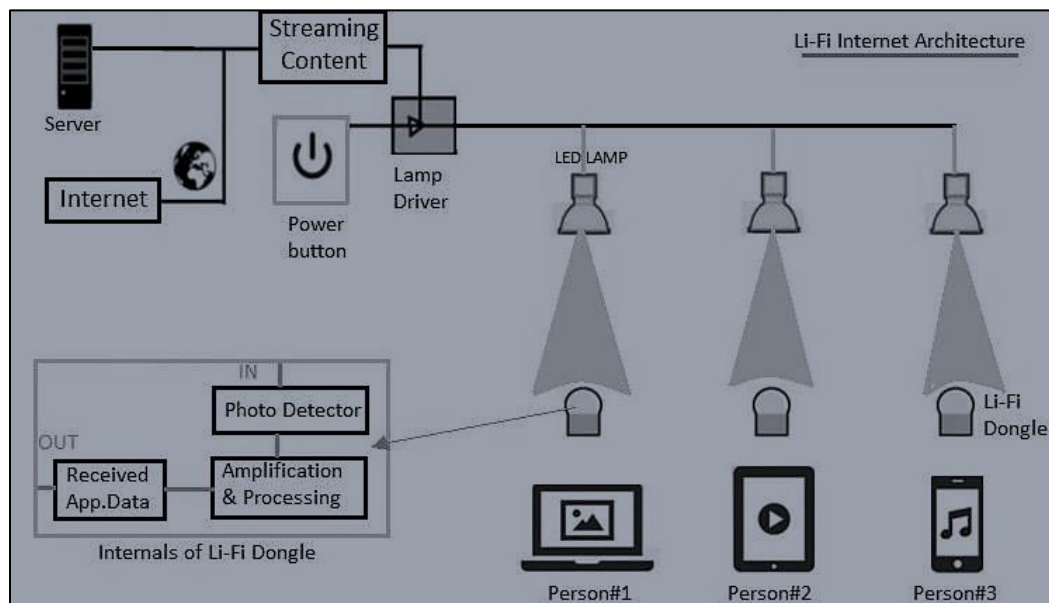


Figura 63. Arquitectura Li-Fi Internet

Fuente: Siddique & Thair, 2011.

4.2.3. Estructura capa MAC prototipo Li-Fi Net.

Es importante señalar la estructura de la trama MAC Li-Fi Net, así como la estructura de la trama PHY con la finalidad de analizar la transmisión de datos, siendo establecida la norma que gestiona la transmisión de datos de dos maneras las cuales son:

Modo individual. Este modo es utilizado para transmisiones de datos cortos, como los ACK, Beacon, etc. En este caso el proceso se define en llevar una PPDU por trama.

Modo pic. El modo pic mejora la eficiencia de la capa MAC al poder llevar múltiples PPDU por trama a un mismo destino, eliminando el problema de PHY repetidos para un mismo destino.

Modo de ráfaga. Este modo mejora el rendimiento al utilizar PHY de forma reducida.

Modo OOK atenuado. Se utiliza en transferencia de datos que requieran oscurecimiento.

4.2.4. Estructura de trama PPDU.

Múltiples octetos se transmiten menos octeto significativo en primer lugar y en cada octeto bit menos significativo en primer lugar.

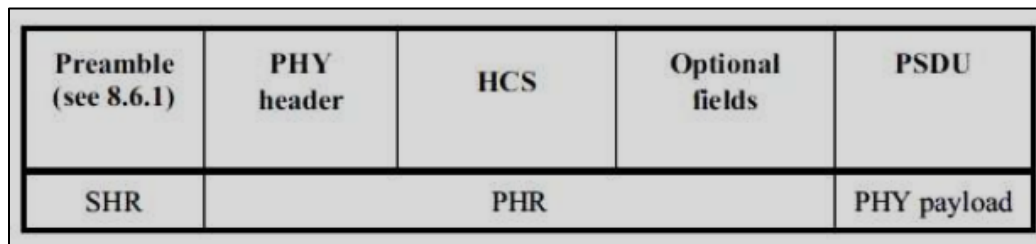


Figura 64. . Estructura trama PPDU

Fuente: Wang & Zhong, 2012.

El preámbulo es utilizado para lograr una sincronización con el reloj óptico, siendo PHY la cabecera donde se transmite junto con el tipo de modulación OOK, HCS se utilizado para proteger la cabecera PHY en Li-Fi el cual tiene un tamaño de 16 bits, ver figura 64 los campos opcionales son utilizados en modo PHY I a una velocidad de reloj de 200 KHz, los datos PSDU están encargados de llevar los datos de la trama PHY.

4.3. Conexión del equipo prototipo Li-Fi Net

La conexión ADSL será utilizada para conectar nuestro dispositivo Li-Fi la misma puede bajar su rendimiento de forma considerable cuando incrementamos el número de usuarios concurrentes así como por factores externos como la distancia a la central, por tal motivo es importante mantener un régimen de vigilancia periódico de nuestra red utilizando medidores de velocidad, la conexión ADSL llevo hace más de 14 años en prácticamente todo el planeta la cual paso rápidamente de los 256 Kbps hasta los 20 megas gracias al ADSL2+, por este motivo es posible imaginar que dentro de pocos años nuestros hogares se lograra utilizar toda la luz que nos rodea para establecer una conexión inalámbrica por medio de ADSL ya que el futuro de la transmisión de internet será por medio de la luz led, en estos momentos podemos garantizar que disponemos de la infraestructura para poder conectar muchos dispositivos Li-Fi.

Para lograr transmitir internet más rápido, barato y seguro a través de las bombillas de luz se requiere modular los cambios de intensidad que son imperceptibles por su alta velocidad, permitiéndonos de esta manera la transmisión de datos.

Los receptores estarán ubicados en la Laptop, los cuales logran captar esas variaciones de la intensidad de la luz interpretando la información codificada como puede ser el caso de un video de YouTube. Para lograr esta transmisión es necesario reemplazar los

tradicionales focos fluorescentes por una bombilla Li-Fi la cual tiene una especie de chip integrado, logrando con esto una transmisión de información inalámbrica como iluminación al mismo tiempo sin degradar la intensidad de la luz.

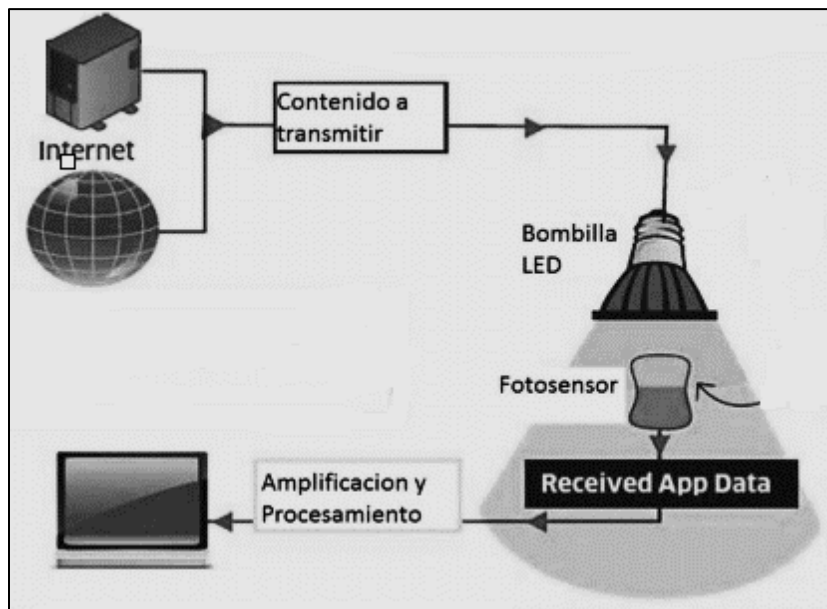


Figura 65. Transmisión Li-Fi en ADSL

Para lograr transmitir internet mediante Li-Fi es necesario conectar la bombilla de luz a un router, en este caso un router ADSL como se indica en la figura 65, el cual tiene uno a varios interfaces Ethernet pudiendo conectar el equipo directamente o bien en subredes comunicadas por medio de un concentrador “*hub*” o un conmutador “*switch*”, completando de esta manera el ciclo de recibir y enviar información de modo correcto. La transmisión inalámbrica Li-Fi es directa desde el transmisor hasta el dispositivo conectado con el receptor, por lo cual no se requiere autenticación de usuario, como se indica en la figura 66 únicamente se conecta el receptor Li-Fi al puerto Ethernet del dispositivo siendo en este caso una laptop.

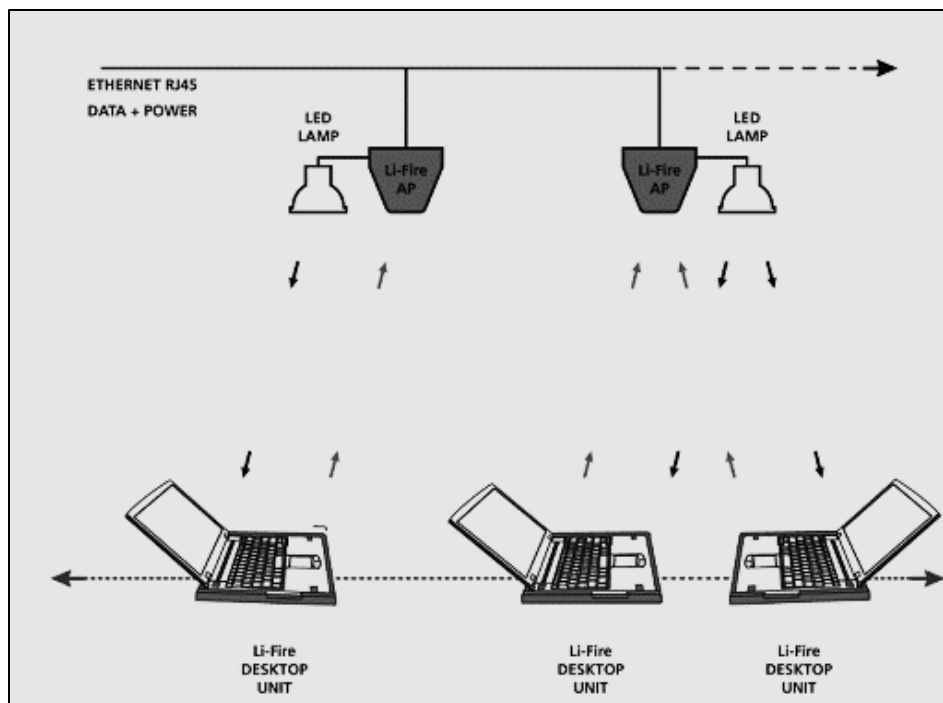


Figura 66. Red inalámbrica Li-Fi

Esta tecnología por el momento todavía mantiene algunas deficiencias, como su tasa de transferencia está muy lejos de lo prometido de 1Gbps como se promete de acuerdo a la investigación realizada, pero de acuerdo a lo visto las velocidades están mejorando significativamente al igual que sus precios, esto depende mucho de las mejoras en el OFDM “multiplexación por división de frecuencia ortogonales”, esta técnica permite que los LED’s sean ecualizados con una mayor frecuencia. La universidad de Strathclyde, ha desarrollado un nuevo tipo de micro LED’s con nitruro de Galio con la ventaja que su luz parpadea con mayor velocidad que los comerciales, estos micro LED’s reportan velocidades de hasta 3Gbps en métodos experimentales. La transmisión inalámbrica utilizada es bidireccional, utilizando un transceptor conectado en nuestro dispositivo el mismo que es encargado de recibir y transmitir información full dúplex sin degradar su velocidad, permitiendo con esto una mejor transmisión.

Capítulo 5. Construcción de un sistema de comunicación Li-Fi que no genere saturación

5. Análisis de tráfico y saturación en Li-Fi Net

5.1. Tráfico local en Li-Fi Net

La señal de internet que sale del switch llega a un codificador el cual lo transforma en parpadeos de luz, dicho parpadeo el ojo humano no es capaz de percibirlo, un decodificador ubicado en la computadora por medio de una conexión Ethernet interpreta la luz recibida y la descarga al ordenador.

El protocolo ARP "*adress resolution protocol*" permite descubrir cuál es la dirección a la cual queremos enviar un paquete, estableciendo de esta manera un tráfico de red. Este protocolo se encuentra conformado de dos paquetes que son ARP request el cual es encargado de preguntar dónde se encuentra el paquete, y el ARP reply responde donde se encuentra la dirección para poder enviar la información requerida, para lograr entender de mejor manera se creara una red de tres ordenadores conectando equipos Li-Fi NET.

Luego de crear una red local Li-Fi, ver figura 67, es necesario identificar cada uno de estos tres equipos, para ello podemos hacerlo mediante dos parámetros como lógico a nivel de software o físico a nivel de hardware, siendo el nivel físico el que se utiliza para identificar los equipos ya que este no cambia casi nunca al no ser que se reemplace la tarjeta de red del equipo. La dirección MAC se identifica con las tarjetas de red de cada ordenador, es necesario descubrir estas direcciones MAC para poder enviar un paquete a un dispositivo y generar tráfico en la red.

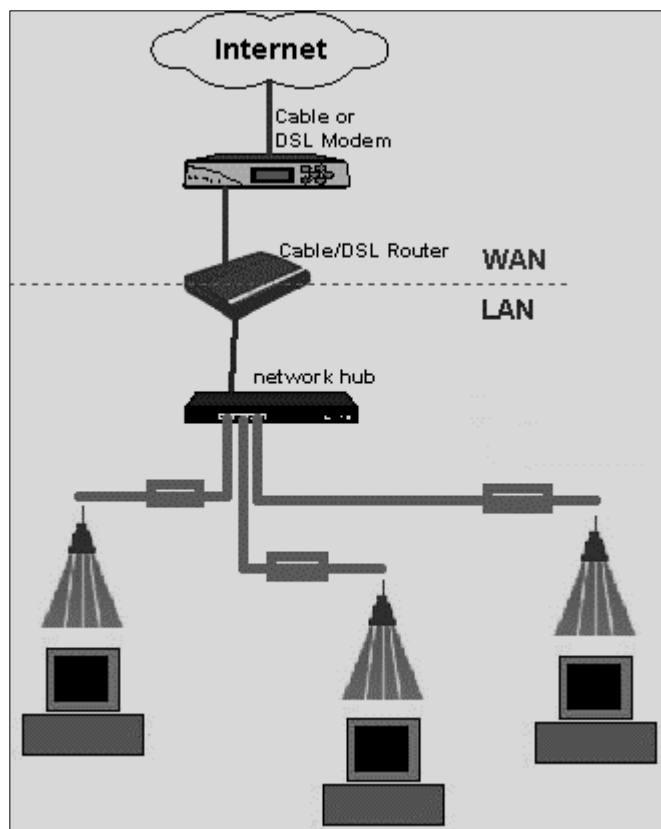


Figura 67. Red local prototipo Li-Fi Net

Cuando se envía un paquete el mismo se encuentra estructurado con diferentes tipos de información que se refleja en la figura 68. Al no tener la IP destino es necesario enviar un paquete por broadcast, esto quiere decir, a todos los equipos conectados a nuestra red preguntando la información que se requiere.

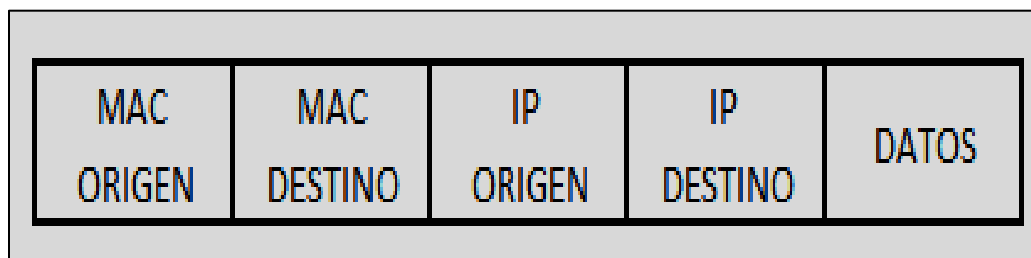


Figura 68. Información de un paquete.

Este reparto de paquetes lo realiza el ARP Request el mismo que se encuentra estructurado de la siguiente manera:

- **OPCODE:** Código de operación identifica de qué tipo es el paquete (0x0001)
 - **SENDER MAC:** Envía el paquete, seis conjuntos de dos números que identifica al equipo C8-0A-A9:A7:C5:D1
 - **SENDER IP:** 192.168.2.101
- TARGET MAC:** Recibe el paquete, seis conjuntos de dos números que identifica al equipo, es lo que no sabemos y queremos descubrir. 00-00-00-00-00
- **TARGET IP:** 192.168.2.103

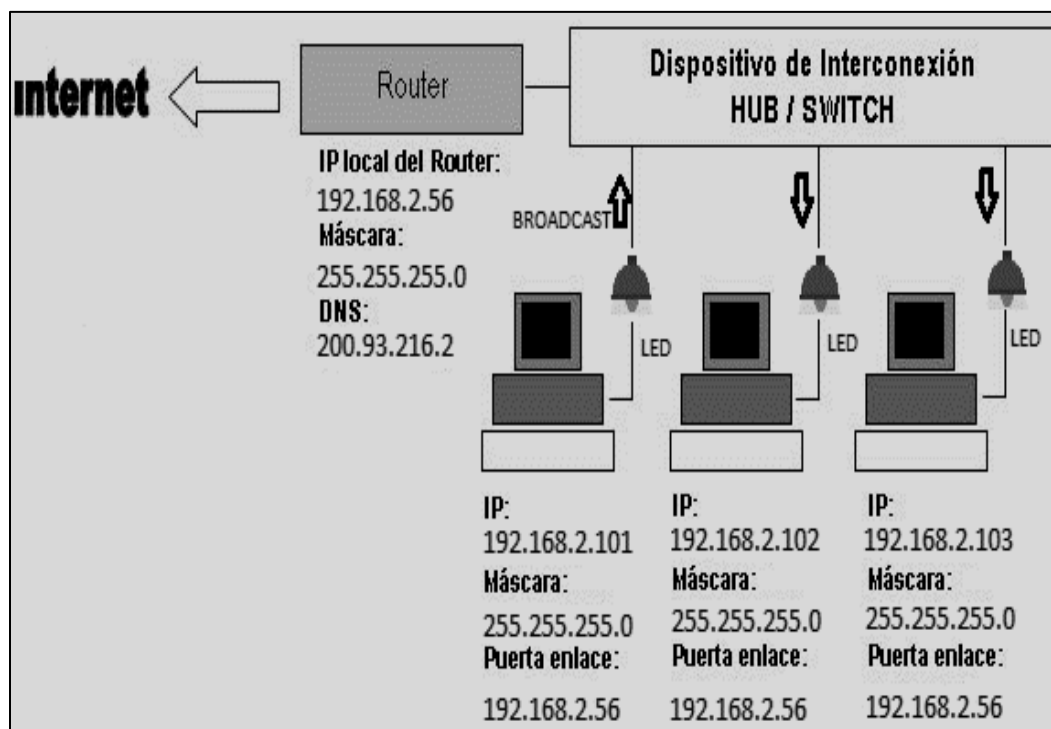


Figura 69. . Protocolo ARP en Li-Fi

Como se representa en la figura 69, el paquete es enviado por broadcast mediante ARP Request hasta encontrar el equipo destino, en este caso sería el equipo con IP

192.168.2.103, el ARP Reply se encarga de contestar con la dirección MAC de este equipo mediante Unicast de la siguiente manera:

- OPCODE: Código de operación identifica de qué tipo es el paquete (0x0002)
- SENDER MAC: **70-71-BC-6B-25-59**
- SENDER IP: 192.168.2.103
- TARGET MAC: C8-0A-A9:A7:C5:D1
- TARGET IP: 192.168.2.101

De esta manera se termina el protocolo ARP identificando la MAC de destino, este procedimiento es apuntado en un archivo del equipo 192.168.2.101 que se llama tabla de IP's la cual contiene las IP's con las que envió información y MAC's que corresponde a cada IP, en caso de no encontrar en esta tabla de IP's la MAC destino se procederá nuevamente a poner en marcha el protocolo ARP.

Este procedimiento que se representa de forma teórica, se analiza de manera práctica utilizando la herramienta multiplataforma Wireshark, con la finalidad de representar gráficamente lo que está pasando en el interior del cable de red capturando los paquetes de datos que circulan por la interfaz de red Li-Fi.

Luego de iniciar Wireshark como súper usuarios, siendo la interface eth0 la cual se encarga de las conexiones de red, se empieza a capturar paquetes realizando un ping al equipo 192.168.2.103 y ver como se genera este protocolo ARP. De esta manera se pretende descubrir cuál es la dirección MAC vinculada al equipo con IP 192.168.2.103

Los paquetes enviados por la red Li-Fi se muestran por medio de Wireshark, el cual identifica algunos tipos de paquetes, siendo necesario filtrar solo los paquetes ARP para lo

cual en Wireshark se analiza la información que este programa nos despliega y de esta manera realizar una demostración la parte teórica.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
962	15.2562740	HewlettP_76:9d:e2	Broadcast	ARP	60	who has 186.101.119.245? Tell 186.101.119.241
1011	16.3567610	Pegatron_90:c9:19	Broadcast	ARP	60	who has 192.168.2.194? Tell 192.168.2.118
1154	18.8950610	HewlettP_76:9d:e2	Broadcast	ARP	60	who has 186.101.119.245? Tell 186.101.119.241
1165	19.0834260	QuantaCo_a7:c5:d1	Pegatron_6b:25:59	ARP	42	who has 192.168.2.103? Tell 192.168.2.101
1197	19.8624930	QuantaCo_a7:c5:d1	Broadcast	ARP	42	who has 192.168.2.127? Tell 192.168.2.101
1209	20.0827960	QuantaCo_a7:c5:d1	Pegatron_6b:25:59	ARP	42	who has 192.168.2.103? Tell 192.168.2.101
1222	20.2430230	54:a0:50:e0:37:db	Broadcast	ARP	60	who has 1.1.1.41? Tell 1.1.1.221

<ul style="list-style-type: none"> [-] Frame 1165: 42 bytes on wire (336 bits), 42 bytes captured (336 bits) on interface 0 [-] Ethernet II, Src: QuantaCo_a7:c5:d1 (c8:0a:a9:a7:c5:d1), Dst: Pegatron_6b:25:59 (70:71:bc:6b:25:59) <ul style="list-style-type: none"> [-] Destination: Pegatron_6b:25:59 (70:71:bc:6b:25:59) <ul style="list-style-type: none"> Address: Pegatron_6b:25:59 (70:71:bc:6b:25:59)0. = LG bit: Globally unique address (factory default)0. = IG bit: Individual address (unicast) [-] Source: QuantaCo_a7:c5:d1 (c8:0a:a9:a7:c5:d1) <ul style="list-style-type: none"> Address: QuantaCo_a7:c5:d1 (c8:0a:a9:a7:c5:d1)0. = LG bit: Globally unique address (factory default)0. = IG bit: Individual address (unicast) [-] Type: ARP (0x0806) [-] Address Resolution Protocol (request) <ul style="list-style-type: none"> Hardware type: Ethernet (1) Protocol type: IP (0x0800) Hardware size: 6 Protocol size: 4 Opcode: request (1) Sender MAC address: QuantaCo_a7:c5:d1 (c8:0a:a9:a7:c5:d1) Sender IP address: 192.168.2.101 (192.168.2.101) Target MAC address: Pegatron_6b:25:59 (70:71:bc:6b:25:59) Target IP address: 192.168.2.103 (192.168.2.103) 						
0000	70 71 bc 6b 25 59 c8 0a	a9 a7 c5 d1 08 06 00 01	pq.k%Y..			
0010	08 00 06 04 00 01 c8 0a	a9 a7 c5 d1 c0 a8 02 65e			
0020	70 71 bc 6b 25 59 c0 a8	02 67	pq.k%Y.. .g			

Figura 70. Protocolo ARP request en wireshark

En este caso, la información de la figura 70 refleja algunos equipos conectados en esta red, de esta manera demostramos que el ARP Request envía un paquete a través de broadcast a todas la maquinas o elementos de nuestra red, la pregunta es muy clara y dice: quien tiene la dirección IP 192.168.2.103, por favor envíame a la dirección 192.168.2.101. Este paquete se encuentra formado por tres capas como la Frame, Ethernet II, “*Adress Resolution Protocol*” en los cuales se visualiza información importante como el tipo de ARP su origen y destino.

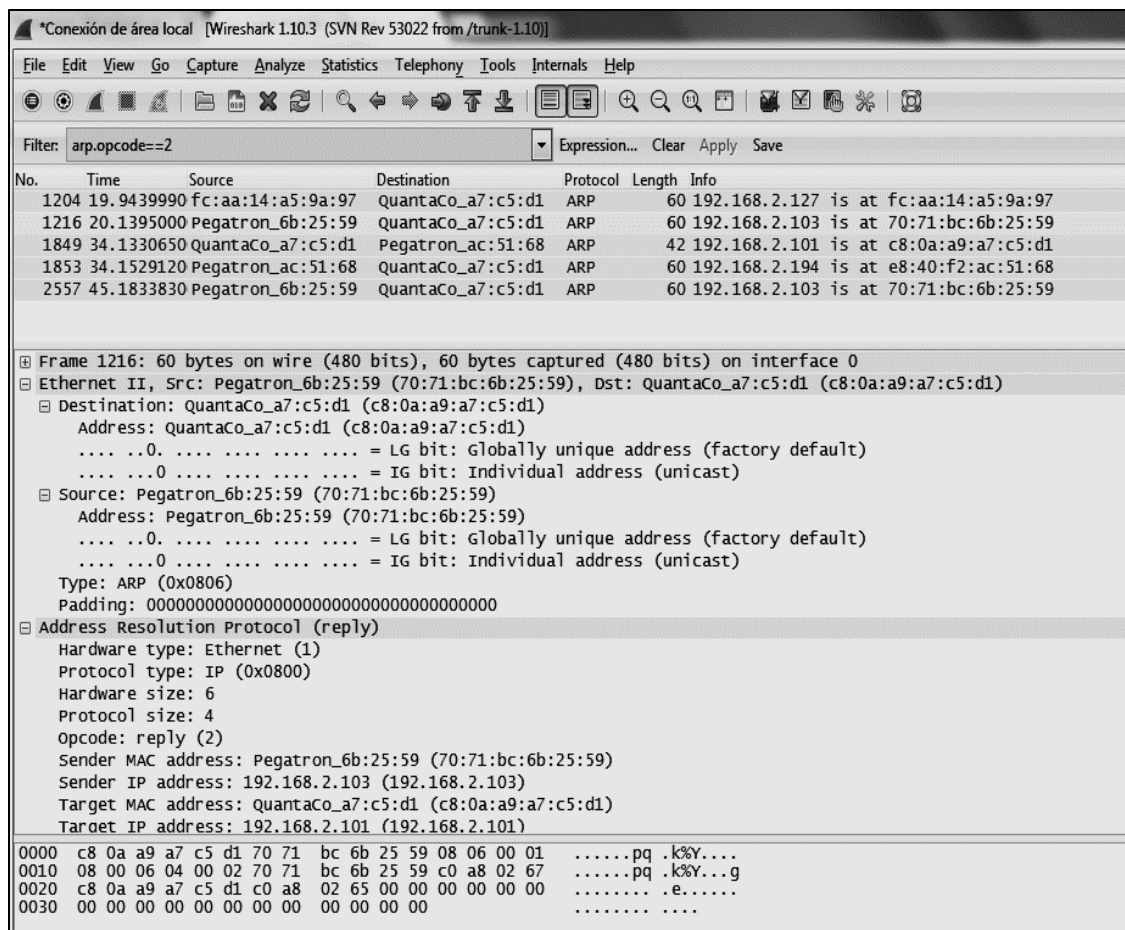


Figura 71. Protocolo ARP reply en wireshark.

Como representa la figura 71, se filtra todos los paquetes ARP Reply y se analiza la información que nos proporciona Wireshark, en este caso contesta cual es la dirección que se pregunta siendo la MAC **70-71-BC-6B-25-59**, este paquete le llegara de forma directa al equipo que pregunto, terminando de esta manera la demostración del protocolo por medio de wireshark. Se repite esta pregunta cada cierto tiempo con la finalidad de mantener una tabla de IP's actualizada y con datos reales ya que podemos tener usuarios malignos dentro de nuestra red.

5.2. Tráfico Li-Fi Net en internet.

Se examina el tráfico generado a través de Wireshark cuando se realiza un contacto con un dispositivo que se encuentra fuera de nuestra red local, para ello lo primero que

se ejecuta en este caso es un ping a una página web de google siendo el servidor conectado con IP 181.198.80.174.

Luego de esto se procede a ejecutar Wireshark, en el cual se genera un protocolo ARP preguntando en esta ocasión cual es la puerta de enlace, ya que el paquete de forma forzosa debe pasar por ahí antes de salir de nuestra red local, como se puede visualizar en la información que se proporciona en la figura 72, respondiendo la puerta de enlace que MAC tiene asignada.

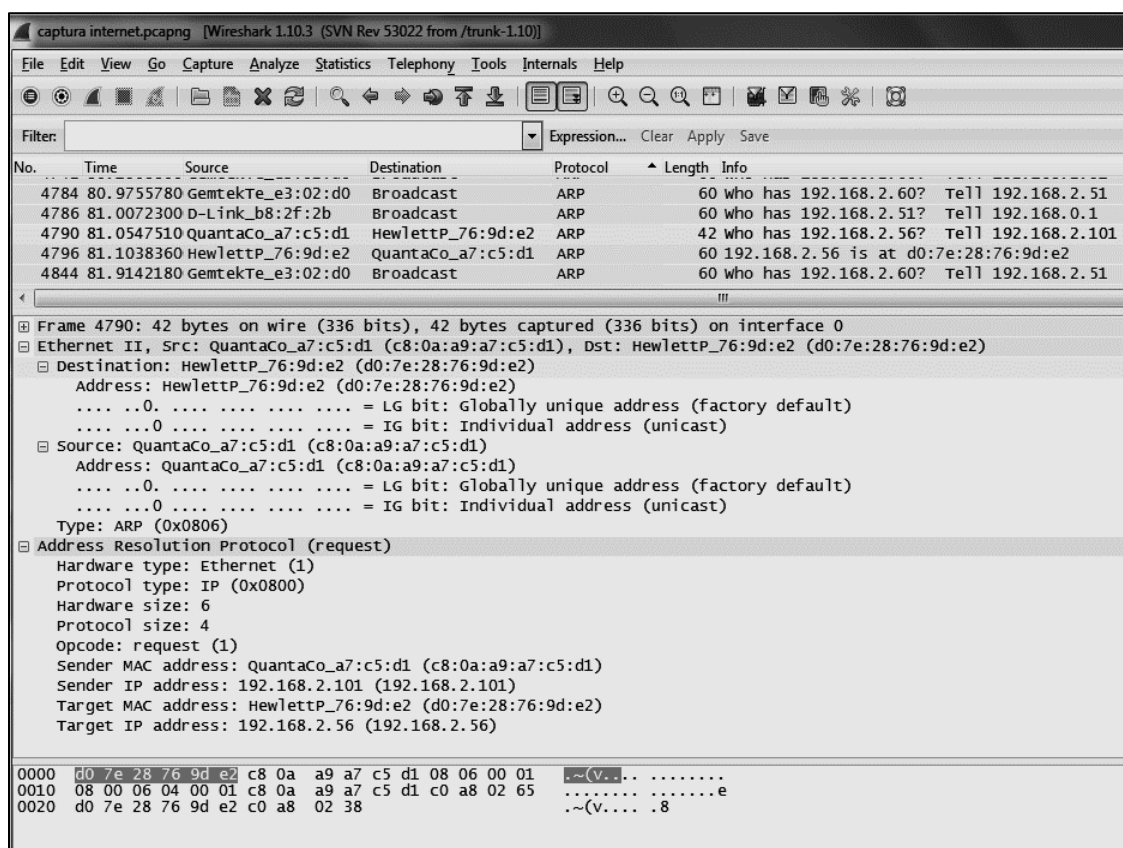


Figura 72. Análisis de tráfico en internet

Es destacable examinar los paquetes DNS los cuales establecen la conexión como también los paquetes de protocolo ICMP los cual tiene un origen que corresponde a la IP del equipo así como un destino que corresponde a la IP de google, de esta manera permite demostrar

que aun cuando el paquete a nivel de IP sea enviado a google realmente debería pasar primero por la puerta de enlace o router.

La capa Ethernet del paquete se comprueba que el origen es la MAC correcta de nuestro equipo como se muestra en la figura 73, pero el destino es la MAC que corresponde a la puerta de enlace, así se descubre también que en la capa de “*Internet Protocol*”, la IP de origen es la del equipo, pero en realidad la IP destino corresponde a google. Esto explica que a nivel de IP cuando se envía un paquete a una red fuera de nuestra red local el destino es la IP a la cual se quiere llegar pero a nivel físico el destino es el router.

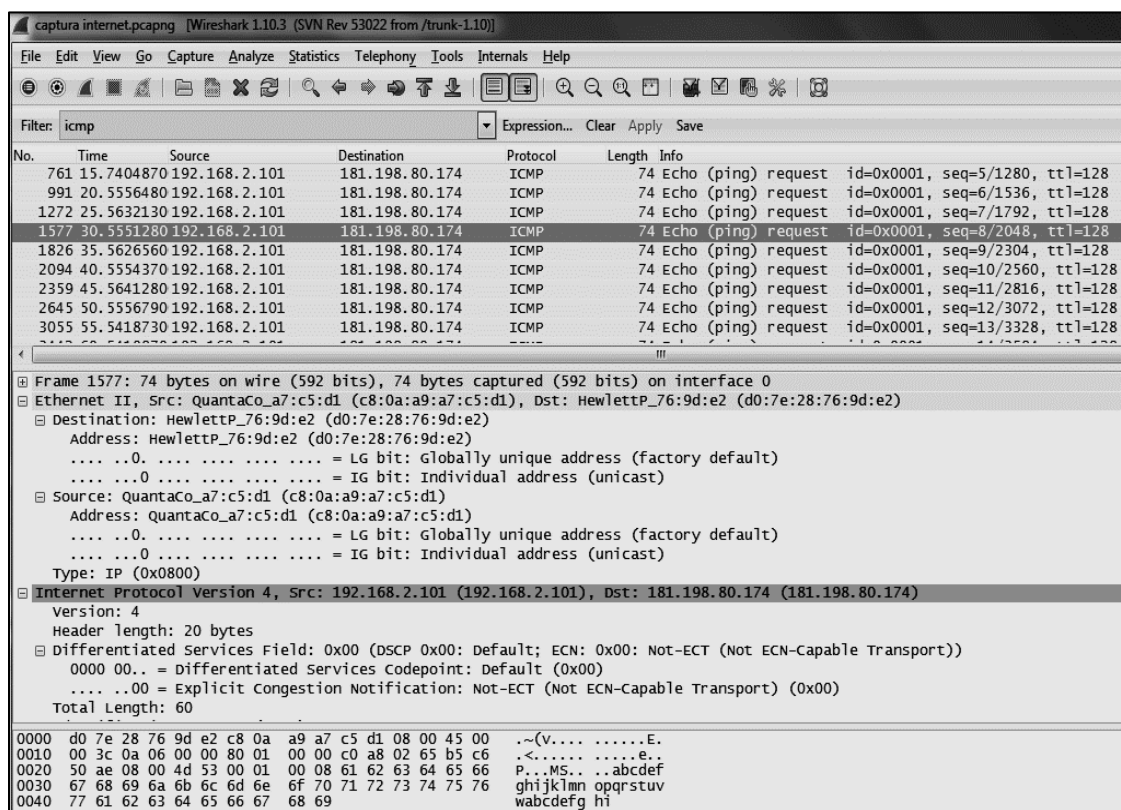


Figura 73. Capa Ethernet en Li-Fi

5.3. Análisis de saturación en prototipo Li-Fi Net

Para realizar un análisis de saturación es necesario mantener una conexión de dispositivos Wi-Fi & Li-Fi al mismo tiempo con la finalidad de disponer de la información necesaria que permita establecer el comportamiento de estas tecnologías, si las mismas son sometidas a pruebas que saturen la transmisión.

Se utiliza para la práctica una conexión de banda ancha fija que en la actualidad en su gran mayoría son utilizados por usuarios de internet en casa con una velocidad de 4 Megas, esto sí, antes de realizar la comparación de las tecnologías es importante señalar que la compartición promedio que ofrecen la mayoría de planes es de 8 a 1, esto quiere decir que el ancho de banda puede ser compartido con hasta ocho usuarios a la vez.

Siendo necesario calcular la velocidad de descarga real y de esta manera poder realizar la práctica del análisis comparativo de saturación a partir de los 4 Mbps como podemos ver en la figura 74, de tal manera si dividimos 4096 para 8 usuarios tendremos 512 Kbps, esto quiere decir que podríamos descargar una imagen de 512 Kb en un segundo.



Figura 74. Velocidad de descarga

A partir de esta información se diseña una red híbrida conformada por equipos que mantienen una transmisión de datos inalámbrica bajo las tecnologías Li-Fi y Wi-Fi, la misma que se encuentra diseñada de la siguiente manera, ver figura 75.

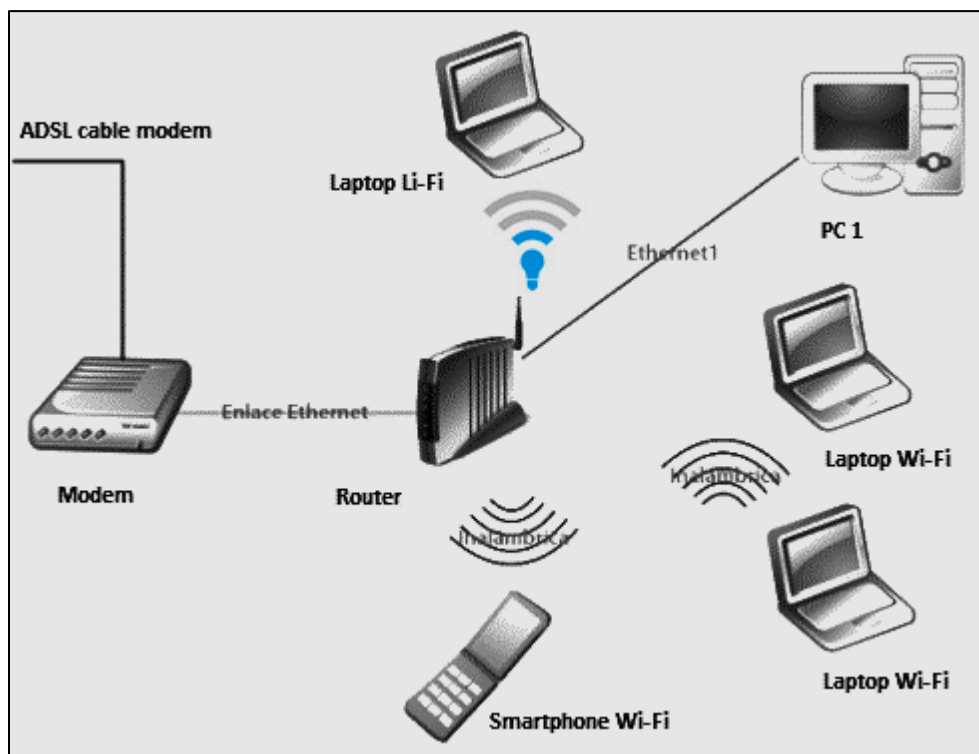


Figura 75. Diseño de red híbrida

Al descargar archivos de internet como películas, música o videos se conocerá la velocidad real de descarga, para lo cual utilizaremos una web llamada *thinkbroadband* que nos permita realizar este tipo de pruebas de conexión y analizar la velocidad de descarga en los dispositivos, siendo posible mediante este enlace probar y descarga un conjunto de archivos de diferentes tamaños que simulan ser reales.




	Small File 20 MB	Standard quality movie trailer	80secs @ 2 Mbps 20secs @ 8 Mbps 6secs @ 30 Mbps 3secs @ 60 Mbps 1.5secs @ 120 Mbps
		IPv4 Port: 80, 81, 8080 IPv6 Port: 80, 81, 8080	
	Small File 10 MB	A 30 second video clip	40secs @ 2 Mbps 10secs @ 8 Mbps 3secs @ 30 Mbps 1.5secs @ 60 Mbps 0.7secs @ 120 Mbps
		IPv4 Port: 80, 81, 8080 IPv6 Port: 80, 81, 8080	
 20MB.zip 0,4/20,0 MB, Quedan 30 min			

Figura 76. Enlace thinkbroadband

Un archivo pequeño de 20 MB proporciona la ayuda necesaria para probar la velocidad de descarga del servidor, los archivos grandes pueden ser utilizados si se mantiene una velocidad de conexión superior a 10 Mbps el cual no es nuestro caso. Por medio del programa BitMeter se analiza de forma gráfica el comportamiento de bajada de archivos en cada tecnología de transmisión inalámbrica de datos conectado en la red con la finalidad de poder verificar su comportamiento, la escala de los gráficos se encuentra ajustada a un valor máximo de 100000 bytes/seg siendo las unidades para el área de lectura en Kb/s. Los colores de la gráfica se establecen de la siguiente manera:

- El color negro usado para dibujar las líneas o barras en el gráfico principal, que representa la velocidad de descarga
- El color gris usado para dibujar la zona donde se cruzan las barras de carga (UL) y descarga (DL) en el grafico principal
- El color blanco usado para dibujar las líneas o barras en el grafico principal, que representa la velocidad de carga

Se descarga 20 MB, se estima un tiempo promedio de la siguiente manera:

$$20 * 1000 = 20000$$

$$20000 / 512 = 39,0625$$

$$39,0625 / 60 = \mathbf{0,65}$$

Este resultado indica la demora aproximada de descarga de un poco más de un minuto, esta información es importante ya que permite establecer un rango aproximado de descarga el cual debe ser constante independiente del número de equipos que estén conectados en la red con la finalidad de evitar una pérdida de velocidad en la transmisión de datos. La saturación puede ser ocasionada por un factor simple como es el aumento de dispositivos ocasionado por una demanda excesiva en la red que inciden directamente en su rendimiento.

Siendo Li-Fi un sistema de conexión por luz al internet, es decir emplea el espectro de luz visible para permitir la comunicación inalámbrica, se compara esta tecnología en algunas prácticas con el tradicional Wi-Fi que emplea frecuencia de radio, el prototipo Li-Fi utilizado mantiene una conexión de 400 Kbps, el cual permitirá realizar las pruebas necesarias.

Se observa los resultados de la prueba realizada, la misma que coincide con los resultados teóricos de una velocidad de descarga de aproximado de un poco más de un minuto siendo el resultado comparativo con una diferencia mínima de 15 segundos. Se establece tres prácticas con un incremento paulatino de equipos conectados con la finalidad de establecer el comportamiento de estas tecnologías y determinar los causales necesarios para determinar si existe saturación. Para lo cual se crea y configura una red local adsl conformado por dos equipos mediante conexión inalámbrica Li-Fi y Wi-Fi respectivamente con la finalidad de comprobar el tiempo que demora en descargar 20 MB desde un servidor externo.

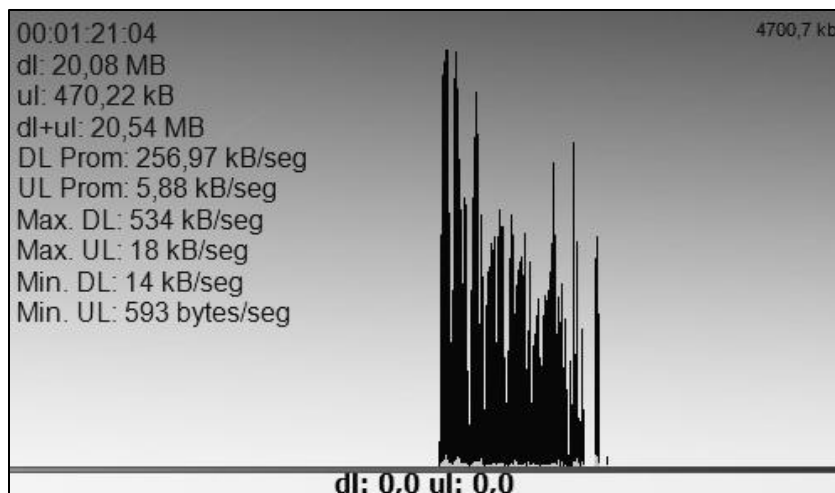


Figura 77. Práctica 1. Wi-Fi

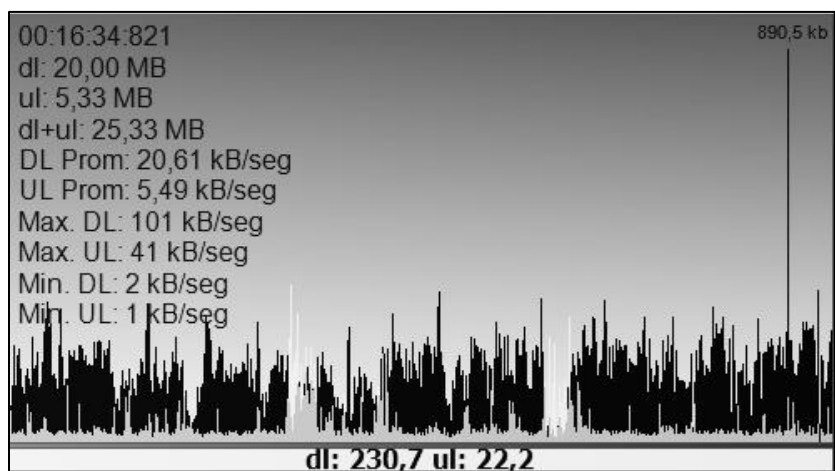


Figura 78. Práctica 1. Li-Fi

En las figuras se puede observar el comportamiento de estas tecnologías al momento de ejecutar en el mismo instante una descarga igual de 20 MB, si bien es cierto el proceso de la descarga es mucho más rápido en Wi-Fi, ya que el prototipo Li-Fi mantiene una velocidad de transmisión inferior y al ser importante el análisis de saturación es necesario crear y configurar una red local con router adsl conformado por tres equipos Wi-Fi y un equipo Li-Fi mediante conexión inalámbrica con la finalidad de comprobar el tiempo que se demora en descargar 20 MB de un servidor externo, siendo estos los resultados.

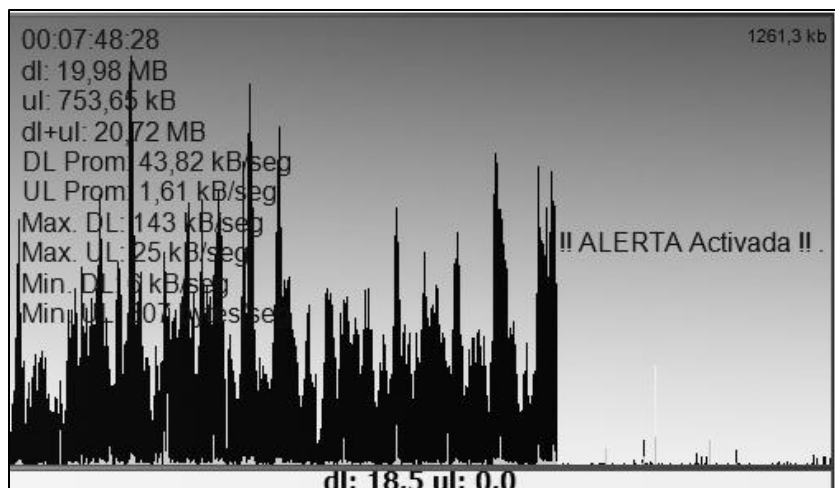


Figura 79. Práctica 2. Wi-Fi

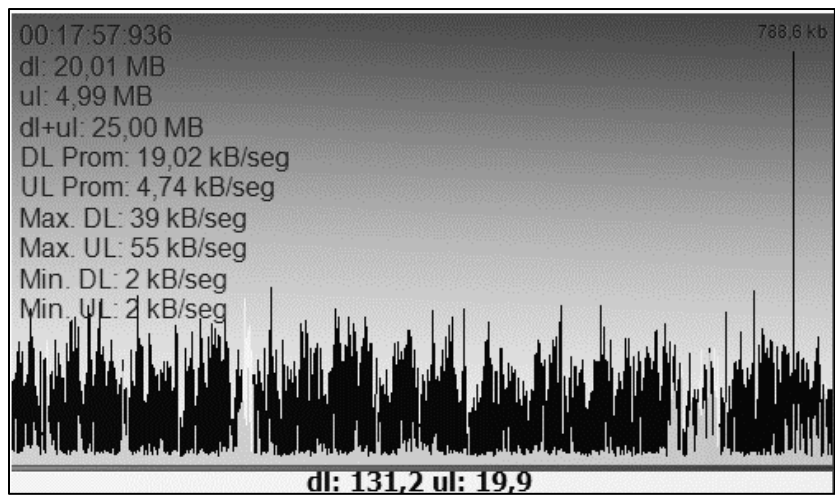


Figura 80. Práctica 2. Li-Fi

En esta ocasión se puede verificar en la figura 79 que la red inalámbrica Wi-Fi decae de forma significativa su transmisión ocasionado por el aumento de equipos de esta tecnología conectados en el router adsl saturando la transmisión la cual activa la alerta que representa una caída en la velocidad siendo consecuencia de una saturación en la red. Se establece una nueva practica para lo cual se crea y configura una red local con router adsl conformado por cuatro equipos Wi-Fi y un equipo Li-Fi mediante conexión inalámbrica con la finalidad de comprobar el tiempo que se demora en descargar 20 MB de un servidor externo.

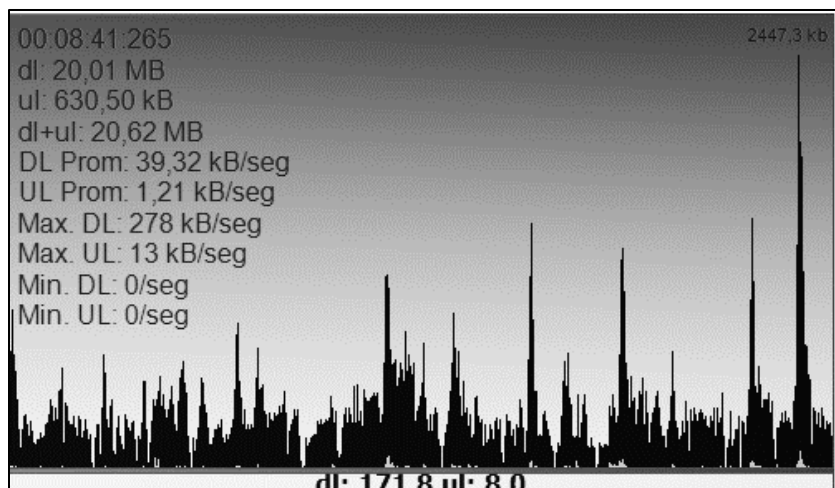


Figura 81. Práctica 3. Wi-Fi

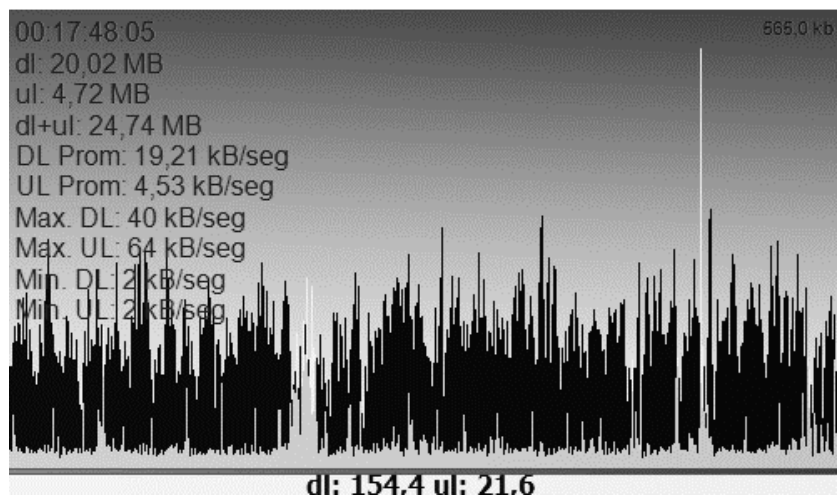


Figura 82. Práctica 3. Li-Fi

Luego de medir el ancho de banda en las pruebas realizadas controlando la velocidad de bajada de la conexión a internet, se genera un gráfico estadístico con un conjunto de datos recopilados los cuales nos permiten establecer algunos resultados.

La simulación de saturación en la red construida para estas pruebas se concluye mediante los resultados obtenidos, que existe una disminución paulatina de la velocidad y tiempo de descarga en los equipos que mantienen una comunicación inalámbrica Wi-Fi ocasionado por

el incremento de dispositivos con esta tecnología a la red, lo cual terminaría produciendo una saturación en la red, esta simulación no es muy distante de la realidad ya que son muchos los dispositivos que actualmente se encuentran conectados que ya provocan saturación por la enorme demanda de datos inalámbricos que prácticamente están acorralando a la tecnología Wi-Fi, a su vez bajo la misma condición el equipo Li-Fi mantiene un equilibrio del tiempo de bajada como su velocidad de descarga siendo esto muy independiente del número de equipos que se conecten en la red.

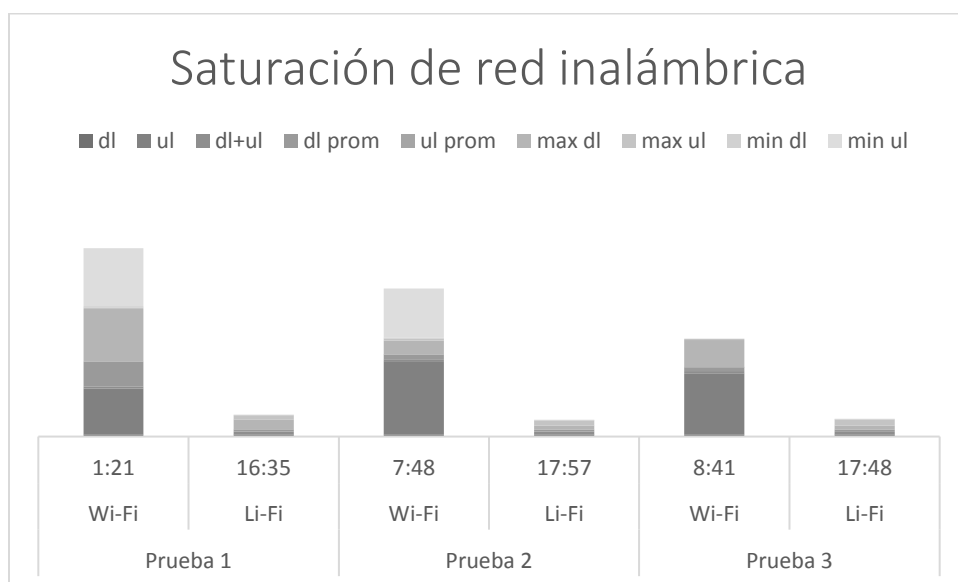


Figura 83. Saturación de red inalámbrica

En las pruebas realizadas se determina que la velocidad de transmisión en Li-Fi no se encuentra degradada, manteniendo constante su velocidad, lo cual es posible al tener una topología de transmisión peer to peer eliminando cualquier posibilidad de saturación en el canal de transmisión. El prototipo no produce saturación cuando existen múltiples conexiones en simultáneo.

Capítulo 6. Evaluación preliminar del prototipo a partir de la transmisión de datos

6. Análisis de transmisión inalámbrica en red ADSL.

Para realizar un análisis comparativo de estas dos tecnologías de transmisión inalámbrica utilizamos una red ADSL, que una gran parte de nuestro país utiliza para conectarse a internet vía banda ancha fija. El acceso al internet de acuerdo a esta tecnología lo estamos recibiendo sobre cables pares de cobre de la conexión telefónica sin interferir con las conversaciones. Las velocidades de transmisión básicamente dependen del proveedor pudiendo llegar a variar de acuerdo al plan de internet contratado fluctuando entre 2 hasta 20 megas.

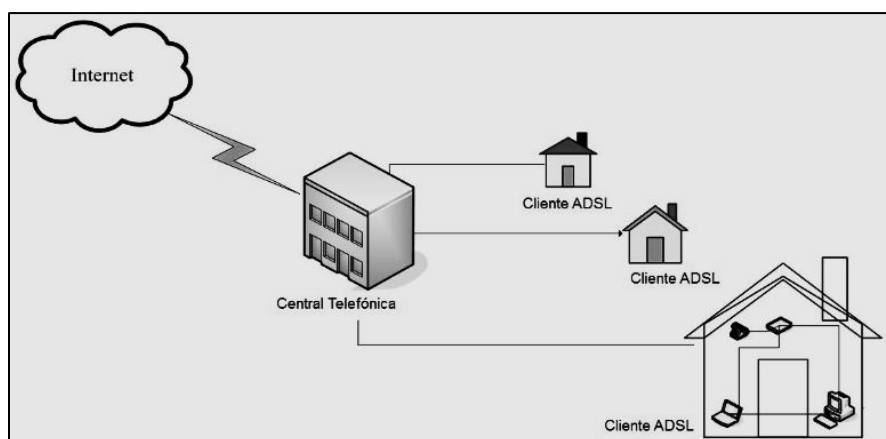


Figura 84. Transmisión inalámbrica con ADSL

Las velocidades de subida y bajada de datos está relacionado con el tipo de conexión sea esta simétrica o a su vez asimétrica, normalmente la conexión ADSL es asimétrica esto significa que solicitando al proveedor de servicio de internet unos 10 megas, ellos nos entregaran 1 a 2 megas de subida. Este tipo de conexión ADSL no es necesario tener un uptime elevado ya que no será utilizado para negocio básicamente son conexiones que las encontramos

en casa sin mucha demanda de pedidos al ISP para restaurar rápidamente la conexión si llegara a perderse.

La latencia en la conexión ADSL está vinculada al tiempo que tarda en comunicarse la computadora con el servidor o con el resto del mundo, para mantener una mejor respuesta es importante mantener una latencia bastante baja, la latencia en ADSL se encuentra en los rangos normales.

6.1. Requisitos de ancho de banda.

Para realizar el análisis de estas tecnologías es necesario precisar los requerimientos básicos de ancho de banda y con esto lograr establecer una transmisión de video. Para recibir una buena calidad de video del internet en nuestros dispositivos es necesario tener un mayor ancho de banda ya que el video ocupa más espacio, esto se mide en bitrate que representa la cantidad de bits por segundo de tu señal de video, esto quiere decir a mayor resolución de video se requiere un bitrate mayor para conservar la calidad.

De esta manera se establece cual es la necesidad del ancho de banda que el dispositivo de conexión inalámbrica necesita para enviar el video a un equipo conectado sea este una laptop, tablet, smartphone, etc. Si es necesario una calidad de video que se vea bien en móviles, podríamos apuntar a un bitrate de 200 Kbps, pero si la intención es transmitir un video en un ordenador de escritorio o laptop es necesario un mayor ancho de banda por las dimensiones de la imagen a proyectar por lo que se podría aconsejar un bitrate en torno a los 400 Kbps. Los dispositivos que no cuenten con estos requerimientos, simplemente no podrán ver nada o experimentaran cortes que les hará desagradable la transmisión.

El problema radica que las conexiones de banda ancha que se comercializa tienen una capacidad distinta de velocidad de subida y bajada, para lograr transmitir la señal de video es necesario bajar datos de internet y estos deben mantener una velocidad de 400 Kbps por equipo conectado en nuestra red inalámbrica.

La conexión a internet también se mide en Kilobits por segundo, de esta manera el bitrate del video a proyectar tiene la misma medida que el bitrate de la conexión a internet, esto representa que 1 mega de subida es equivalente a 1024 Kbps de subida.

6.1.1. Medición de velocidad de Internet downstream vs. upstream.

Los usuarios típicos de internet normalmente descargan mayor cantidad de datos de los que suben, de esta manera se establece que el tráfico de downstream fluye hacia el usuario y el tráfico de upstream fluye desde el usuario. El acceso a internet utilizado es ADSL que significa línea de suscripción digital asimétrico, este tratamiento desigual en las velocidades de subida y bajada le da el nombre de “asimétrico”, un ADSL estándar proporciona una velocidad máxima de 3.3 Mbps para upstream y 24 Mbps para downstream, con esto se concluye que la velocidad de descarga es mucho más rápida que la velocidad de subida.

Siendo así, se procede a realizar las pruebas respectivas para saber cuál es la velocidad real de subida y bajada que estamos recibiendo por parte de nuestro ISP, para lo cual se requiere de una herramienta de análisis de velocidad de banda ancha, con servidores a nivel global que permitirán realizar las pruebas de conexión a internet.

Este análisis se lo realiza conectando vía cable de red al router, en caso contrario si lo ejecutamos desde nuestro Wi-Fi se afectarían el resultado así también es necesario mantener las aplicaciones cerradas que puedan consumir ancho de banda como Skype, P2P, Spotify, etc.

Luego se dispone de la información necesaria para realizar los cálculos y establecer si la conexión de internet que se dispone nos brinda la velocidad suficiente de bajada que nos permita mantener una señal de video adecuado en nuestros dispositivos.

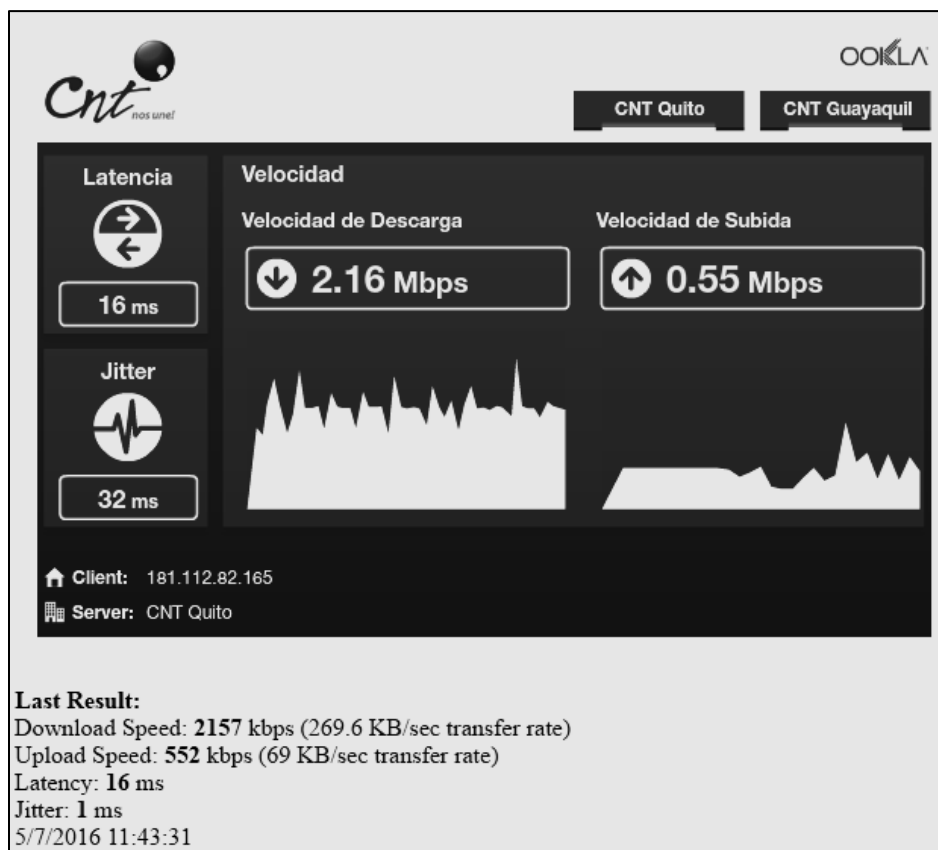


Figura 85. Medición velocidad ADSL

El tiempo que se necesita para poder abrir una página web disminuye si aumentamos la velocidad de acceso a internet, sin embargo a partir de los 10 megas la latencia es un aspecto predominante ya que el aumento de velocidad será imperceptible si la latencia no se mejora, así se comprueba la latencia que nos indica los ping en milisegundos en el test de velocidad, en este caso una latencia bastante aceptable de 16 ms una como señala la figura 85.

Esta latencia produce un retardo en la entrega de paquetes dentro de la red, la mayoría de usuarios no le presta atención a este dato, estando la media de latencia aceptable en

49 milisegundos siendo preocupante si esta se encuentra por encima de los 100 milisegundos. Otro dato a tomar en cuenta es el “*Jitter*” sobre todo si están acostumbrados a escuchar música por internet siendo a partir de los 200 milisegundos que empezaran a mantener problemas en los dispositivo, esto es fácil comprobar si tienen problemas de retardo en la voz cuando utilizan Skype.

6.1.2. Conexión inalámbrica Wi-Fi a la red ADSL.

Gracias al aumento de los dispositivos que disponen de conectividad inalámbrica, las tecnologías vinculadas que ayuden a establecer una conexión hoy en día se han convertido en parte de nuestro entorno ya que las encontramos en bibliotecas, restaurantes, aeropuertos, etc. incluso en casi todos los hogares permitiéndonos de esta manera una conexión inalámbrica a las redes de datos. En la actualidad conforme al avance de la tecnología tienen las versiones (n) como la más popular como pueden analizar en la figura 86, ya sea por su gran velocidad y costo accesible que esta nos brinda.

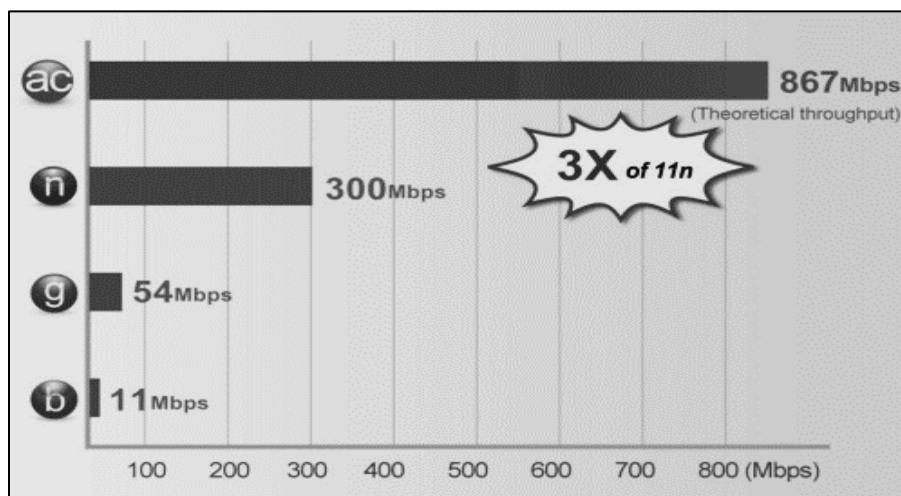


Figura 86. Versiones inalámbrica Wi-Fi.

Teniendo en cuenta que los datos transmitidos que son enviados por el estándar IEEE 802.11 viajan por el aire en forma de ondas electromagnéticas estando expuestos a efectos de atenuación y degradación típicos en este tipo de transmisión, se concluye que se mantiene una velocidad teórica de 300 Mbps con la cual promocionan el producto.

Haciendo referencia al usuario normal como el residencial es necesario analizar las velocidades de conexión a internet que en la actualidad ofrece los ISP “*Proveedor de acceso a internet*”. Siendo los 3 Mbps el más popular por su bajo costo, sobre esta perspectiva, la velocidad establecida por el equipo Wi-Fi 802.11n teórica de 300 Mbps estaría realmente muy por encima de los 3 Mbps que nos ofrece un ISP.

Al momento que se conecte el dispositivo Wi-Fi los datos que son transmitidos por el mismo se lo realiza por un solo canal denominado “*Half-Dúplex*”, como se ilustra en la figura 87 este tipo de canal es capaz de mantener una comunicación bidireccional, enviando y recibiendo mensajes pero no es posible transmitir al mismo tiempo.

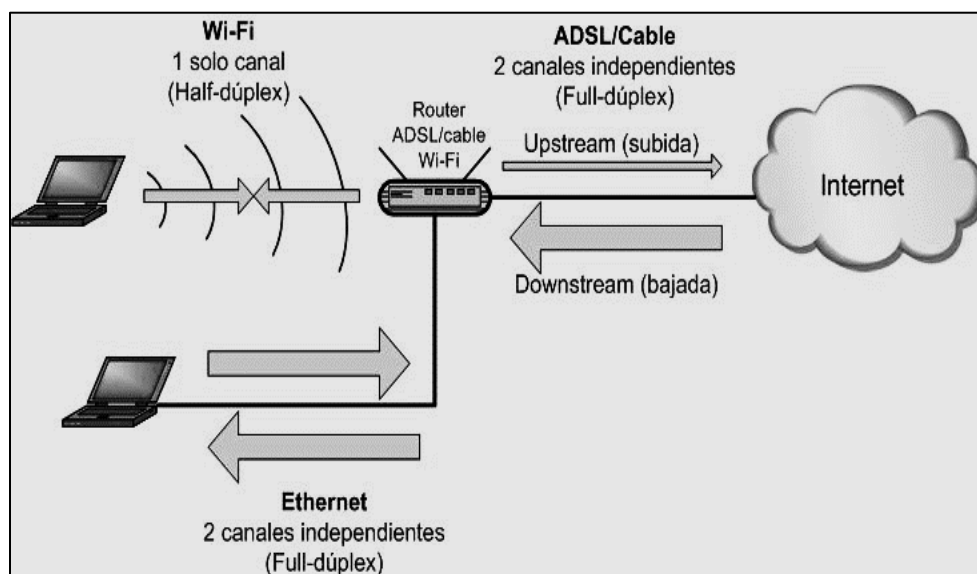


Figura 87. Canal Wi-Fi half duplex

Por este motivo, al mantener un solo canal de transmisión y recepción nos obliga dividir la velocidad teórica establecida por el estándar 802.11n de 300 Mbps, quedando establecida la velocidad real que reciben nuestros dispositivos inalámbricos en 150 Mbps.

En este caso según la descripción del resultado en la figura 85 se puede señalar que se mantiene una velocidad de descarga de 2157 kbps los mismos que hasta el momento son suficientes para ejecutar un video en nuestro dispositivo sin ningún problema los cuales son ratificados en las pruebas realizadas a una distancia de dos metros del router ADSL con la finalidad de mantener la misma distancia para las pruebas entre las dos tecnologías.

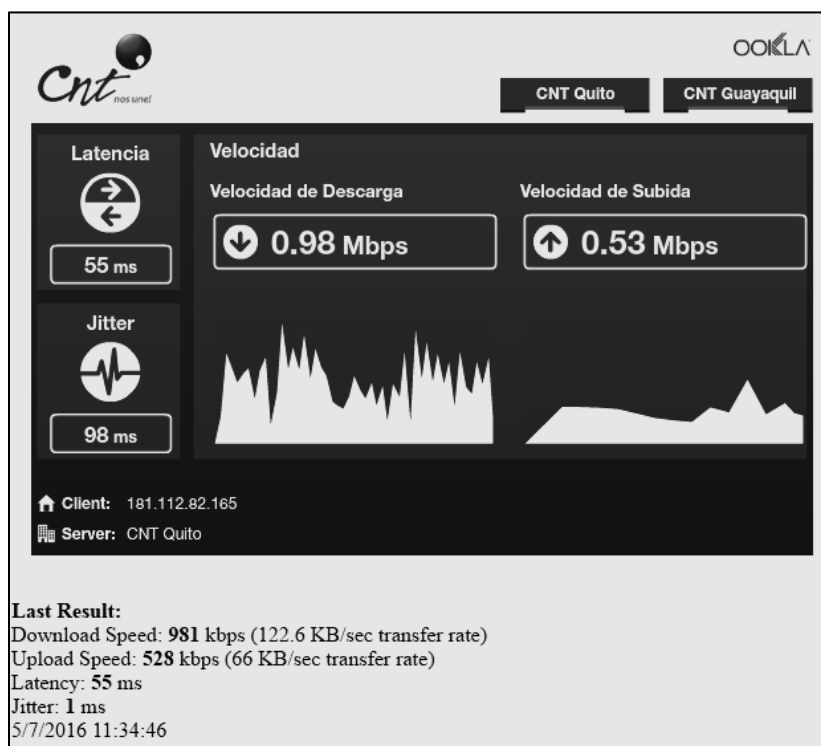


Figura 88. Medición velocidad Wi-Fi dispositivo (A)

Como se analiza en la figura 88, la velocidad del dispositivo (A) disminuye drásticamente al momento de realizar la prueba de velocidad utilizando el test desde un equipo conectado de forma inalámbrica utilizando una red Wi-Fi, esto se debe a que posee una serie de

factores negativos que son determinantes a la hora de alcanzar el máximo del ancho de banda, a todo se suma que el canal es semiduplex, es decir, solo es posible enviar o recibir datos, pero no ambos al mismo tiempo.

Si el dispositivo (A) se encuentra conectado a una velocidad de 981 kbps y tarda en enviar un mensaje 2 segundos. Otro dispositivo (B) en la figura 89, se conecta a 467 Kbps de modo que este tardara 200 segundos, esto representa una disminución de la velocidad de transmisión que afecta directamente al dispositivo (A), ya que cada vez que el dispositivo (B) envíe un mensaje, el dispositivo (A) tendrá que esperar el equivalente a 200 de los suyos.

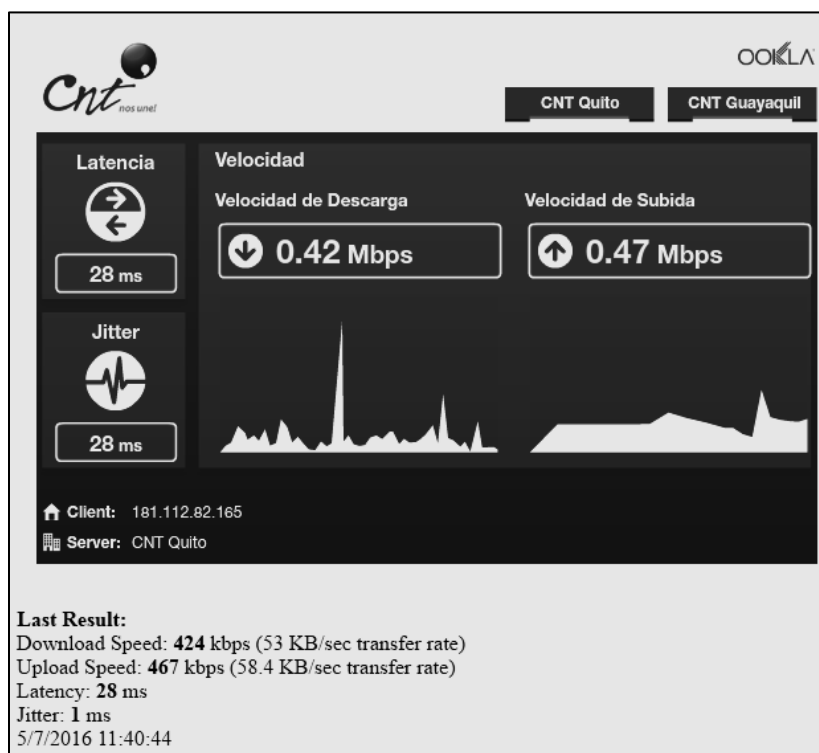


Figura 89. Medición velocidad Wi-Fi dispositivo (A) (B)

Los dispositivos (A) (B) estarían bajo las métricas de conectividad necesarios para poder transmitir un video sin mantener algún tipo de cortes en la transmisión, esto de acuerdo al límite señalado de 400 Kbps para lograr una óptima reproducción de video. Al conectar un tercer

dispositivo en esta red inalámbrica Wi-Fi se produce una saturación en el canal el mismo que se verá reflejado en todas las conexiones establecidas logrando con esto que los dispositivos experimenten problemas en la conexión Wi-Fi inalámbrica.

6.2. Análisis del prototipo a partir de la transmisión de datos

Los datos se transmiten a través de una lámpara led que se encuentra conectada a la red eléctrica, la cual se encuentra equipada con un dispositivo de procesamiento digital que permite la codificación y la modulación, convirtiendo los impulsos eléctricos en pulsos de luz. El haz de luz se enciende y se apaga varios miles de veces por segundo, en esta frecuencia la variación es invisible a simple vista, el dispositivo que recibe el dato debe estar equipado con un dispositivo que incluya un fotodetector, un demodulador y un sistema de procesamiento de datos digital, los resultados han sido validados el transmisor, receptor y el canal han sido probados.

La implementación del prototipo Li-Fi Net cumple con los parámetros necesarios de lo que realmente en un futuro muy cercano se establecerá como una alternativa de comunicación inalámbrica mediante la luz visible la cual nos permitirá una transmisión de datos y al mismo tiempo iluminar el ambiente, siendo este prototipo definido de alta fidelidad ya que utiliza dispositivos de comunicación que son desarrollados por expertos, dichos dispositivos aún se mantiene en proceso de investigación hasta lograr incrementar la velocidad de transmisión y de esta manera establecer una comunicación inalámbrica por luz visible que permita una conexión y transmisión de datos con cualquier dispositivo a velocidades muy superiores que por el momento solo son posibles en pruebas de laboratorio.

El prototipo permite la comunicación mediante una comunicación de datos inalámbrica a una velocidad full dúplex de 400 Kbps el cual también permite un acceso al

internet, las características de transmisión del prototipo ofrece una mayor seguridad y densidad de datos, reduciendo de gran manera la compleja en la infraestructura de red al utilizar la existente aprovechando el consumo de energía.

La necesidad cada vez mayor de transmisión de datos de forma inalámbrica, por el aumento de dispositivos móviles como la interconexión con objetos cotidianos con internet exige un mayor espectro, siendo este factor un impacto positivo para el prototipo ya que la transmisión de datos opera en el espectro de luz visible sin licencia y segura. El alcance del haz de luz led del prototipo no es muy amplia siendo su distancia máxima de tres metros entre el receptor y transmisor óptico, con estas características de alcance podemos señalar el uso del prototipo para interiores sean estos hogar, oficina, etc. así como áreas sensibles a la interferencia electromagnética como el interior de un avión.

La transmisión inalámbrica del prototipo que utiliza la iluminación led, obliga a mantener encendidas las bombillas sin poder atenuar su luminosidad, sin embargo la investigación en la comunicación por luz visible está encaminada para incluir un circuito de modulación de ancho de pulso “*PWM*” que permita procesar el oscurecimiento de la iluminación hasta que no pueda ser visible para el ojo humano manteniendo operativa la comunicación, el estándar utilizado IEEE 802.15.7 en el prototipo es capaz de ofrecer la velocidad necesaria que permite transmitir audio, video y multimedia con normalidad, a lo dicho se suma que no solo el prototipo es capaz de recibir información sino también enviar, esto se logra al mantener una comunicación bidireccional, enviando y recibiendo mensajes de forma simultánea.

La comunicación de luz en el prototipo, está basada en una transmisión punto a punto sobre un enlace fijo que opera a velocidad moderada, esta transmisión se acerca a una infraestructura que puede ser integrada a la red en forma de tándem con la finalidad de transmitir

datos a corta distancia, en este caso es necesario mantener una línea de visión entre el transmisor y receptor para manejar una comunicación adecuada, siendo lo idóneo que cualquier trayectoria de luz pueda soportar un enlace Li-Fi, incluso a través de reflexiones desde una pared, techo o piso, para esto se requiere un aumento en la potencia y hacer frente a las pérdidas debido a la difusión. El enlace de comunicación óptico es muy sensible manteniendo una relación señal / ruido muy ventajoso, esto significa que una luz led puede bajar su intensidad hasta cuando apenas aparezca a simple vista, esto mientras sigue transmitiendo datos que pueden ser capturados por un receptor compatible, mientras que la modulación de intensidad en la red óptica no sufre desvanecimiento.

Con el fin de aumentar las velocidades de transferencia de datos es necesario el empleo de filtros ópticos de color azul para suprimir el componente inducido por la fosforescencia utilizando múltiples canales RGB “*rojo, verde, azul*”, esto indica que se mejora la transmisión de acuerdo a las prestaciones ópticas y características eléctricas del led, en particular la influencia de la profundidad de modulación de estos dispositivos. El prototipo Li-Fi Net es uno de los primeros pasos fuera de un entorno experimental, por esta razón mantiene una velocidad de transmisión moderada, según pruebas realizadas de esta tecnología en laboratorio han alcanzado velocidades record de 22 Gbps siendo llamada a ser una de las redes del futuro, estas tasas de transmisión serán alcanzadas en obras futuras usando un esquema de modulación más sofisticado como OFDM, a pesar de mantener una velocidad de transmisión muy superior no es probable que esta tecnología pueda reemplazar en su totalidad al Wi-Fi, por lo contrario se estima que existirán redes que utilicen estas dos tecnologías la cuales serán más seguras y rápidas, esto cuando termine los trabajos de compatibilidad con redes Li-Fi.

El prototipo Li-Fi Net mantiene una transmisión bidireccional, si tenemos dos usuarios que necesitan intercambiar sus datos utilizando el sistema basado en Li-Fi se necesita de un duplexador en ambos lados, este duplexador se utiliza para apoyar la comunicación bidireccional separando la transmisión y recepción. Cuando un usuario quiera enviar datos pasará a través del circuito de la fuente de luz led mientras recibe una señal óptica con la ayuda de un fotodetector para que los datos puedan pasar a través de un amplificador de impedancia y duplexador. En el transmisor podemos evitar las complicaciones de la interfaz de múltiples usuario mediante el procesamiento de datos en cada terminal utilizando nodos de procesamiento de datos, esto nos permite una fácil demodulación de señal en el extremo receptor sin ninguna complicación reduciendo la carga sobre el usuario bajando el consumo de energía.

Siendo la cobertura muy importante en el proceso de transmisión se puede manejar otro enfoque donde la bombilla de led pueda girar en un cierto ángulo y de esta manera ajustar el área de cobertura de acuerdo con los requisitos de colocación del receptor. El área de cobertura del transmisor de la figura 90 se controla con la rotación del led de acuerdo al ángulo de incidencia.

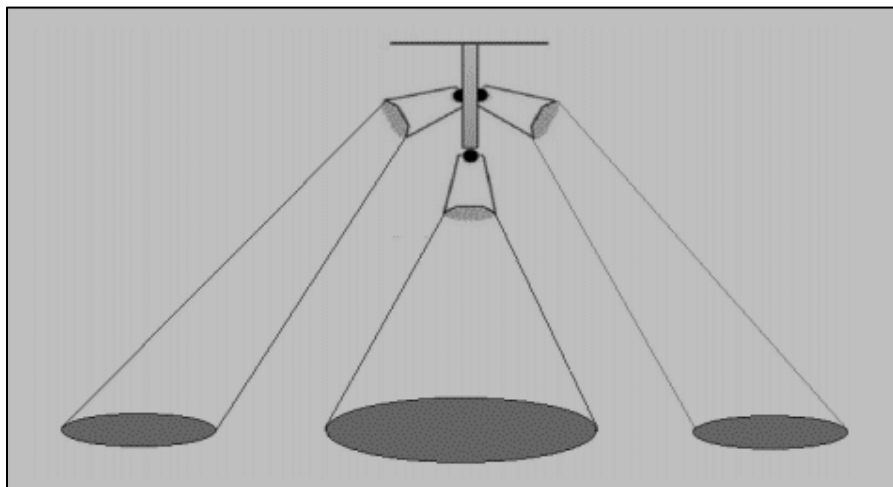


Figura 90. Ángulo de incidencia

6.3. Análisis comparativo tecnología Wi-Fi

6.3.1. Seguridad y confiabilidad.

Las ondas de radio tienden a propagarse por todas direcciones en un rango bastante amplio, esto nos permite tener de cierta manera la señal incluso en pisos distintos al punto de propagación pero con un grado mayor de atenuación, por tal motivo esto permitiría que cualquier persona que se encuentre dentro de este rango estaría en la posibilidad de escuchar la red. Utilizando un software especializado podremos realizar un mapa que nos permitan revelar las redes inalámbricas inseguras que incluso permiten el acceso a internet, al mantener una red insegura estamos expuestos a una interceptación de los datos un crackeo para intentar ingresar a la red local o internet como también enviar señales radiales para interferir con el tráfico.

● Available	PACHECO	8	🔒 Yes (WPA2)
● Available	100 24	1	🔒 Yes (WPA2)
● Available	Juan Carlos	4	🔒 Yes (WPA2)
● Available	RAMIRO	10	🔒 Yes (WPA2)
● Available	dink	6	🔒 Yes (WPA-TKIP)
● Available	SHAGGY	11	🔒 Yes (WPA2)
● Available	San Juan Fix 24	2	🔓 No
● Available	DIRECT VA BRAVIA	3	🔒 Yes (WPA2)
● Available	CRISTIAN	11	🔒 Yes (WPA2)
● Available	VIRUS TROYANO	1	🔒 Yes (WPA2)
● Available	popofedeno	2	🔒 Yes (WPA-AES)

Figura 91. Seguridad inalámbrica Wi-Fi

Para este propósito se utiliza un software denominado WirelessMon como parte de un grupo de software especializado wardriving para analizar y detectar la inseguridad de este tipo de redes inalámbricas.

Como se representa en la figura 72, luego de realizar una exploración con esta herramienta de las redes que se encuentran en nuestro entorno ubicamos en este grupo una red de nombre San Juan Fx 24 que no tiene ningún tipo de seguridad convirtiéndose en una red abierta insegura que se encuentra disponible permitiendo a las personas incluso el acceso al internet, la misma que prácticamente sería un blanco fácil para de cualquier intruso.

Las redes inalámbricas Wi-Fi utilizan débiles procesos de encriptación como el WEP siendo sencillo el crackeo de su protocolo el cual no fue creado por ningún experto en seguridad ni criptografía por este motivo fue necesario crear una nueva arquitectura de seguridad como la WPA y WPA2. Sin embargo se visualiza en la figura 73, redes inalámbricas que mantienen niveles de seguridad WEP.

Status ▲	SSID	Channel	Security	RSSI	Rates Supported
Not Available	clrk	6	Yes (WPA-TKIP)	N/A (Last signal -80)	54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Not Available	HERNAN	11	Yes (WPA2)	N/A (Last signal -87)	270,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Not Available	Fondo	11	Yes (WEP)	N/A (Last signal -89)	54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Connected	PLANTA	1	Yes (WPA-AES)	-53	130,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Available	Talento Humano	2	Yes (WEP)	-81	54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Available	PLANTA	11	Yes (WPA-AES)	-85	130,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Available	Sophia	3	Yes (WPA2)	-79	270,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Available	PACHECO	8	Yes (WPA2)	-80	300,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Available	VIRUS TROYANO	4	Yes (WPA2)	-88	270,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Available	100 24	1	Yes (WPA2)	-87	217,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Available	Juan Carlos	4	Yes (WPA2)	-84	150,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s
Available	CRISTIAN	11	Yes (WPA2)	-83	270,54,48,36,24,18,12,11,9,6,5,2,1 Mb/s

Figura 92. Procesos de encriptación Wi-Fi

Estos argumentos indican que este tipo de red inalámbrica es realmente muy insegura, sin duda la seguridad es una preocupación para los proveedores de tecnología y están realizando un gran trabajo para mejorar las funciones de seguridad, pero a su vez los usuarios

están adquiriendo conocimientos en seguridad inalámbrica es por esta razón que las amenazas a las redes Wireless siempre serán importantes.

El entorno radio eléctrico de nuestra red inalámbrica se encuentra compartida con algunos equipos que pueden ser de nuestros vecinos como microondas, teléfonos inalámbricos, etc. los cuales ocupan esta banda de frecuencia porque no requiere ninguna licencia administrativa para su uso, usando un entorno radio eléctrico no confiable ocasionando un bajo rendimiento de nuestros equipos.

6.3.2. Velocidad y alcance.

Un factor muy determinante en la pérdida de velocidad en dispositivos inalámbricos Wireless es la distancia entre el equipo inalámbrico y el punto de acceso o router con capacidad inalámbrica. Este es el motivo que aproximadamente un 65 por ciento del ancho de banda contratado se pierde en la distancia que recorre la información desde el router Wi-Fi hasta nuestro dispositivo portátil, personal, smartphone o tableta, de esta manera podemos concluir que tan solo un 35 por ciento de la velocidad serían utilizados de forma real.

Los nuevos estándares inalámbricos nos ofrecen velocidades de hasta 867 Mbps, sin embargo teniendo en cuenta que el Wireless es half-duplex nunca podríamos llegar a las velocidades que nos ofrece una red cableada ya que siempre mantendremos pérdida de velocidad por interferencia, rebote de señal, etc. Para las nuevas tecnologías como el estándar 802.11ac se utiliza la banda de 5Ghz, siendo esta de menos alcance que la banda de 2.4Ghz para lo cual es necesario implementar un sistema denominado “*beamforming*” que es un tipo de categoría MIMO la cual consiste en la formación de una onda de señal reforzada mediante el desfase en

distintas antenas, siendo capaz de superar obstáculos logrando llegar al cliente por el mejor camino.

	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Creado en	2000	2000	2003	2009
Frecuencia (banda)	5GHZ	2.4GHZ	2.4GHZ	2.4 y 5 GHZ
Velocidad Máxima de Transferencia	54Mbps	11Mbps	54Mbps	~540Mbps
Alcance (metros)	~120	~140	~140	~250

Figura 93. Velocidad y alcance Wi-Fi

Como se representa en la figura 74, efectivamente con el transcurso del avance de la tecnología Wireless su alcance también aumentado considerablemente en la versión (n) podemos manejar una distancia de aproximadamente unos 250 metros, pero esto no quiere decir que esto supere el problema de encontrarnos con obstáculos, entre el router y el dispositivo conectado, así como rebotes de señal que inciden de forma negativa. En las redes inalámbricas que utilizan las ondas electromagnéticas en Wi-Fi como medio de transmisión son capaces de atravesar obstáculos principalmente paredes y techos siendo este el motivo para que su señal quede atenuada por lo cual su velocidad se ve afectada.

6.3.3. Interferencia y ruido.

Cada vez son más frecuentes los dispositivos inalámbrico que se fabrican y a su vez saturan el espectro radio eléctrico ocasionando interferencia la cual tiene como efecto la disminución del alcance inalámbrico entre los dispositivos, caída en la transferencia de datos así como puede ocasionar una pérdida completa o intermitente de la conexión inalámbrica. Existen

numerosas fuentes de interferencia para nuestros equipos inalámbricos que utiliza radiofrecuencia de los cuales señalo los más importantes:

- Transmisores de radio
- Monitores de bebe
- Cámara de redes
- Monitores externos
- Hornos microondas
- Altavoces inalámbricos
- Emisores de video en frecuencia 2,4 ó 5 Ghz
- Teléfonos inalámbricos a 2,4 ó 5 Ghz

La diferencia entre las frecuencias 2.4 Ghz y 5 Ghz es su rango ya que la frecuencia 2.4 Ghz es capaz de llegar más lejos, al usar la banda 5 Ghz para la comunicación inalámbrica puede mejorar la planificación de frecuencia pero no se encuentra libre de seguir manteniendo interferencia con otros dispositivos que utilicen esta banda.

El cambio de canal es una técnica muy utilizada que incluso recomiendan los vendedores para lograr eliminar la interferencia, esta solución es momentánea ya que la interferencia tiende a ser muy variable e intermitente siendo limitada las opciones de canales que no se encuentren con interferencia, el cambio de canal produce un efecto domino a medida que los AP vecinos cambian de canal para evitar interferencias provocando la interrupción de aplicaciones de voz y video.

La relación señal-ruido conocida como SNR se encarga de comparar la diferencia entre la fuerza del ruido de fondo y el nivel de señal recibida, si mantenemos una relación señal-

ruido alto, mantendremos un mayor rendimiento de nuestro dispositivo, esto ocurre siempre que la interferencia sea mínima. La calidad de la red inalámbrica Wi-Fi podemos diagnosticar utilizando un software llamado Acrylic Wi-Fi Profesional, siendo posible seleccionar un punto de acceso y diagnosticar varios aspectos que afectan a la calidad de la red inalámbrica Wi-Fi.

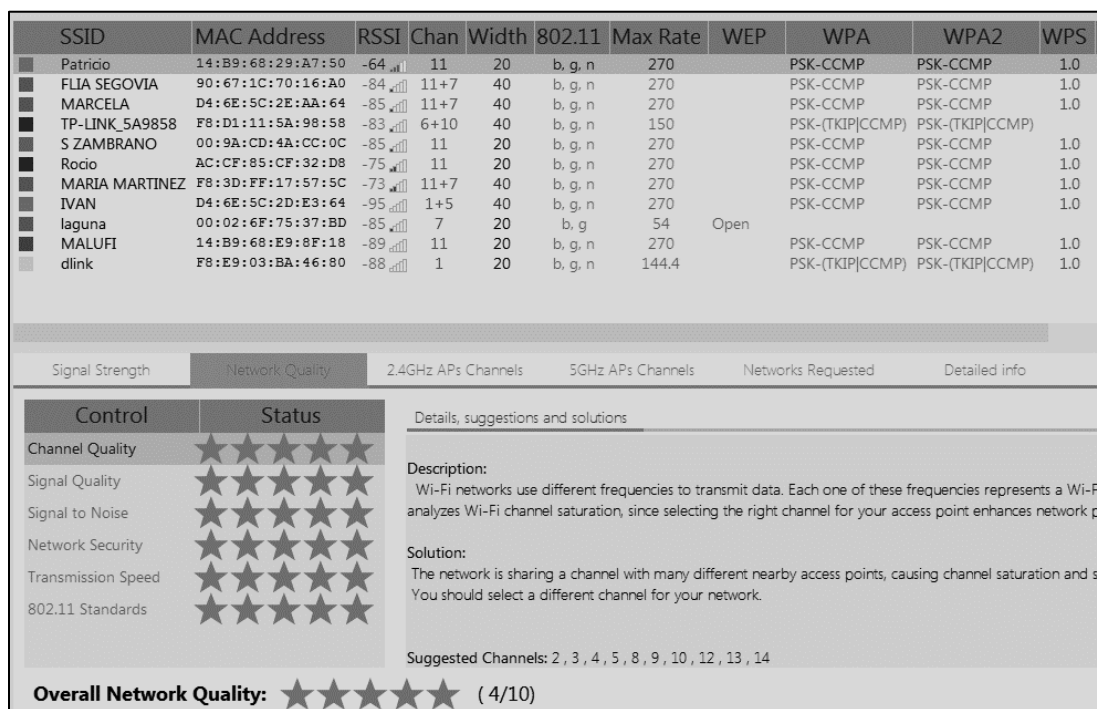


Figura 94. Diagnostico Acrylic Wi-Fi

Como se representa en la figura 75, se encuentran muchas redes coexistentes en el marco de un mismo canal, siendo este un dato demostrativo que las interferencias existe en las redes inalámbricas Wi-Fi los cuales pueden provocar un rendimiento de red lenta, desconexiones o perdida de paquetes en las redes que utilicen un mismo canal. La calidad SRN es un valor de 0 a 100 que considera además del nivel de ruido en la señal provocado por fuentes de interferencia, una red puede ser recibida con un nivel de señal muy bueno pero deficiente en su calidad. Una tasa de reenvío de paquetes elevado puede ser ocasionada por una mala ubicación del AP cuando este se encuentra ubicado en una zona de interferencias o apantallamiento de la señal.

1.1.1 Potencia de Transmisión y Recepción

La reducción de la potencia en equipos Wi-Fi es un método utilizado para hacer un mejor uso del limitado número de canales lo cual mejora el rendimiento, pero si bajamos la potencia estaríamos disminuyendo la intensidad de la señal recibida por el cliente, esto provoca una velocidad de datos inferior creando agujeros de cobertura obligando al incremento de equipos AP aumentando en el sitio la interferencia. Los sistemas operativos tienen la opción de aumentar la potencia del receptor instalado en el equipo, situado en un nivel bajo para reducir el consumo de batería de ordenadores portátiles.

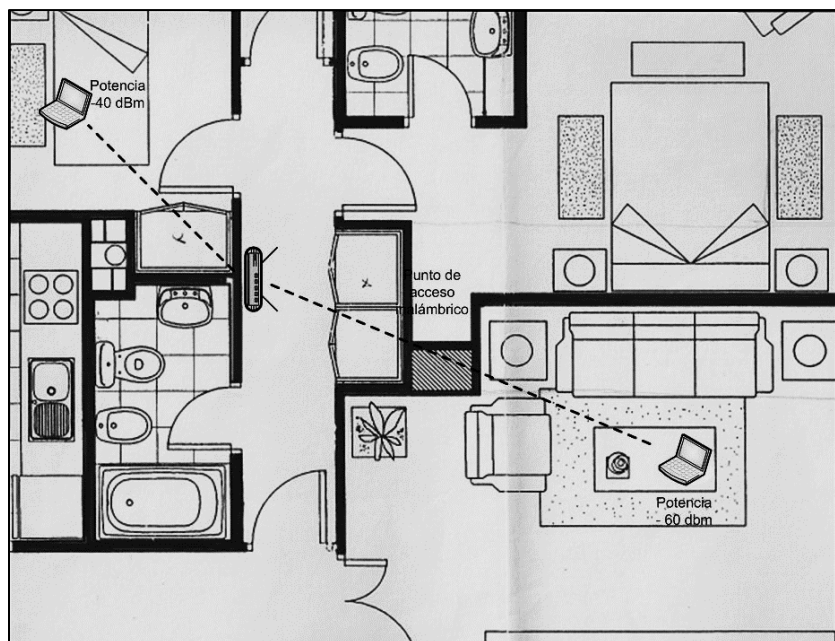


Figura 95. Potencia de transmisión Wi-Fi

Cada pared y obstáculo que se interponga entre el router y el equipo receptor de la figura 76, atenuara la potencia en la señal, así también mientras más lejos se encuentre el equipo receptor del router su potencia se verá afectada, al contrario cuanto más cerca este el dispositivo del router mejor señal tendrá aumentando su velocidad de conexión. El dBm es la unidad de

medida de potencia expresada en decibelios, si está ubicado a unos 3 metros del router Wi-Fi, la calidad de la señal recibida posiblemente sea de -25 dBm, lo cual significa una pérdida muy pequeña, si estas ubicado a 50 metros de tu router Wi-Fi posiblemente la calidad recibida sea de -80 dBm. Un valor optimo seria cualquiera entre -75 dBm y 0 dBm.

6.3.4. Impacto ecológico y salud.

En la actualidad se tiene ondas que provocan radiaciones de diversa intensidad emitas por dispositivos electrónicos, hasta el momento no se encuentra descartado en su totalidad los efectos nocivos que producen estas radiaciones en nuestro cuerpo, existiendo numerosos estudios que señalan consecuencias negativas en la salud, incluso algunas radiaciones electromagnéticas pueden ocasionar efectos cancerígenos. Para evitar las radiaciones es necesario estar lo más alejados de las fuentes de emisión y por lo menos mantener el hogar saludable evitando colocar aparatos eléctricos o electrónicos cerca de la cama, evitar el uso de teléfonos inalámbricos domésticos, sustituir la red inalámbrica por cable, si no se puede prescindir de la conexión inalámbrica Wi-Fi al menos podríamos apagar el router por las noches.

Los efectos del Wi-Fi pueden dar lugar a dificultades de atención, hiperactividad, problemas de aprendizaje, ansiedad, depresión, entre otros efectos, sin embargo varias consideraciones importantes deben de tenerse en cuenta cuando se realiza la evaluación de posibles efectos en la salud por campos de RF. Una de ellas es la frecuencia de operación. Actualmente los sistemas de telefonía móvil operan en frecuencias entre los 800 y 1 800 MHz.

Es importante no confundir a los campos de RF con la radiación ionizante como los rayos X o los rayos gama, que son capaces de romper moléculas, si un haz de radiación ionizante rompe la cadena de ADN produce cáncer. A diferencia de la radiación ionizante, los

campos de RF no pueden producir ionización o radioactividad en el cuerpo; por esta razón, los campos de RF son llamados no ionizantes.

Los campos de RF penetran los tejidos expuestos a profundidades que dependen de la frecuencia- hasta un centímetro en el caso de las frecuencias utilizadas por los teléfonos móviles. La energía RF es absorbida en el cuerpo y produce calentamiento, pero el proceso termo regulatorio normal, disipa este calor. Todos los efectos establecidos debido a la exposición a la RF están relacionados con el calentamiento. Mientras la energía de RF puede interactuar con tejidos del cuerpo a niveles muy bajos para producir un calentamiento insignificante, no hay estudios que hayan demostrado efectos adversos en la exposición a niveles que se encuentran por debajo de los límites internacionales.

Algunos años atrás experimentamos un incremento de antenas que han ido ocupando áreas geográficas urbanas, en muchos casos la atracción turística y el paisaje de distintas ciudades pueden verse mermado por dichas infraestructuras ocasionando un impacto visual, por lo cual es importante buscar nuevas alternativas para la comunicación inalámbrica.

6.3.5. Madurez en el mercado.

Con el pasar del tiempo la tecnología Wi-Fi fue mejorando a partir del año 2000 donde fue creada la primera norma la cual alcanzaba una velocidad teórica de 11 Mbps utilizando la banda 2.4 Ghz, en la actualidad se introduce en el mercado equipos router que cumplen con el estándar 802.11.ac que tienen una transmisión de datos hasta unos increíbles 1.3 Gbps, siendo hasta tres veces más rápido que los routers 802.11n convencionales.

Las redes inalámbricas han facilitado la comunicación siendo de gran importancia en el ámbito personal como laboral, en la actualidad cuenta con más de 240 millones de redes

Wi-Fi distribuidas en su mayoría en América del Norte y Europa, siendo los Estados Unidos el que domina los datos con más de 60 millones de redes Wi-Fi muy por debajo de los 10 millones de redes ubicadas en Alemania esto representa que en un futuro estas reemplacen en gran mayoría a las redes cableadas.

6.4. Análisis comparativo tecnología Li-Fi

6.4.1. Seguridad y confiabilidad.

La seguridad de la transmisión de datos es muy superior ya que las ondas de transmisión no existen, siendo su protocolo invulnerable a cualquier intento de ingreso a la red inalámbrica Li-Fi sin que pueda ser factible que algún hacker pueda encontrar alguna debilidad en este tipo de red inalámbrica.

Este tipo de transmisión que no utiliza ondas garantiza que la información no salga de una habitación ya que no puede atravesar paredes convirtiéndose en una ventaja analizado desde la perspectiva de su seguridad, sin embargo, también se considera una desventaja el hecho que la señal no pueda atravesar paredes implica que el emisor y receptor se encuentren en una misma habitación.

Lo interesante es la utilización compartida de esta tecnología con la Wi-Fi ya que esta tiene un gran potencial para uso en exteriores, ayudando de esta manera a poder establecer una conexión compartida con la posibilidad que el usuario cuente con una conexión segura la cual Li-Fi es capaz de cumplir garantizando seguridad en internet.

La seguridad es muy recomendada en estos momentos ya que gran parte de nuestras vidas están en las redes, siendo esta utilizada para operaciones bancarias, conectarnos a

nuestras cuentas transmitiendo con esto información vulnerable, siendo una alternativa indispensable para lograr mantener una comunicación inalámbrica muy confiable.

6.4.2. Velocidad y alcance.

La velocidad en esta tecnología se encuentra directamente relacionada con el color de la luz led, cuando más lejano este del blanco cálido, su transmisión será mucho más rápida ya que permite tener un mayor espectro de frecuencia, las velocidades pueden variar de acuerdo al dispositivo adquirido, por el momento teniendo en consideración que es una tecnología en desarrollo manteniendo por el momento velocidades de transmisión bidireccional que van desde 400 Kbps hasta los 10 Mbps permitiéndonos con esto mantener una buena transmisión de datos.

Al mantener una transmisión inalámbrica directa desde la luz LED con nuestro equipo receptor nos proporciona una velocidad “*pura*”, permitiéndonos de esta manera subir y bajar información simultáneamente logrando una comunicación de dos bandas utilizando todo el ancho de banda ofrecido en nuestro dispositivo aumentando su velocidad.

Por el momento tenemos una limitación es el alcance ya que todos los dispositivos que se encuentran en el mercado mantienen una distancia máxima de transmisión de 3 metros, por tal motivo estos dispositivos pueden ser utilizados dentro de las casas, oficinas, edificios, etc., siempre manteniendo la distancia recomendada ya que en pruebas realizadas estos no supera los 4 metros, para distancias de alcance mayores se tiene que esperar al avance de la tecnología estando por el momento como propuesta la utilización de los faros de luz de uso público como futuros transmisores de datos inalámbricos.

1.1.2 Interferencia y ruido.

La interferencia se produce cuando dos o más ondas se superponen formando una onda resultante de mayor, menor o igual amplitud, La luz visible está formada por ondas electromagnéticas que pueden interferir entre sí. La interferencia de ondas de luz causa, por ejemplo, las irisaciones que se ven a veces en las burbujas de jabón. La luz blanca está compuesta por ondas de luz de distintas longitudes de onda. Las ondas de luz reflejadas en la superficie interior de la burbuja interfieren con las ondas de esa misma longitud reflejadas en la superficie exterior. En algunas de las longitudes de onda, la interferencia es constructiva, y en otra destructiva. Como las distintas longitudes de onda de la luz corresponden a diferentes colores, la luz reflejada por la burbuja de jabón aparece coloreada. El fenómeno de la interferencia entre ondas de luz visible se utiliza en holografía e interferometría.

La interferencia puede producirse con toda clase de ondas, no sólo ondas de luz. Las ondas de radio interfieren entre sí cuando rebotan en los edificios de las ciudades, con lo que la señal se distorsiona. Cuando se construye una sala de conciertos hay que tener en cuenta la interferencia entre ondas de sonido, para que una interferencia destructiva no haga que en algunas zonas de la sala no puedan oírse los sonidos emitidos desde el escenario. Arrojando objetos al agua estancada se puede observar la interferencia de ondas de agua, que es constructiva en algunos puntos y destructiva en otros.

La mayor ganancia es no generar interferencia con otras frecuencias, esto es posible al carecer de radiación electromagnética sin producir saturación cuando se genere una conexión múltiple y simultánea.

6.4.3. Potencia de transmisión y recepción.

En las primeras versiones se utilizaron lámparas fluorescentes con las cuales se logró alcanzar velocidades de unos pocos Kbps, siendo los leds el dispositivo que multiplico su velocidad final ya que este tiene la propiedad de apagarse y encenderse mucho más rápido, con la tecnología Li-Fi la señal llegaría solamente hasta donde llegue la luz de la bombilla LED, la potencia del trasmisor puede ser localizado, de manera que se utilice más eficientemente y no interfiera con las fuentes de Li-Fi adyacentes.

En el futuro se asegura la creación una mejor instalación LED que permitirá la transmisión de datos a una velocidad de 5 Gb/s (gigabytes por segundo) manejando sólo 5 milivatios de potencia de salida óptica y fotodiodos de alta amplitud en el receptor. Con una sencilla lente que prolongue la distancia, será posible transmitir los datos a una distancia de diez metros a una velocidad de 1.1 Gb/s, que pronto podrá aumentar hasta 15 Gb/s, explica Haas.

6.4.4. Impacto ecológico y salud.

Se garantiza que la utilización de este dispositivo sea 100% inocuo para la salud, siendo muy viable para ser utilizado en cualquier ambiente. Uno de los aspectos de esta nueva forma de comunicación inalámbrica es poder economizar el uso de la energía y aprovechar la infraestructura que mantenemos en nuestras casas, edificios y oficinas. De forma fácil se instalaría un pequeño modulador a cada dispositivo de iluminación permitiendo combinar dos funciones: la iluminación y transmisión de datos.

Este nuevo concepto de comunicación inalámbrica nos brinda la posibilidad de optimizar la potencia, ya que en cada bit transmitido se logra ahorrar un porcentaje de potencia convirtiéndole en un sistema de comunicación “verde”.

6.4.5. Madurez de mercado.

La tecnología de transmisión de datos por luz visible que la denominamos Li-Fi en los actuales momentos muy pocas personas lo conocen ya que tiene menos de dos años de vida siendo posible por el momento contar con equipos prototipos con un alto costo desarrollado en pequeña escala que nos pueden revelar su funcionamiento.

Sin duda su futuro es muy prometedor ya que en pruebas de laboratorio se han logrado velocidades de hasta 10 GB por segundo superando hasta el momento al estándar 802.11ac que pertenece a la quinta generación. Se cree que para el año 2020 la tecnología Li-Fi ya este circulando por el mundo y genere ingresos de 6.000 millones de dólares alcanzando velocidades de 22 GB por segundo y los equipos se lo puedan conseguir con facilidad y a un costo muy competitivo en relación con su rival el Wi-Fi, a la vez solucionando la comunicación en un nicho de mercado donde Wi-Fi no funciona por la interferencia que ocasiona como hospitales y aviones entre otros.

Un aspecto que estará por resolver es la falta de compatibilidad de los emisores y receptores en caso de los celulares, sin embargo algunas empresas creen que es posible solucionar este problema con la instalación de un software adaptado a la cámara de cualquier Smartphone para que pueda ser capaz de descifrar la señal de luz. Por el momento las compañías fabricantes de teléfonos como Samsung, LG, entre otros ya se encuentran interesados en crear dispositivos con sensores de luz que permitan la conexión inalámbrica a Li-Fi.

6.5. Resultado del análisis comparativo.

Un análisis comparativo es un estudio profesional que tiene como objetivo el poder publicar sus resultados y de esta forma mantener un criterio sustentable siendo dichos resultados de utilidad en aplicaciones futuras.

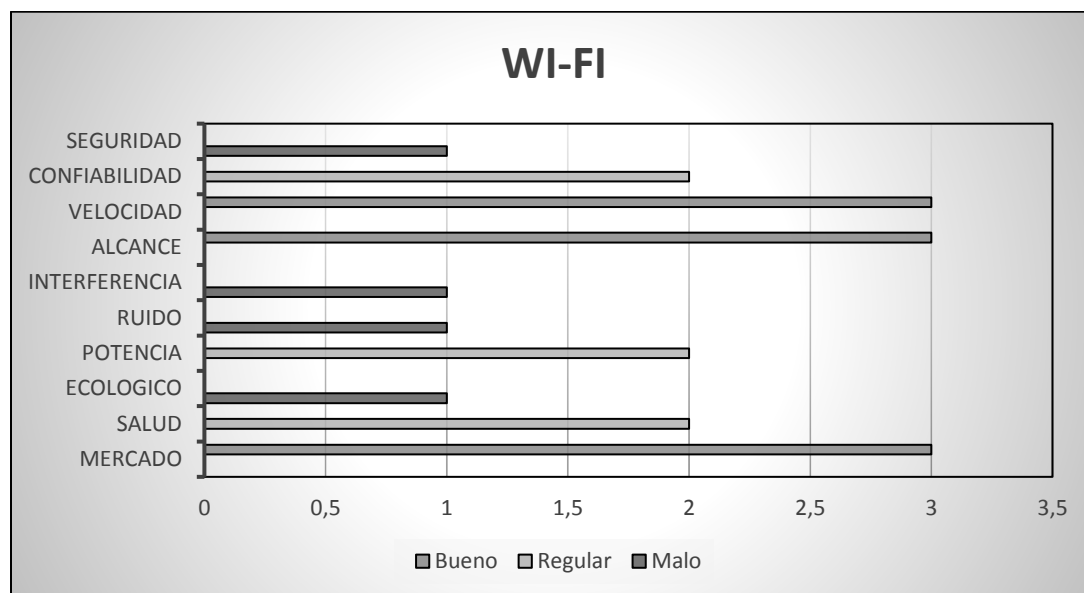


Figura 96. Análisis tecnología Wi-Fi

Se destaca en este tipo de tecnología de comunicación inalámbrica que utiliza la radiofrecuencia para la transmisión de la información de acuerdo a los resultados reflejados en la figura 77 se observa problemas en la seguridad permitiendo el ingreso forzado a la red de cualquier persona no autorizada con facilidad, a pesar de manejar sus dispositivos grandes velocidades mantiene problemas de interferencia y ruido que degrada y distorsiona la calidad de la señal, esto ocasiona una disminución en su velocidad, el consumo de electricidad es alto por este motivo el dispositivo mantiene calentamiento y una vida útil corta de su batería. Esta tecnología se convierte en estos momentos en un servicio público por su alta demanda, en caso de las compañías, la falta de Wi-Fi les pondría en una desventaja competitiva, la impresionante

venta de dispositivos que prácticamente cualquier persona puede instalarlo desde el hogar, zonas públicas, lugar de trabajo, etc. está teniendo un efecto directo en la eficiencia en las conexiones inalámbricas llegando muy pronto a su límite de capacidad.

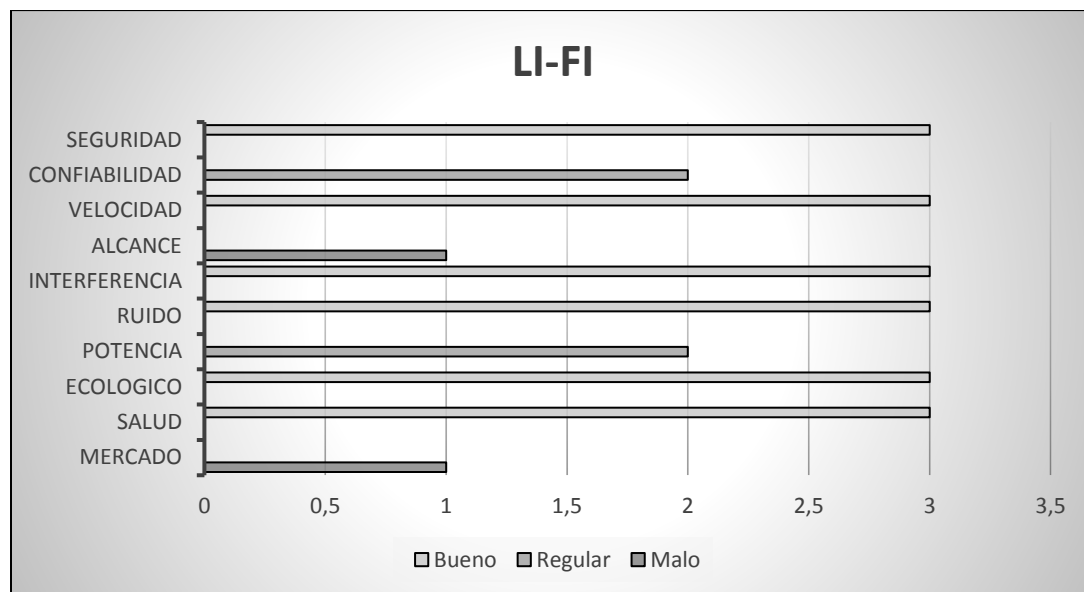


Figura 97. Análisis tecnología Li-Fi

De acuerdo a los resultados que despliega este estudio en la figura 78, se tiene que resaltar de manera positivo que esta tecnología de comunicación inalámbrica nos brinda en el campo de la seguridad de transmisión de datos convirtiéndose en una alternativa viable, así como, el interés que se mantiene en proteger el medio ambiente y disminuir el consumo de energía permite un aumento significativo de usuarios que adquieren dispositivos de tecnología LED siendo una forma eficiente de utilizar luz por su bajo consumo de potencia, así también la reducción de emisión de calor y larga vida en comparación con las bombillas incandescentes.

Esto brinda una enorme visión futurista que muy pronto toda la iluminación de nuestro entorno será emitida por una fuente de luz LED que al mismo tiempo brinda la posibilidad de transmitir información. Es real también que apenas en el 2015 empezó a salir esta

tecnología del laboratorio luego de algunos ensayos y hasta el momento solo disponemos de prototipos siendo muy difícil el poder contar con uno de ellos. Su alta velocidad que brinda es importante y llama la atención de importantes grupos electrónicos como Philips para la producción de bombillas LED compatibles con esta tecnología, como la empresa multinacional de diseño y producción de equipos Apple.



Figura 98. Resultados Comparativos

De acuerdo a estas métricas comparativas se puede concluir que Li-Fi logra superar en un 50 por ciento algunas desventajas del actual sistema Wi-Fi, en especial la ventaja que tiene al no emitir ninguna interferencia electromagnética así como evitarse problemas relacionados con la saturación del espectro electromagnético y el poder abaratar los costes al eliminar el cableado extra y no permitir la saturación de puntos de acceso en determinadas áreas, el cual resulta más seguro al no atravesar paredes, sin embargo Li-Fi al ser una tecnología muy reciente surgen problemas de compatibilidad ya que ningún dispositivo actual cuenta con un receptor Li-Fi integrado. Sin embargo el alcance del prototipo en la tecnología Li-Fi resulta muy limitada.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

La comunicación dúplex del prototipo Li-Fi puede ser problemática, siendo necesaria una comunicación híbrida de luz visible para resolver la limitación de VLC y satisfacer el requisito de Internet que integra VLC para enlace descendente y Wi-Fi para enlace ascendente.

El prototipo Li-Fi podría solucionar el cuello de botella que existe logrando un enlace Wi-Fi ascendente fiable donde la congestión es menos probable y proporcionar un enlace Li-Fi descendente de alta capacidad.

El fotodetector del prototipo tiene que ser capaz de ver la luz con la finalidad de capturar los datos, la línea de un solo hotspot Wi-Fi puede extenderse en muchas áreas adyacentes, el prototipo Li-Fi se limita a las habitaciones individuales, no es capaz de funcionar al aire libre con luz natural fuerte o en áreas con muchas fuentes de luz de interferencia.

La transmisión de datos por luz visible que utiliza el prototipo utiliza frecuencias muy altas, en general superiores a 1Mhz las cuales están por encima de las tasas donde el ojo humano pueda distinguir cualquier parpadeo.

El prototipo Li-Fi a pesar de mantener una topología peer to peer es una alternativa seria a las comunicaciones basadas en radio frecuencia, siendo el mayor reto la creación de una red de transmisión MIMO usando múltiples diodos emisores de luz y fotodetectores para obtener beneficios combinados que proporcione una comunicación más eficiente cubriendo las necesidades futuras.

7.2. Recomendaciones

Los dispositivos que utilizan la luz led como medio de transmisión apenas están apareciendo sin probar aun la gran variedad de aplicaciones, pasará algún tiempo para que esta tecnología pueda estar disponible como un enlace genérico de comunicación en los dispositivos de consumo.

La contaminación ambiental está llegando a tales extremos en el mundo, que el ser humano está empeñado en destruir el ambiente donde vivimos, esta tecnología no emite calor y no contribuye al calentamiento global, se basa en la utilización del espectro de luz visible, esto hace que el impacto negativo resulte menos perjudicial.

Si tenemos en cuenta en el prototipo múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), el procesamiento de señal desempeña un papel importante para asegurar las velocidades de datos con presencia de (SNR), la técnica (MIMO) es útil para que la transmisión de datos paralelo aumente, pero su canal debe ser altamente correlacionado lo que aumenta la complejidad.

Podemos ajustar el ángulo de la transmisión del led para lograr transmitir un haz de luz con mayor incidencia teniendo como resultado una comunicación eficiente sin superponer el área de cobertura.

Para eliminar la gran mayoría de las interferencias que sean producidas por fuentes naturales y artificiales es necesario utilizar filtros ópticos que aseguren que la interferencia restante sea despreciable.

La luz led del prototipo debe estar siempre encendida para su funcionamiento, es recomendable para entornos industriales, comerciales dado que la energía utilizada en VLC viene libre mientras las luces permanecen encendidas cuando el área está ocupada.

Bibliografía

- Americalifi. (28 de 10 de 2014). *www.americalifi.com*. Recuperado el 05 de 02 de 2015, de <http://www.americalifi.com/wp/>
- Arnon, S. (2012). *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge University Press.
- Arnon, S., Barry, R., Schober, R., & Karagiannidis, K. (2012). Advanced Optical Wireless Communication. En *Visible Light Communication* (págs. 351-368).
- Carballeiro, G. (2012). *Redes WiFi en entorno de Windows*. Fox Andina.
- España Boquera, M. (2005). *Comunicaciones Ópticas*. Ediciones Díaz de Santos.
- Fath, T., & Hass, H. (2013). Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments. En *IEEE Transactions on communications* (págs. 733-742).
- Gago Calderon, A., & Fraile Vilarrasa, J. (2012). *Iluminación con Tecnología Led*. Paraninfo.
- Gomez, J. (2009). *Redes Locales*. Editex.
- Grobe, L., Paraskevopoulos, A., & Hilt, J. (2013). High speed visible light communication systems . *Communications Magazine, IEEE 51*, 60-66.
- Hermosa Donate, A. (2012). *Electrónica Aplicada*. Marcombo.
- Kavehrad, M. (2013). Optical wireless applications. En *Solution to ease the wireless airwaves spectrum crunch* (págs. 86450G-86450G).
- Komine, T., & Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible light communication system using LED lights. En *IEEE Transactions on Consumer Electronics* (págs. 100-107).
- Lee, k., & Park, H. (2011). Modulations for visible light communication with dimming control. En L. K., & P. H, *IEEE Photon. Technol. Lett* (págs. 1136-1138).

- Oledcomm. (15 de 03 de 2015). *www.oledcomm*. Recuperado el 25 de 07 de 2015, de <http://www.oledcomm.com/>
- Panta, K., & Armstrong, J. (2012). Indoor localisation using white LEDs. En *Electron. lett* (págs. 228-230).
- Pellejero , I., Andreu, F., & Lesta, A. (2006). *Fundamento y aplicaciones de seguridad en redes WLAN*. Marcombo.
- Prat Viñas, L., & Calderon Cardona, J. (2013). *Dispositivos electrónicos y fotónicos. Fundamentos*. Marcombo.
- Proakis, J. (1995). *Digital Communications, 3rd ed* . McGraw-Hill.
- PureLifi Ltda. (27 de 10 de 2014). *www.purelifi.com*. Recuperado el 21 de 11 de 2014, de http://purelifi.com/what_is_li-fi/
- Salvetti, D. (2011). *Redes wireless*. Users.
- Siddique, A., & Thair, M. (2011). Joint brightness control and data transmission for visible light communication systems based on white LEDs. *Communications and Networking Convergence*. Las Vegas.
- Sisoft. (06 de 11 de 2014). *www.si-soft.com.mx*. (Led communication) Recuperado el 25 de 02 de 2015, de <http://www.si-soft.com.mx/>
- Stallings, W. (2004). *Fundamentos de Seguridad en Redes*. Prentice Hall.
- Tanenbaum, A. (2003). *Redes de Computadoras*. Prentice Hall.
- Villegas , R., & Araguez, A. (2010). *Internet y Redes Inalámbricas*. Clanar Internacional.
- Wang, Z., & Zhong, C. (2012). Performance of dimming control scheme in visible light communication system. En *Opt. Express* (págs. 1861-1868).
- Wayne, T. (2003). *Sistemas de Comunicacion Electrónicas*. Prentice Hall.

Anexo a. Características técnicas prototipo Li-Fi lámpara led

- Tipo de LED: de alta potencia
- Consumo de LED: 0,9 vatios
- El consumo de energía eléctrica LED + conductor: 3,5 vatios
- Temperatura de color: Blanco cálido
- Tensión: 220 ~ 250V
- Corriente: 0.036A
- Dimensión: 350 mm
- Clips: 60 x 100 mm
- Ángulo de 30 °
- La distancia máxima para la comunicación de datos a 0 °: 370 ± 20 cm
- Clips para un posicionamiento preciso
- No emite calor

Anexo b. Características técnicas android tablet Li-Fi ready

- Chipset de cuatro núcleos MTK8389
- Tamaño de la pantalla 7.85 pulgadas 1024 × 768 IPS
- Procesador Cortex A9, 1,2 GHz Memory1GB + 8GB
- Cámara frontal 0.3MP / 2MP vuelta
- Video1080P
- Batería 4500mAh / 3.7V
- Wi-Fi / GPS / Construir-en 3G / Bluetooth / G-Sensor
- OS 4.2.2 Android
- Color: Negro o Blanco
- Video / Audio Ayuda 3GP / MP3, etc.
- Foto Apoyo JPEG, PNG, BMP, GIF
- 1 * auricular de 3.5mm
- 1 * Cable USB
- 1 * Cargador USB
- 1 * Adaptador de carga con enchufe europeo

Anexo c. SDK Li-Fi beacon biblioteca

El kit de desarrollo de software o SDK es generalmente un conjunto de herramientas de desarrollo de software que permite al programador el uso de ciertos lenguajes de programación como también puede incluir algún hardware sofisticado para poderse comunicar con un determinado sistema (Oledcomm, 2015). Los SDK frecuentemente incluyen también, códigos de ejemplo y notas técnicas de soporte u otra documentación de soporte para ayudar a clarificar ciertos puntos del material de referencia primario. Similar en funcionamiento a un GPS, el beacon cuenta con una señal única por cada dispositivo, que es capaz de detectar y localizar otros dispositivos, como, por ejemplo, un Smartphone que cuente con una aplicación rastreadora de señales de beacon. Aunque hay que decir que, comparándolo con un GPS, un beacon ocupa menos energía y funciona mucho mejor en lugares cerrados, porque si contamos con un rastreador de beacons en nuestro teléfono, cada vez que entremos a una tienda que cuente con estos dispositivos, podríamos recibir las más diversas señales: cupones de descuentos, catálogos, ofertas e información adicional que pudiera sernos de utilidad al momento de hacer compras en el lugar. Sin duda, algo nunca antes visto. Probablemente, estemos al tanto de la existencia del i beacon, es similar al beacon (en teoría, lo mismo), aunque este fue diseñado y fabricado por Apple y exclusivamente para Apple. Esto demuestra que los grandes de la industria ya ven en esta tecnología un gran potencial. Todo indica que el comercio del futuro funcionará recogiendo todos los beneficios que un beacon puede brindar a cualquier comprador. Si hasta PayPal, el sistema de micro pagos digitales, anunció que lanzará proyectos basados en estos dispositivos para poder efectuar pagos desde el móvil sin tener hacer filas ni pasar por caja. Una verdadera revolución a la hora de comprar.

Anexo d. Li-Fi dongle extra para usar con el Smartphone.

El nombre de dongle tiene un origen no muy claro, si bien parece que se originó en dispositivos de seguridad, las llamadas mochilas o llaves de seguridad en español, y luego se extendió a todos los dispositivos USB personales (Oledcomm, 2015). Las llaves de seguridad llevan cifrados los datos de activación sin los cuáles un determinado software no funciona o funciona con limitaciones. Un dongle es un dispositivo de seguridad que se utiliza como una especie de llave, ver figura 49 para permitir a un usuario la utilización de un determinado software en forma legal. Esto causa que una persona que haya pirateado el software y no posea el dongle no pueda utilizar el software, un dongle se puede conectar en cualquier computadora y funciona, siempre y cuando la computadora tenga instalado el software para el cual fue programado el dispositivo.



Figura 99. Li-Fi dongle

Físicamente el dongle tiene 3 presentaciones:

- Un rectángulo de 2"x1.5" (aproximadamente) y se conecta al puerto paralelo de la computadora.
- Similar a una memoria USB, se conecta en cualquier puerto USB.
- El dongle Li-Fi que se conecta en la toma del auricular.

Anexo e. Modo de funcionamiento prototipo Li-Fi lámpara led

El dispositivo incluye tres lámparas led para realizar las pruebas mediante la transmisión inalámbrica las cuales deberán ser conectadas directamente a una toma de corriente, dichas lámparas disponen cada una de un interruptor que nos brindara la facilidad de apagar o encender el led cuando lo creamos conveniente, cabe señalar si procedemos apagar el led automáticamente nuestro dispositivo dejara de transmitir información a nuestro Smartphone/Tablet. Conectamos la llave de acceso al programa en nuestro Smartphone/Tablet y poder ejecutar el LR-CODE READER.

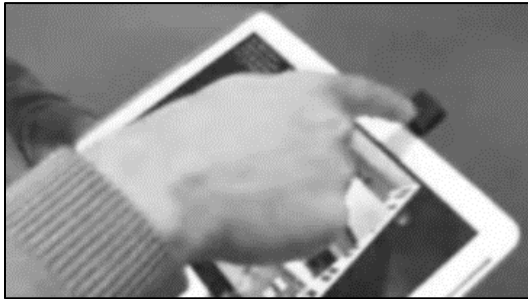


Figura 100. . Reader Lr-Code

Para la instalación de contenido en la pantalla, ubicamos el icono de la parte superior derecha. Pulsamos el menú de configuración para personalizar el contenido en cada una de las tres lámparas disponibles este contenido puede ser:

- Imágenes
- Música
- Videos
- PDF

Anexo f. Características técnicas prototipo Li-Fi NET

Tabla 6:

Características técnicas prototipo Li-Fi Net

Caraterísticas	Especificación Técnica
Producto	Transceiver Li-Fi Net
Puerto – Protocolo	Ethernet - VLC / LI- FI - USB
Procesador	Procesador 140 Mhz, 40 MHz
Banda Li:Fi	400 Kbps – FULL DUPLEX
Normas de cumplimiento	IEEE – 802.15.7
Aprobación de la seguridad	CE

Nota. Fuente: Oledcomm, 2015.

Tabla 7:

Especificación Entada / Salida Transceiver Li-Fi Net

Especificaciones de salida		Especificaciones de entrada	
Tension DC	12-95 VCD	Tensión DC	12-95 VCD
Intensidad de corriente	2 ^a max	frecuencia	DC
Potencia	100W	Potencia	(Typ.) ≥ 0.9
Tiempo de respuesta	< 1s	Energía mínima	20 W LED

Nota. Fuente: Oledcomm, 2015.

Anexo g. Características mecánicas prototipo Li-Fi NET

Tabla 8

Especificación mecánica Transceiver Li-Fi Net

Características Mecánica					
Emisor		Receptor		Rx Tx Portable	
Longitud	90 mm	Longitud	95 mm	Longitud	89 mm
Ancho	81 mm	Ancho	85 mm	Ancho	36 mm
Altura	32 mm	Altura	61.5 mm	Altura	27.8 mm
Peso	126 g	Peso	145 g	Peso	61.5 g

Nota. Fuente: Oledcomm, 2015.

Protección:

Cortocircuito pico de corriente

Termal

Sobretensión

Conexión de inversor de entrada

Términos de uso

Temperatura de funcionamiento -20 °C / 85°C

Humedad 10 hasta 80%

Temperatura de almacenamiento -20°C / 60°C

Anexo h. Diagrama prototipo Li-Fi NET

Transceptor de Techo

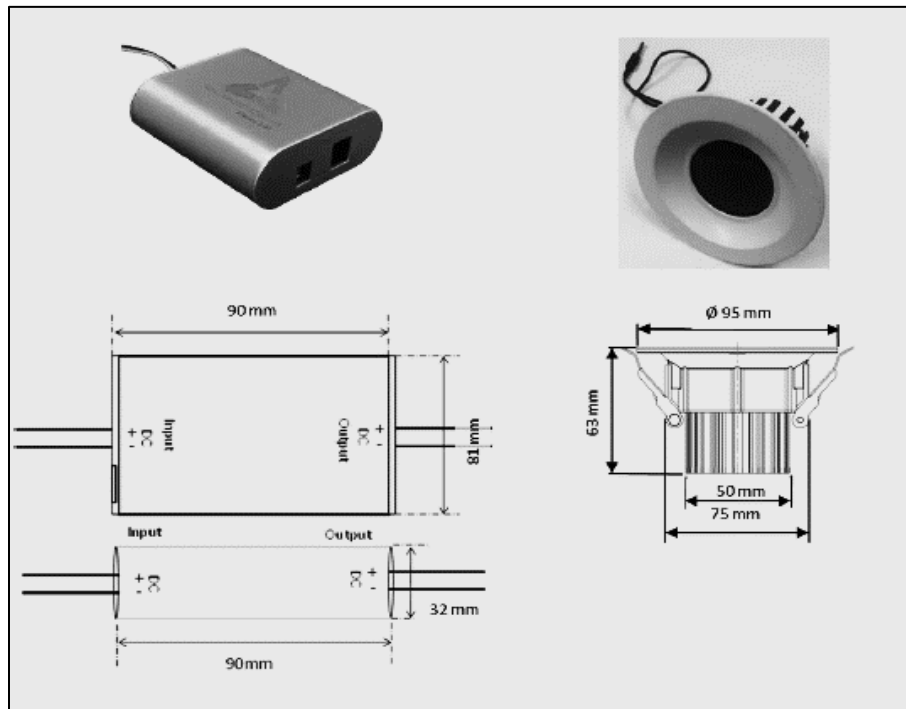


Figura 101. Transceiver transceptor techo

Fuente: Oledcomm, 2015.

Transceptor Portable

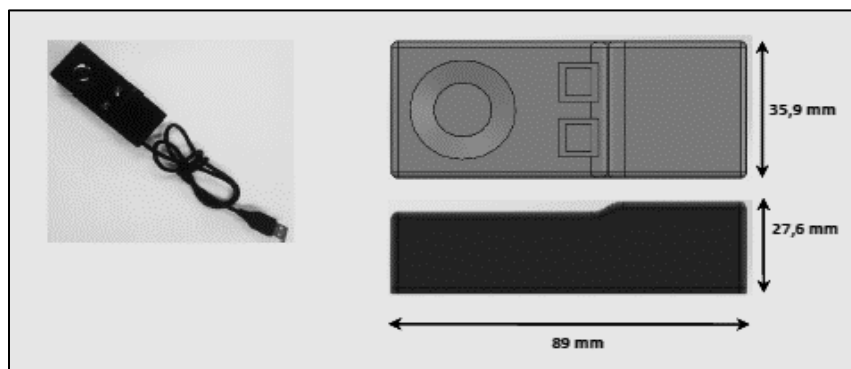


Figura 102. Transceiver transceptor portable

Fuente: Oledcomm, 2015.