

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

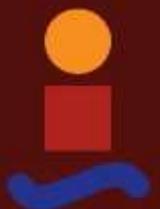
Estudio del Estado del Arte de los sistemas de
comunicaciones por luz visible (VLC)

Autor: Blanca Lorenzo Grandes

Tutor: María José Madero Ayora

Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Estudio del Estado del Arte de los sistemas de comunicaciones por luz visible (VLC)

Autor:

Blanca Lorenzo Grandes

Tutor:

María José Madero Ayora

Profesor titular

Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Estudio del Estado del Arte de los sistemas de comunicaciones por luz visible (VLC)

Autor: Blanca Lorenzo Grandes

Tutor: María José Madero Ayora

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

*A mi familia especialmente mis
padres y mis hermanas, a mis
amigos.*

A mis maestros

A María e Inés.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecerle a mi familia el apoyo que me ha dado durante todos estos años, y en especial durante el tiempo que me he dedicado a este trabajo. A mis padres que en todo momento me han dado su apoyo y en ningún momento han dudado de mi capacidad y de mi esfuerzo. A mis hermanas por motivarme en todo momento.

En segundo lugar, agradecer a mis amigas los ratos que hemos pasado juntas para poder despejarnos.

También agradecer a mis amigas de la escuela por todos estos años que hemos vivido juntas.

Por último agradecer a mi tutora, M^a José, la dedicación que me ha prestado y que ha hecho posible el fin de este trabajo.

Blanca Lorenzo Grandes

Sevilla, 2016

Resumen

El desarrollo de este TFG de investigación está encaminado al conocimiento y del nuevo sistema VLC en las comunicaciones inalámbricas, se explicarán sus características, se comparará con otros sistemas de comunicación, se explicará el sistema de comunicación con su correspondiente canal, transmisor y receptor. También se desarrollarán otros aspectos importantes como las posibles aplicaciones o incluso las aplicaciones actuales. Esta tecnología emergente intenta obtener las características deseadas en un sistema de comunicación inalámbrico como por ejemplo la alta tasa de transmisión de datos o la seguridad.

En este trabajo aparecen términos relacionados con la utilización de los espectros en las comunicaciones con redes ópticas inalámbricas, como factor clave para el mejoramiento de la seguridad y la fiabilidad en la transferencia de información a través del sistema, el cual tiene diferencias abismales con los sistemas WiFi, partiendo de la utilización de un espectro de luz visible emitida a través de luces LED, cuyas características permiten un ahorro considerable de energía.

Abstract

The development of this TFG research is aimed at understanding the new VLC system in wireless communications, its characteristics are explained, will be compared with other communication systems, the communication system will be explained with its corresponding channel, transmitter and receiver. Other important issues, such as the possible applications or even current applications will also be developed. This emerging technology attempts to obtain the desired characteristics in a wireless communication system such as the high rate of data transmission or security.

This paper shows terms related to the use of spectrum in communications with wireless optical networks as the key to improving the safety factor and reliability in the transfer of information through the system, which has abysmal differences systems WiFi, based on the use of a spectrum of visible light emitted by LED lights, whose features allow considerable energy savings.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxiii
1 Introducción	1
1.1. <i>Objetivos</i>	2
1.2. <i>Organización</i>	3
2 Introducción a VLC	11
2.1. <i>Origen</i>	12
2.2. <i>Características</i>	13
2.3. <i>Ventajas y desventajas</i>	15
2.4. <i>Comparación</i>	16
2.4.1 VLC vs IR	16
2.4.2 VLC vs RF	18
2.5. <i>LIFI</i>	20
2.5.1 Modo de funcionamiento	21
2.5.2 Ventajas y desventajas	21
2.5.3 Aplicaciones	22
2.6. <i>VLCC</i>	22
2.7. <i>Líneas futuras</i>	23
3 Sistema VLC	24
3.1 <i>Modelo básico</i>	26
3.2 <i>Canal</i>	27
3.2.1 Modelo de propagación para canales NON-LOS	29

3.2.2	Modelo de propagación con canales LOS	30
3.3	<i>Transmisor</i>	31
3.3.1	El led	32
3.4	<i>Receptor</i>	39
3.4.1	Fotodiodos	41
3.4.2	Fotodiodo PIN	44
3.4.3	Fotodiodo de avalancha	45
3.4.4	Ruido en fotodetectores	46
4	Modulaciones en los sistemas VLC	49
4.1	<i>Modulación OOK</i>	49
4.1.1	BER OOK	50
4.2	<i>PWM Y PPM</i>	52
4.2.1	PPM	54
4.2.2	PPM BER	55
4.3	<i>IPPM</i>	56
4.3.1	IPPM BER	56
4.4	<i>VPPM</i>	57
4.4.1	BER VPPM	58
4.5	<i>OFDM</i>	59
4.5.1	Modulación QAM	60
4.5.2	Modulación QPSK	60
4.5.3	Sistema de comunicación óptico inalámbrico	62
5	El estándar vlc	67
5.1	<i>Introducción</i>	67
5.2	<i>Estándar</i>	67
5.2.1	Alcance del estándar VLC	67
5.2.2	Estándar de transmisión de datos VLC	69
5.2.3	Estándar de la iluminación	69
5.3	<i>IEEE 802.15</i>	70
5.3.1	802.15.1	71
5.3.2	802.15.2	72
5.3.3	WPAN de alta velocidad	72
5.3.4	802.15.4	73
5.3.5	802.15.5	74
5.3.6	802.15.6	76
5.3.7	802.15.8	77
5.3.8	802.15.9	77
5.3.9	802.15.10	77
5.3.10	IEEE 802.15.7	78
6	Aplicaciones VLC	81
6.1	<i>Comunicaciones en interiores</i>	82
6.2	<i>Comunicaciones entre vehículos</i>	83
6.2.1	Configuración del sistema	83
6.2.2	Problemas	85
6.2.3	Reflexión en la superficie de la carretera	85
6.3	<i>Posicionamiento</i>	87
6.3.1	Sistemas de posicionamiento interior	88
6.3.2	Sistemas de localización exterior	95
6.4	<i>Entornos restringidos</i>	99
6.4.1	Aviones	99
6.4.2	Hospitales	102
7	Retos y restricciones técnicas	107

7.1	<i>Retos en la comercialización</i>	110
7.2	<i>El problema del nodo oculto</i>	111
7.3	<i>El problema de la atenuación</i>	112
7.3.1	Necesidad de regulación	113
7.3.2	Técnicas de atenuación	113
7.3.3	Modulación basada en esquemas de atenuación	114
7.3.4	Codificación basada en esquemas de atenuación	115
7.3.5	Técnicas adaptativas	115
7.4	<i>Interferencia en la iluminación.</i>	116
8	Estado del arte de soluciones basadas en VLC	119
8.1	<i>pureLiFi</i>	119
8.1.1	Soluciones	119
8.2	<i>América LiFi</i>	122
8.2.1	Soluciones	122
8.3	<i>LightBee</i>	125
8.4	<i>DISNEY</i>	127
9	Conclusión	129
9.1	<i>Conclusión</i>	129
9.2	<i>Líneas futuras</i>	129
	Referencias	131
	Índice de Conceptos	¡Error! Marcador no definido.
	Glosario	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Ventajas y desventajas de VLC	15
Tabla 2-2. Comparación VLC e Infrarrojos.	17
Tabla 2-3. Comparación VLC y RF.	18
Tabla 3-1. Características fotodetectores [57].	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Funcionamiento de VLC [1]	2
Figura 2-2-1. Espectro radioeléctrico [15].	14
Figura 3-1. Esquema básico de comunicación [32]	24
Figura 3-2. Respuesta en frecuencia de pequeña señal [34].	25
Figura 3-3. Escenario VLC [35]	25
Figura 3-4. Modelo básico sistema VLC [37].	26
Figura 3-5. Diagrama de bloques	26
Figura 3-6. Enlace directed LOS [41]	28
Figura 3-7. Non-directed LOS [41]	28
Figura 3-8. Directed Non-LOS	29
Figura 3-9. Non-directed Non-LOS [41]	29
Figura 3-10. Curva del LED, voltaje-intensidad [51].	33
Figura 3-11. Luz blanca generada mediante LED azul [52].	34
Figura 3-12. Ángulos sistema VLC [40].	37
Figura 3-13. Potencia recibida de luz directa [49].	37
Figura 3-14. Distribución de potencia recibida [49].	38
Figura 3-15. Receptor VLC.	40
Figura 3-16. Linealidad de un fotodiodo.	43
Figura 3-17. Tiempo de subida de un fotodiodo [65].	44
Figura 3-18. Estructura fotodiodo PIN [67].	45
Figura 3-19. Estructura de un fotodetector APD [69].	46
Figura 3-20. Dependencia del factor de ruido en un fotodetector APD [72]	48
Figura 4-1. Modulación OOK [76].	50
Figura 4-2. Esquemas modulaciones PWM y PPM [79].	54
Figura 4-3. Modulación PPM [81].	54
Figura 4-4. Esquema modulación IPPM [81].	56
Figura 4-5. Modulación VPPM [83].	58
Figura 4-6. Esquema OFDM [86].	59
Figura 4-7. Modulación QAM [86].	60
Figura 4-8. Constelación QPSK [89].	61
Figura 4-9. Esquema QPSK [90].	61
Figura 4-10. Ejemplo modulación U-OFDM [94].	63

Figura 4-11. Resultado modulación U-OFDM [94].	63
Figura 4-12. Ejemplo modulación DCO-OFDM [94].	64
Figura 4-13. Esquema transmisor ADO-OFDM [95].	65
Figura 5-1. Organización estándar 802.15 [108].	71
Figura 5-2. Red doméstica multimedia [107].	75
Figura 5-3. Interconexión entre PC y periféricos [107].	76
Figura 5-4. Interconexión entre servicios de mano [107].	76
Figura 5-5. Transmisor y receptor PHY I [119].	78
Figura 5-6. Transmisor y receptor PHY II [119].	79
Figura 1-7. Transmisor y receptor PHY III [119].	80
Figura 6-1. Configuración de los vehículos [133].	83
Figura 6-2. Rayo directo y reflejado [134].	84
Figura 6-3. Diagrama de bloques transmisor y receptor [134].	84
Figura 6-4. Superficie de la carretera [134].	86
Figura 6-5. Algoritmo de localización [137].	89
Figura 6-6. Esquema lateración circular [140].	91
Figura 6-7. Lateracion hiperbólica [140].	93
Figura 6-8. LPS con un semáforo [146].	97
Figura 6-9. LPS con dos semáforos [146].	99
Figura 6-10. Esquema sistema VLC en aviones [148].	100
Figura 6-11, Longitud de onda para cada pasajero [148].	101
Figura 6-12. Diagrama de bloques OFDM con PLC [150].	103
Figura 6-13. Diagrama de bloques para monitorizar al paciente [151].	104
Figura 6-14. Sistema VLC en hospitales [151].	106
Figura 7-1. Problema del nodo escondido [168].	112
Figura 7-2. Diagrama de bloques de sistema VLC regulable [169].	113
Figura 7-3. Diagrama de bloques.	117
Figura 7-4. Esquema básico del LED.	117
Figura 7-5. Esquema básico receptor.	118
Figura 8-1. Accesorios necesarios para LiFlame	121
Figura 8-2. Accesorios para implementar LiFi-X.	122
Figura 8-3. Llave GeoLiFi	124
Figura 8-4. Conector ONEWAYLiFi.	125

A^*	Conjugado
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de x elevado a y
$\cos^x y$	Función coseno de x elevado a y
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto
x°	Notación de grado, x grados.
$P(A)$	Probabilidad del suceso A
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
$<$	Menor o igual
$>$	Mayor o igual

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, en casi todos los momentos de nuestro día a día, las telecomunicaciones están presentes. Se han convertido en un pilar fundamental en nuestras vidas y sería imposible imaginarnos nuestras vidas sin las telecomunicaciones, ya que están presentes en todos los ámbitos de nuestra vida.

Las telecomunicaciones han evolucionado exponencialmente de hace unos años a la actualidad. ¿Quién diría hace unos años que sería posible establecer una comunicación multimedia a cualquier hora del día y con cualquier persona que esté en cualquier parte del mundo? Actualmente se ve muy normal, pero hace unos pocos años era impensable.

Cada día, el número de personas que acceden a la red es mayor, además, cada vez se utiliza para más situaciones cotidianas.

La aplicación más demandada actualmente es el acceso a internet. Hoy en día la tecnología más utilizada para este tipo de aplicaciones es mediante la comunicación por radiofrecuencia del espectro electromagnético, por lo tanto, la mayoría de las conexiones inalámbricas se hacen por medio de WiFi.

Debido a la gran cantidad de usuarios en la red, y al número tan alto de aplicaciones orientadas a la red, la demanda de ancho de banda ha aumentado considerablemente, como consecuencia, las siguientes generaciones de sistemas tienen que ofrecer una mayor capacidad para poder soportar una gran cantidad de servicios de banda ancha.

Como hay tantas aplicaciones que utilizan la banda de radiofrecuencia, la zona del espectro de RF se ve cada vez más congestionada y, por consiguiente, la asignación de frecuencia cada vez es más complicada.

Además hay que tener en cuenta que las comunicaciones de RF necesitan una inversión económica alta, necesitan instalaciones de antenas, y el mantenimiento de estas.

Una alternativa a las comunicaciones por radiofrecuencia es VLC (*Visible Light Communications*), donde la comunicación se realiza mediante la luz visible. En esta nueva tecnología, la fuente de información es una lámpara, normalmente con luces LED gracias al desarrollo de esta, y el receptor está compuesto por un fotodetector para poder recibir la luz. Debido a que la luz no traspasa sólidos, el transmisor y el receptor tienen que tener visibilidad directa ya que si no la comunicación sería inviable.

Los problemas de RF mencionados anteriormente se solucionan ya que el espectro de luz visible es aproximadamente diez mil veces mayor que el espectro de RF, por lo tanto la banda estará bastante libre y las frecuencias se podrán asignar sin ningún problema, y la infraestructura necesaria para esta tecnología sólo requiere una fuente luminosa.

El término VLC, comunicación por luz visible, implica el uso de cualquier porción del espectro de luz visible para transmitir información. Esta tecnología permite que se establezca comunicación mediante luz visible. Gracias a que el espectro visible abarca un gran rango de frecuencias, el ancho de banda la luz tiene una velocidad muy alta, mediante esta tecnología se consigue transmitir datos con una tasa de datos muy alta.

La alta velocidad de la luz no me parece justificación para que la tasa de datos sea alta. La tasa de datos alta se consigue gracias al uso de un gran ancho de banda o al empleo de múltiples emisores simultáneos (matrices de LEDs). La velocidad de la luz es aproximadamente la misma que la

velocidad a la que se propagan las ondas electromagnéticas, pero eso no te da la alta tasa de datos.

La idea inicial es simple a la par que potente. Se trata de transmitir información con elementos de iluminación al mismo tiempo que se da luz a una habitación. También es posible en ambientes exteriores, como por ejemplo, empleando como transmisor farolas, y todo ello sin necesitar complejas infraestructuras o dispositivos.

Al igual que WiFi, este sistema de comunicación también es inalámbrico pero en lugar de utilizar ondas electromagnéticas se utiliza la luz visible.

El funcionamiento de esta tecnología se puede apreciar en la Figura 1-1.

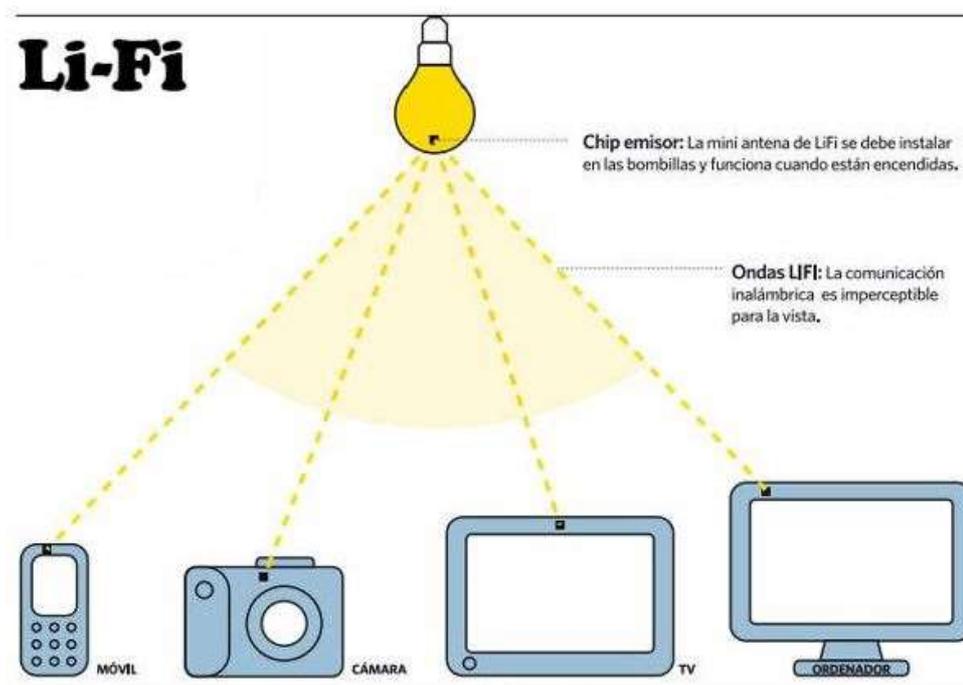


Figura 1-1. Funcionamiento de VLC [1]

En el transmisor, es decir, en la bombilla, se coloca un chip emisor o antena transmisora que la convierte en un *router* luminoso para que esa bombilla pueda emitir flujo luminoso con datos de información. La luz será recibida y procesada por el receptor, que puede ser cualquier sistema inteligente como un ordenador, *smartphone*, tableta o una televisión entre otros. Las ondas o impulsos luminosos que emite la bombilla sólo se emiten cuando la bombilla está encendida y son imperceptibles para la vista humana.

Haral Haas, considerado uno de los padres de las comunicaciones por luz visible, resume su funcionamiento de la siguiente manera:

"Cuando se aplica una corriente constante a un [emisor-diodo] bombilla LED, se emite un flujo constante de fotones desde la lámpara que se observa como la luz visible. Si se varía la corriente poco a poco, la intensidad de salida de la luz se atenúa de arriba abajo (varía también). Debido a que las bombillas LED son dispositivos semiconductores, la corriente, y por lo tanto la salida óptica, puede ser modulada a velocidades extremadamente altas que pueden ser detectadas por un dispositivo fotodetector y transformarla de nuevo en corriente eléctrica. La modulación de la intensidad es imperceptible para el ojo humano, y por lo tanto la comunicación es tan transparente como RF [tecnología de radiofrecuencia]. Usando esta técnica, la información de alta velocidad se puede transmitir de una bombilla LED a un receptor".

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es el estudio de los sistemas VLC, conocer más sobre las comunicaciones mediante la luz visible, en concreto:

- Conocer el origen y las características de los sistemas VLC.
- Emisores y receptores de las comunicaciones por luz visible
- El enlace VLC.
- Técnicas de modulación.
- Restricciones técnicas y retos de la tecnología.
- Posibles aplicaciones, como comunicación en interiores, comunicaciones dentro de los sistemas inteligentes de transporte, comunicaciones en entornos restringidos o posicionamiento.
- El estándar 802.15.7.
- Estado del Arte se soluciones basadas en VLC.

1.2. Organización

Este trabajo se ha organizado del siguiente modo:

1. En primer lugar, está el capítulo Introducción a VLC, en este capítulo se explican el origen, las características, ventajas y desventajas de los sistemas VLC. También se compara con los sistemas de comunicación más utilizados hoy en día, los sistemas RF y la comunicación por Infrarrojos. Por último, se explica que es el Li-Fi, el consorcio de VLC o VLCC y las líneas futuras de esta nueva tecnología.
2. En segundo lugar, se desarrolla un sistema de comunicación VLC, explicando el canal, el transmisor y el receptor. En el canal, se profundiza en la transmisión LOS y la NLOS, en el transmisor, el LED ya que es la fuente de luz más apropiada para esta comunicación, el LED blanco, el funcionamiento de estos y sus propiedades básicas. Por último, el estudio del receptor, donde tienen un papel clave los fotorreceptores y en concreto los fotodiodos, en este apartado también se explican las fuentes de ruido que surgen en esta etapa de la comunicación.
3. El cuarto capítulo es Modulaciones de los Sistemas VLC, en este capítulo se estudiarán las modulaciones más típicas en estos sistemas, estas son la modulación OOK, la PPM, y sus variantes, IPPM y VPPM. También las modulaciones QAM y QPSK en sistemas OFDM.
4. En el quinto capítulo se habla del estándar, en concreto, del alcance del estándar, del estándar de transmisión de datos, del estándar de la iluminación y por último del grupo de trabajo del IEEE 802.15, y se profundiza en el subgrupo 802.15.7, subgrupo al que pertenece los sistemas de comunicación por luz visible.
5. El sexto capítulo, Aplicaciones VLC, se desarrollan posibles aplicaciones que se pueden implementar en el futuro, como por ejemplo, las aplicaciones en interiores, los sistemas de transporte inteligente, o dicho de otro modo, la comunicación entre vehículos, los sistemas de posicionamiento interior y exterior, y los sistemas en entornos restringidos.
6. El capítulo 7, retos y restricciones técnicas de la tecnología, explica las limitaciones de estos sistemas y las posibles soluciones. Hay que destacar los retos en la comercialización, el problema del nodo escondido, el problema de la atenuación y por último, las interferencias con la iluminación.
7. Por último, está el capítulo del estado del arte de soluciones basadas en VLC. En este capítulo se va a desarrollar aplicaciones implementadas actualmente y las empresas que las han implementado.

2 INTRODUCCIÓN A VLC

En este capítulo se va a introducir el concepto de comunicaciones por luz visible (VLC), para así acercarnos al concepto tratado. Para ello se va a introducir lo que es VLC, después seguirán sus orígenes y sus características y por último la descripción se centrará en los sistemas LiFi, que se explicarán más adelante.

Cuando se habla de VLC, se refiere a una fuente de iluminación, como por ejemplo un LED, que además de alumbrar es capaz de transmitir información utilizando la misma señal de luz. En otras palabras, VLC se puede descomponer como la suma de iluminación más comunicación. Esto es posible gracias a la alta velocidad de transmisión de datos, a la que el ojo humano no es capaz de apreciar destellos de luz.

Es una comunicación emergente que nos ofrece una transmisión de datos por medio de sistemas inalámbricos a una alta velocidad, ya que es una característica de los sistemas muy demandada actualmente. Los sistemas VLC, como se ha dicho antes, transmiten datos por medio de luz visible usando el espectro de frecuencia de 400 a 800 THz.

Hay otros términos utilizados en el ámbito de las comunicaciones por luz visible, que tienen un significado parecido a VLC pero con diferencias. Estos tres términos son:

- Comunicaciones FSO (*Free Space Optical*). Es parecido a VLC pero no sólo considera la luz visible, sino también la luz ultravioleta y los infrarrojos entran en esta categoría. Además no se necesita iluminación para FSO, por lo que tiende a ser utilizada en haces de luz estrechos para aplicaciones como enlaces de comunicación entre edificios. FSO a menudo usa láser en lugar de diodos LED [2].
- LiFi, este término se explicará más detalladamente a lo largo de este capítulo. Suele usarse para describir aplicaciones de alta velocidad de VLC, en escenarios donde WiFi podría usarse en lugar de LiFi. La tecnología es similar a WiFi con la diferencia que en vez de transmitir por ondas radio, se transmite por medio de la luz.
- OWC (*Optical Wireless Communication*). Este término es muy general, ya que se refiere a todo tipo de comunicaciones ópticas inalámbricas. VLC, LiFi, FSO o control remoto por infrarrojos son ejemplos de OWC [2].

Primero se intentó transmitir datos a través de luz incandescente e incluso con lámparas fluorescentes. Estas difícilmente podían transmitir datos, ya que en estas transmisiones había destellos de luz evidente. Además este tipo de bombillas no se pueden encender más de una o dos veces por segundos y no durante mucho tiempo, ya que no pueden soportar ser encendidas y apagadas tantas veces durante mucho tiempo y por eso terminan quemándose. Por lo tanto, FSO a través de estas bombillas habría sido inviable. Además de lo anterior, son ineficaces, ya que se transmitiría a una velocidad muy baja, y sería muy incómodo estar presente en dicha comunicación debido al hecho de una bombilla parpadeante [3].

Gracias al desarrollo del LED, se llega al punto de inflexión en las comunicaciones FSO, ya que nace una nueva subcategoría además de la tecnología de infrarrojos existente. Nació la comunicación por luz visible (VLC) también conocido por luz de red inalámbrica o WiLi.

VLC se refiere a la comunicación de datos en el rango visible del espectro electromagnético. Este rango se mide de 400 a 700 nm de longitud de onda o espectro visible. El término VLC apareció en 2003 cuando un pequeño grupo de personas en la Universidad de Keio, en Japón, en los laboratorios Nakagawa, comenzó a

experimentar con LED y fotodiodos con el fin de lograr una comunicación a través de luz visible [3].

En los laboratorios Nakagawa, junto con algunas de las mayores empresas de tecnología de Japón, como por ejemplo Panasonic, se crea lo que se conoce como el consorcio de VLC. Más tarde, se unió a este consorcio el correspondiente grupo de infrarrojos, la asociación de datos por infrarrojos (IrDA). Desde entonces, se han realizado muchas actividades de investigación relacionadas con VLC desde todo el mundo, con el programa de marco Europeo OMEGA 7 y el trabajo de la Universidad de Oxford, siendo el más destacado [3].

Como conclusión, el objetivo de VLC es la iluminación y transmisión de datos simultáneamente aplicando la misma tecnología. Teniendo en cuenta que VLC se está refiriendo a la luz visible, las cuestiones específicas relacionadas con la salud en el ámbito de las redes radio tienen una gran mejora.

2.1. Origen

Durante cientos de años se han utilizado las comunicaciones ópticas con el fin de comunicarse a kilómetros de distancia. Desde antes de que Graham Bell inventase el fonógrafo en 1880, se usaban las comunicaciones ópticas. En la antigüedad, por ejemplo, las personas se comunicaban por medio de señales de humo para enviar información a personas que se encontraban a kilómetros del humo.

Una de las primeras tecnologías donde se implantó FSO fue una aplicación militar, utilizada en el ejército francés a finales del siglo XVII. El sistema de telegrafía de Chappe consistía en estructuras de madera de cinco metros de altura separados uno de otros por once kilómetros. Estaba compuesto por tres brazos móviles capaces de articular 196 señales que se traducían por palabras o frases con un significado concreto. A estas estructuras se les incorporaban telescopios para que así, desde la estructura adyacente, se pudiese ver el mensaje transmitido y enviarlo a la siguiente. En un minuto, una señal se desplazaba 135 kilómetros. Este sistema también podía usarse en la oscuridad gracias a la iluminación que tenían implementada. Este sistema de comunicación no era todo lo rápido que se quería, pero conseguía transmitir una señal mediante comunicaciones ópticas durante cientos de kilómetros [4].

El primer experimento de VLC fue gracias a Alexandre Graham Bell que inventó el fonógrafo en 1880. Este instrumento permitía la transmisión del sonido por medio de emisiones de luz. El principio básico del fonógrafo consistía en modular una emisión de luz directamente al receptor que era donde se conectaba el teléfono. La modulación se realizaba por medio de un espejo vibratorio o por un disco rotatorio que periódicamente oscurecían el haz de la luz [5]. Fue el primer instrumento que emitió luz.

Durante la segunda guerra mundial, tanto los del Eje como los Aliados, usaron la tecnología FSO, como por ejemplo, el alemán *Lichtsprengerät* 80 y el servicio telefónico americano de infrarrojos [4].

En 1955, se introdujo el control remoto de televisión inalámbrico, *Flash-Matic Tuning*. Este sistema sólo estaba compuesto por un botón que permitía encender, apagar o cambiar de canal, todo esto gracias a las células fotoeléctricas situadas en las cuatro esquinas de la pantalla. Esta fototecnología fue una innovación significativa en televisión y permitió la transferencia de señales inalámbricas. Un año más tarde, en 1956, este sistema fue reemplazado por tecnología ultrasonido. Desde entonces, el control remoto IR sigue siendo muy común [6].

En 2001, en Praga, se desplegó un nuevo sistema de acceso, RONJA (*Reasonable Optical Near Joint Access*) [7], tecnología controlada por el usuario de un enlace de datos ópticos punto a punto de manera inalámbrica. Este enlace tiene un rango de 1,4 kilómetros y una tasa de datos estable y *fullduplex* de 10Mbps. RONJA puede ser de uso cotidiano, ya que se puede montar en una casa conectándolo a un ordenador o a cualquier otro dispositivo con acceso a la red. Una ventaja de esta tecnología es el bajo coste que tiene. Se puede considerar que es uno de los sistemas inalámbricos de menor precio que existe en el mercado [8].

Gracias a que la industria de los LEDs se ha desarrollado y ha avanzado mucho en los últimos años, el LED como fuente de datos ha conseguido una transmisión más potente y con mejor calidad. Los LED de luz blanca tienen un módulo con alta potencia, mientras los LEDs de luz azul combinado con fósforo amarillo se usan para iluminar espacios interiores y exteriores [9].

En 2003, en Japón, en la universidad de Keio, se empezó a utilizar el LED como fuente de transmisión de datos por luz visible. Desde entonces, ha sido objeto de numerosas investigaciones para así avanzar en las comunicaciones de luz visible.

En 2006 los investigadores de CCTR PennState (*Center for Information and Communications Technology Research*) proponen una combinación de comunicaciones por línea de potencia (PLC) y la luz blanca del LED para así proporcionar acceso de banda ancha para aplicaciones en interiores. Esta aplicación sugiere que VLC podría ser desplegada en un futuro como una solución perfecta [4].

En 2010, un equipo de Siemens y el Instituto Fraunhofer de Telecomunicaciones demostraron la transmisión a 500 Mb/s con un LED de luz blanca a una distancia de cinco metros y en distancias más largas usando cinco LEDs lograron alcanzar una velocidad de 100 Mb/s [4].

El proceso de normalización de las comunicaciones VLC se realizó en el IEEE en el grupo de trabajo de redes de área personal inalámbricas, en el estándar 802.15. En otro capítulo se desarrollará esta norma más extendidamente.

Como conclusión de esta pequeña referencia histórica de algunos de los puntos concretos a lo largo de la existencia de las tecnologías FSO y VLC, se podría decir que las comunicaciones ópticas siempre han sido populares, o bien, consideradas de algún modo. Además pueden ser útiles en aplicaciones muy variadas en un futuro próximo. Teniendo en cuenta todas las ventajas que tienen sobre otros sistemas inalámbricos hoy en día más comunes, se espera que VLC se desarrolle más y sustituya a estas otras.

Actualmente los sistemas VLC, tienen un especial atractivo, ya que pueden ser una solución clave para sistemas inalámbricos, además de ser una solución muy económica.

2.2. Características

Actualmente las tecnologías de comunicaciones inalámbricas son mediante ondas electromagnéticas, la más popular en el uso cotidiano es WiFi. Aunque hoy en día está aumentando la tecnología con LEDs, gracias a su desarrollo, sobre todo para sistemas interiores. Después del conocer en qué consiste esta tecnología y sus antecedentes, se van a explicar ahora las características principales y así después concluir con las ventajas y desventajas de la misma y la comparación con otras tecnologías similares.

- **Visibilidad:** Como el propio nombre de esta tecnología indica, VLC transmite flujo de datos a través de luz visible. Por lo tanto, al tiempo que se emiten datos, existe una iluminación agradable en la habitación in situ.
- **Espectro no regulado:** el rango del espectro electromagnético abarca el rango de 3 Hz a 300 GHz. Existen dos tipos distintos de licencias de espectro de comunicación, la concesión de licencias de radiodifusión y la concesión de licencia celular.

En todo el espectro hay un rango especial que no necesita licencia, ICM (Industrial, Científica y Médica). VLC pertenece a este rango y va desde 370 THz a 870 THz. Por lo tanto, no hay problema por el uso del espectro ya que no necesita licencia [10].

- **Seguridad humana:** Con respecto la transmisión a través de luz, se puede encontrar problemas de seguridad, sobre todo para el ojo. La modulación PHY de VLC puede hacer que la luz parpadee. El parpadeo de la luz puede tener efectos nocivos para la salud en los animales o personas.

El destello de luz da impresión de inestabilidad visual inducida por un estímulo de la luz cuya distribución espectral fluctuará con el tiempo. El CFF (*Critical Fusion Frequency*, o umbral de fusión de parpadeo) es la frecuencia en la que un estímulo de luz intermitente parece ser completamente estable para el observador. Un parpadeo en la luz causa impactos nocivos en la salud del observador como, por ejemplo, molestias visuales, fatiga visual, dolor de cabeza, disminución en el rendimiento de las tareas mentales como comprensión lectora, etc. [11].

Los sistemas VLC, a pesar de la tasa de transmisión de datos, tienen que cumplir el requisito de que la frecuencia de modulación debe ser mayor que el umbral CFF para así evitar daños perjudiciales para la salud. Las siguientes normas regulan el parpadeo de la luz para estos sistemas [12].

- IEC 1000-3-3/ EN 61000-3-3: Compatibilidad electromagnética. Parte 3-Límites- Sección 3: Limitación de fluctuaciones de voltajes y parpadeo en redes de suministro de energía de bajo voltaje para equipos con corriente de entrada menor de 16 A.

- IEC 1000-3-5: Compatibilidad electromagnética. Parte 3- Límites. Sección 5: Limitación de fluctuaciones de voltajes y parpadeo en redes de suministro de energía de bajo voltaje para equipos con corriente de entrada mayor de 16 A.

La potencia del rango del espectro visible más cercano a la radiación láser infrarrojo 8400-1400 nm penetrará en el globo ocular y puede producir desprendimiento de la retina. Las normas relacionadas con esto se encuentran en [12]:

- IEC 60825: Seguridad del láser.
- ANSI Z136: Normas de seguridad del láser.
- EN 207: Norma europea para la protección de seguridad con el láser.

Los LEDs usados como lámparas tienen que ser evaluados y clasificados para que cumplan las normas de seguridad anteriores. Por eso se dice que las comunicaciones por luz visible no son nocivas para la salud, ya que se aplican los requisitos de seguridad mencionados y así no dañan los ojos.

- **Uso en área restringida:** En muchas ocasiones, los dispositivos de comunicación de radiofrecuencia se tienen que apagar ya que están en lugares donde pueden causar interferencias, como por ejemplo en los vuelos o en los hospitales. Esto, con el uso de VLC, no hace falta ya que no causa interferencias. Además se puede usar en lugares donde hay población más sensible a la salud como hospitales, colegios o residencias de ancianos ya que esta tecnología no tiene efectos adversos en la salud [13].
- **Alta tasa de datos:** VLC es un tipo de comunicación óptica inalámbrica. Esta tecnología tiene altas velocidades, por lo tanto, las comunicaciones por luz visible heredan esta característica [14].
- **Ancho de banda:** Como se ha dicho antes, las comunicaciones por luz visible explotan la región visible del espectro electromagnético que abarca de 3 kHz a 300 GHz. Sin embargo las comunicaciones de luz visible abarcan el rango de 400 a 800 THz. Por lo tanto la banda de frecuencia utilizada en los sistemas VLC es 1000 veces mayor que la usada en las comunicaciones de radio frecuencia. En la Figura 2-2-1 se muestran el rango que abarca cada tecnología.

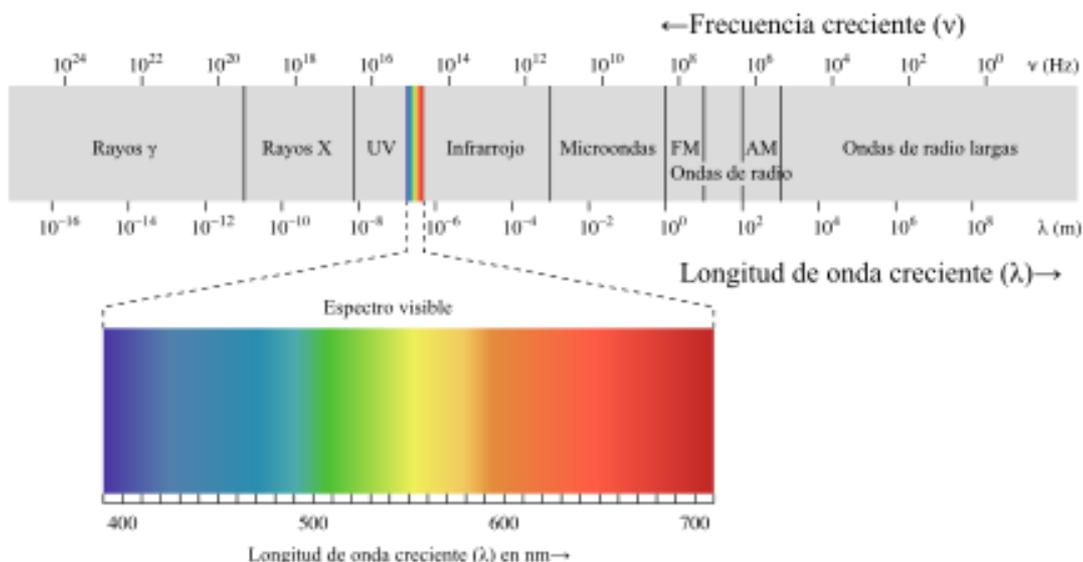


Figura 2-2-1. Espectro radioeléctrico [15].

- **Naturaleza ubicua:** En estos sistemas se tiene una infraestructura de luz bien establecida hacia el mundo exterior. Además de esto, los dispositivos de iluminación a base de bombillas LEDs son cada vez más aceptados y por lo tanto más incorporados en los sistemas luminarios a nivel mundial. Desde

la existencia de la tecnología VLC el uso de fuentes de luz visible para las comunicaciones inalámbricas es más frecuente, así que se espera que se convierta en una tecnología ubicua en un futuro cercano [16].

Cuando se habla de ubicuo se refiere a que está presente en todas partes al mismo tiempo.

- **Seguridad:** Debido a que los datos se transmiten por medio de la luz, respecto a la seguridad de los datos en estos sistemas, al no haber ondas electromagnéticas de por medio, tanto la interceptación de la señal como la interrupción de la misma es casi imposible. Por lo tanto nadie que esté fuera de la habitación donde se está haciendo el intercambio de información puede acceder a los datos que se están transmitiendo. Además de esto, VLC implica comunicación con visibilidad directa, por lo que es posible aprovechar la comunicación sin romper el enlace. Por lo tanto, ofrece una comunicación muy segura y se puede utilizar en aplicaciones militares de alta seguridad donde la comunicación por radiofrecuencia es propensa a intrusos. Esto es consecuencia directa de que la luz no puede traspasar paredes o techos, al contrario que las ondas electromagnéticas.
- **Económico:** Para que un sistema VLC exista sólo hace falta una fuente de datos que emita luz y un receptor con un sensor. La instalación de la fuente es igual que la instalación de la luz, es barata además. El precio de los LEDs es muy barato comparado con otros dispositivos de iluminación ya que el consumo de potencia es mínimo y cumplen la función de iluminar a la perfección. Por lo tanto, con el coste de la instalación y de los LEDs el sistema es bastante económico.

2.3. Ventajas y desventajas

Gracias al apartado anterior se pueden sacar como conclusión las ventajas e inconvenientes de estos sistemas. En la Tabla 2-1 se resumen los principales, muchas de ellas se han explicado en el anteriormente.

Tabla 2-1. Ventajas y desventajas de VLC

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No es nocivo para el cuerpo humano	Absorción atmosférica
Transmisión de datos por tramas de luz existentes	Dispersión del haz de luz
Alivio de los problemas asociados con los sistemas radio de comunicación	Ruidos de interferencias de otras fuentes tienen que ser filtrados
Menor consumo energético	No hay comunicación si no hay visibilidad directa
Incremento de la seguridad	Sólo espectro discreto disponible como fuente de luz y sensor
Integración compacta en sensores de pequeñas dimensiones	Interferencia de fuentes de luz de fondo
Electrónica simple como el controlador del LED	Desvanecimiento de la señal
No tiene influencia sobre otros equipos sencillos de ondas de radio	
Gran número de canales sin interferir con otras fuentes	

Esta tecnología tiene muchas ventajas. Una de las principales es que no satura el espectro usado, ya que usa el

espectro visible y este es de mayor capacidad. Además, la información llega por el haz de la luz, por lo tanto se puede manipular la anchura de este, o bien crear un haz disperso que proporcione una cobertura amplia, o, por el contrario, un haz muy fino que ilumine pequeñas zonas y transmita información de forma más concreta y direccional, por lo que se puede decir que la privacidad y seguridad de los datos están aseguradas.

Por otro lado, una de las grandes desventajas está relacionada con lo anterior. Como la luz no sobrepasa objetos o muros, se necesita que haya visibilidad directa entre el transmisor y receptor para que haya comunicación. Esto también condiciona que la cobertura de la comunicación se corte en cuanto se interponga cualquier objeto en el haz de luz. También hay que tener en cuenta que el alcance de esta tecnología es muy reducido. Para aumentar la distancia de transmisión, la potencia de la fuente de la luz debe ser incrementada. El sensor de imagen se puede utilizar en combinación con lentes telescópicas para realizar enlaces de larga distancia. Desafortunadamente, esta mejora lleva un aumento apreciable en el coste de implementación. Se espera que en un futuro esto se mejore sin que aumenten los costes, ya que a más de cinco metros aproximadamente la señal apenas llega [17].

Como la luz no sobrepasa objetos no habrá interferencias con aplicaciones interiores en otra habitación, y al no estar en el mismo rango de frecuencias que las ondas electromagnéticas, no habrá interferencias con equipos que se comuniquen por medio de ondas radio.

Otro de los inconvenientes enunciados es que VLC sufre de desvanecimiento y atenuación atmosférica. Esto limita las aplicaciones de alta velocidad de datos a enlaces de comunicación de corta distancia. Sin embargo, teniendo un enlace de corta distancia, con suficiente potencia de transmisión este ya no es un problema [18].

También se puede usar para transmitir grandes volúmenes de datos entre equipos o a dispositivos multimedia. Por ejemplo, si se quiere enviar un vídeo del móvil a un televisor de forma rápida o copiarlo a un disco duro de red, bastaría con apuntar el teléfono a la televisión o al disco duro durante unos segundos para que la comunicación se produjese y se transfiriesen los datos, como se hace actualmente con el mando a distancia para cambiar de canal.

2.4. Comparación

En este apartado se va a comparar la tecnología VLC con RF y con comunicación por infrarrojos. En primer lugar se va a introducir ambas tecnologías y después se procederá a la comparación.

2.4.1 VLC vs IR

La radiación infrarroja, también llamada radiación térmica, es un tipo de radiación electromagnética con una longitud de onda mayor que la del espectro visible pero menor que el espectro de ondas electromagnéticas, por lo tanto, tiene menor frecuencia que la luz visible pero mayor que las microondas [19].

Su longitud de onda oscila entre 700 nm-900 nm, y está justo detrás del espectro de la luz visible del rojo.

Se clasifica en tres métodos según el modo de transmisión, estos son: punto a punto, casi-difuso y difuso [20].

Para las transmisiones punto a punto debe haber visibilidad directa, ya que se hace de forma direccional. El inconveniente de esta transmisión son sus limitaciones, ya que hay que colocar el transmisor y receptor enfrentados. Se suele usar en redes inalámbricas.

En el método casi-difuso, a diferencia que en el método punto a punto, el tipo de emisión, en vez de ser direccional, es radial. Esto significa que se produce en todas las direcciones. Para conseguirlo, se transmite hacia distintas superficies reflectantes, y estas redirigirán hacia las estaciones receptoras. Dependiendo de cómo sea la superficie reflectante, se puede clasificar en dos tipos de reflexión, pasiva y activa. En la reflexión pasiva, debido a las cualidades reflexivas del material, la superficie reflectante sólo refleja la señal. Mientras que en la reflexión activa, el medio reflectante, al que se le conoce como satélite, además de reflejar la señal, también la amplifica. La reflexión pasiva es más barata y flexible pero necesita que la potencia de transmisión sea mayor, ya que no tiene etapa amplificadora.

Por último, en el modo de emisión difuso, la diferencia con el método casi-difuso es que debe ser capaz de abarcar, mediante múltiples reflexiones, todo el recinto en el cual se encuentran las estaciones. Para conseguirlo, se requiere una potencia superior que en los otros dos tipos de transmisiones, ya que las pérdidas son mayores puesto que el número de rebotes inciden directamente en el recorrido de la señal.

Algunas de las aplicaciones más comunes de esta tecnología son el envío de documentos desde un ordenador a una impresora, coordinar agendas o libretas telefónicas entre ordenadores, enviar imágenes desde una cámara a un ordenador, control remoto entre dispositivos electrónicos o aplicaciones médicas.

Las comunicaciones por infrarrojos tienen muchas similitudes con los sistemas VLC, ya que se transmiten a través de luz, tienen una longitud de onda del mismo orden por lo que la cobertura que cubren no es muy amplia, y son sistemas difíciles de interceptar. En la siguiente tabla se muestra una comparación entre ambas tecnologías.

Tabla 2-2. Comparación VLC e Infrarrojos.

	VLC	Comunicaciones por IR
Tasa de datos	Depende del LED, por lo general mayor de 100 Mbps	4 Mbps (FIR) 16 Mbps (VFIR)
Estandarización	Estandarizado en IEEE 802.15.7	IrDA
Distancia	Metros	3 metros aproximadamente
Regulación	No	No
Seguridad	Buena	Buena
Portadora	380nm -780nm	700nm -900nm
Servicio	Iluminación y comunicaciones	Comunicaciones
Fuente de ruido	Luz solar u otras fuentes de iluminación	Luz ambiental
Aplicaciones	Comunicaciones interiores y en vehículos	Control remoto, conexión punto a punto

Las comunicaciones por infrarrojos ofrecen las mismas ventajas. En términos de ancho de banda disponible, está por detrás de las comunicaciones por luz visible en ciertas áreas.

Como ambos sistemas transmiten en frecuencias poco utilizadas en las aplicaciones, el ancho de banda no se tiene que restringir, por lo tanto el uso del espectro de frecuencias no está regulado.

La tasa de datos en los sistemas IR no se puede aumentar más allá de un nivel prescrito ya que puede ser peligroso para el ojo humano [21]. Este problema se puede solucionar usando VLC, ya que la luz visible no lo daña porque el LED transmite luz a muy baja potencia. Por lo tanto, VLC es capaz de transmitir a velocidades mucho más altas que las comunicaciones por infrarrojos. Como se muestra en la Tabla 2-2 la tasa de transmisión de los sistemas VLC alcanza más de 100 Mbps, mientras que por infrarrojos se transmite hasta los 4 Mbps en FIR (*Fast Infrared*) y los 16 Mbps (*Very Fast Infrared*).

Las comunicaciones por infrarrojos están estandarizadas por la IrDA (*Infrared Data Association*). IrDA es una

asociación sin ánimo de lucro que proporciona normas para garantizar la calidad e interoperabilidad de los equipos infrarrojos. Mientras que los sistemas de comunicación visibles están estandarizados en el grupo 802.15.7 del IEEE.

La cobertura que cubre la transmisión de VLC puede alcanzar varios metros gracias al servicio de la iluminación. Por el contrario, la distancia máxima para un controlador remoto utilizando infrarrojos no alcanza más de tres metros. Por lo tanto, el rango de transmisión es mayor en las comunicaciones por luz visible que por infrarrojos.

Como se aprecia en la Tabla 2-2, las longitudes de ondas de ambas comunicaciones son distintas. Esto hace que las fuentes de ruido sean diferentes. En el caso de las comunicaciones por infrarrojos el ruido proviene de la luz ambiental ya que esta contiene luz infrarroja, por el contrario en el caso de VLC las fuentes de ruido son tanto la luz solar como cualquier otra fuente de iluminación.

En ambos casos la seguridad es buena, pero gracias a que la fuente de información de VLC es luz visible, daña menos el ojo que la luz infrarroja. También, aunque en ambos sistemas la fuente es luz, la luz infrarroja no la aprecia el ojo humano. Por lo tanto, uno de los servicios que ofrece VLC es la iluminación además de la comunicación.

Las comunicaciones por infrarrojos, al llevar más tiempo usándose, tienen muchas más aplicaciones que la tecnología VLC por ser mucho más reciente.

2.4.2 VLC vs RF

Las comunicaciones por radiofrecuencia, llamadas también radiocomunicación es una forma de telecomunicación que se realiza mediante ondas electromagnéticas, cuya longitud de onda va de 1 mm hasta 10000 km, en otras palabras, su frecuencia oscila entre los 3 Hz hasta los 300 GHz. Las propiedades de esta tecnología dependen de la frecuencia a la que se opere, por ello, hay bandas conocidas como baja frecuencia, media frecuencia, alta frecuencia, etc.

Cuando la onda de radio actúa sobre la antena, se crea una corriente eléctrica debido al movimiento de la carga eléctrica. Esta corriente se transformará en señales portadoras de información [22].

El transmisor produce una señal portadora cuyas características serán modificadas dependiendo del tipo de información que emita, como por ejemplo una señal audio o video. Esto es lo que se conoce como modulación. La señal modulada se propaga hasta que el receptor la recibe y la demodula, y así conseguir la señal que emitió el transmisor.

Tiene aplicaciones muy variadas, ya que desde hace muchos años es la forma más común de telecomunicación. Entre sus aplicaciones cabe destacar la televisión, la radio y la telefonía móvil, entre otras.

Aunque hoy en día las comunicaciones de RF sean la tecnología inalámbrica más popular, también presenta inconvenientes. VLC puede ser utilizado en comunicaciones inalámbricas donde los sistemas de RF presenten un rendimiento ineficiente.

Al contrario que las comunicaciones por infrarrojos, esta tecnología es muy diferente de VLC. La longitud de onda de ambas tecnologías son de distinto orden, y esto hace que el comportamiento de la señal sea muy diferente. En la Tabla 2-3 se mostrarán algunas de las principales diferencias.

Tabla 2-3. Comparación VLC y RF.

	VLC	RF
Tasa de datos	Gbps	Mbps
Longitud de onda		
Frecuencia	3 Hz-300 GHz	370-870 THz

Regulación	No	Sí
Cobertura	Mayor, hasta km	Unos metros
Coste	Bajo	Alto
Fuente de Ruido	Fuentes de iluminación	Aplicaciones del espectro electromagnético
Traspaso de paredes	No	Sí
Seguridad	No	Sí
Encriptación	Sí	No
Problemas ante la lluvia/niebla/nieve	Sí	No

El ancho de banda, la interferencia y la tasa de datos son unas de las ventajas más significativas de VLC frente a RF.

El ancho de banda en el caso de la tecnología VLC no se tiene que restringir. Por esa razón la velocidad de transmisión es alta, del orden de los cientos de Mbps o Gbps mientras que en las comunicaciones por radiofrecuencia es menor, puede llegar hasta decenas de Mbps aproximadamente.

En un sistema por radiofrecuencia, las frecuencias están reguladas por el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, basado en el Reglamento de Radiocomunicación de la ITU, esto quiere decir que el uso de las bandas de frecuencias requieren licencias para su uso en cualquier parte del mundo. Sin embargo, en los sistemas de comunicación por luz visible esto no es necesario ya que la banda de frecuencias del espectro visible no está regulada.

Algunos de los factores de atenuación presentes en VLC son la lluvia, la nieve, la niebla, los relámpagos y la luz solar, entre otros, por lo que estos sistemas son más eficientes en lugares cerrados donde no estén expuestos a condiciones climáticas que no son favorables en la comunicación. Por el contrario, en los sistemas de RF estos apenas influyen [23].

El rango de frecuencias de VLC es mucho más amplio que el de RF, como se muestra en la Tabla 2-3, ya que este último abarca 300 GHz aproximadamente frente a los 500 THz que comprende la tecnología VLC. Como se puede ver es hasta diez mil veces mayor, como conclusión, las frecuencias disponibles son mucho mayores en la tecnología por comunicación visible.

Una de las desventajas principales de VLC frente a RF es la cobertura, mientras que en VLC no llega a más de los pocos metros, en RF la cobertura puede llegar a ser de orden de kilómetros, como por ejemplo en aplicaciones relacionadas con la televisión o la telefonía móvil. Como VLC se transmite por la luz, y esta no

atraviesa los obstáculos, es necesario para que exista comunicación la visión directa. Por esa razón, la comunicación por luz visible alcanza poco rango de distancia y no se puede comunicar con otras habitaciones, mientras que las ondas electromagnéticas sí atraviesan obstáculos y no necesitan visibilidad directa para que la transmisión sea posible. Sin embargo, gracias a esta característica, con VLC no se puede interceptar información, ya que, a menos que se esté en el lugar donde se produce ese intercambio de información, es imposible conseguir los datos que se transmiten. En cambio en RF esto no sucede, la información se puede interceptar con mucha facilidad.

Debido a que la luz no traspasa las paredes, esta comunicación se podría utilizar en lugares donde haya personas más sensibles como colegios u hospitales o en lugares donde dispositivos RF no se puedan usar, como los aviones, ya que el ruido a estos sistemas sólo lo pueden causar otras fuentes de iluminación y no causan interferencias a los sistemas RF. Por el contrario, en las aplicaciones de radiofrecuencias, al ser tan abundantes y tener un uso muy amplio del espectro electromagnético, el ruido es causado por cualquier aplicación de dicho espectro que tenga una frecuencia cercana a la que el dispositivo esté operando.

En las comunicaciones de RF la potencia de transmisión eléctrica no se puede incrementar más de un nivel establecido debido a que se plantean riesgos graves para la salud del cuerpo humano. Las consecuencias nocivas a las que se expone un ser humano con el uso de las tecnologías radio son mayores que cuando la transmisión se hace mediante VLC. Como se ha explicado en el apartado anterior de características de VLC, la seguridad para las personas en términos de salud es muy buena ya que no daña ni la piel ni los ojos, ya que la luz visible no es nociva para las personas. Las ondas electromagnéticas, cuando tienen una frecuencia comprendida entre 5 Hz y 1 kHz pueden afectar a las funciones normales del cuerpo humano, además de producir un aumento en la temperatura de 1 grado que produce efectos biológicos adversos. También puede causar daños en los ojos o en la piel [23].

En un sistema VLC, para que exista transmisión solo hace falta una fuente de iluminación, que generalmente será un LED y un receptor capaz de recibir esa información. Tanto los dispositivos necesarios como la instalación son sencillos y poco costosos, mientras que para los sistemas RF se necesitan, en el caso de la telefonía móvil por ejemplo, antenas, repetidores, etc. que tanto ellos como su instalación son costosos. Por lo tanto, se puede decir que VLC es bastante más económico que RF.

Concluyendo, VLC se complementa con RF, en algunos aspectos la tecnología VLC es superior a RF y viceversa. Por ejemplo, WiFi puede dar cobertura a un espacio amplio dentro o fuera de un edificio y ZigBee también da cobertura pero en cortas distancias. Sin embargo, con estas tecnologías está presente el problema de las interferencias, banda de ancho limitado, problemas de salud y seguridad, que se resuelven utilizando VLC.

2.5. LIFI

Li-Fi (*Light Fidelity*) es una versión de WiFi rápida y barata, que se basa en la tecnología VLC.

Es a través de la iluminación mediante la adopción de la fibra óptica gracias al envío de datos a través de la luz, que su intensidad varía más rápido que lo que el ojo humano puede seguir [24].

Los principales componentes de este sistema de comunicación son:

- LED blanco con alto brillo que actúa como fuente de comunicación.
- Un fotodiodo de silicio que muestra una buena respuesta a la región de longitud de onda visible.

El LED se enciende o se apaga para generar cadenas digitales de 1's y 0's respectivamente. Mediante la modulación de la luz, la iluminación del LED puede usarse como fuente de transmisión. Esto es posible gracias a que la tasa de parpadeo sea tan alta, por eso, el ojo humano tiene la percepción de una salida del LED constante.

Li-Fi es el término que algunos han utilizado para etiquetar el rápido y barato sistema de comunicación inalámbrica, que es la versión óptica de WiFi. El término fue utilizado por primera vez cuando Harald Haas, de la Universidad de Edimburgo, Reino Unido, habló sobre la comunicación por luz visible. "En el corazón de esta tecnología se encuentra una nueva generación de diodos emisores de luz de alto brillo", dice Harald Haas. "Muy Sencillamente, si el LED está encendido, usted transmite un 1 digital, si está apagado usted transmite un

0 ", dice Haas. "Pueden ser activados y desactivados rápidamente, lo que da buenas oportunidades para la transmisión de datos" [25].

Es posible codificar los datos a la luz variando la velocidad a la que los LEDs parpadean y se apagan para dar diferentes cadenas de 1's y 0's. La intensidad del LED se modula con tanta rapidez que el ojo humano no puede notarlo, por lo que la salida parece constante. Aunque técnicas más sofisticadas podrían aumentar de manera espectacular las velocidades de los datos. Las técnicas de la Universidad de Oxford y la Universidad de Edimburgo se están centrando en datos en transmisión paralela usando matriz de LEDs, donde cada LED transmite un flujo de datos diferente. Otro grupo está utilizando mezclas de rojo, verde y azul para alterar la frecuencia de la luz que codifica unos datos diferentes [24].

Investigadores del Instituto Heinrich Hertz, en Berlín, Alemania, han alcanzado tasas de más de 500 Mbps utilizando un estándar de luz LED blanca. La tecnología se demostró en 2012 en el *Consumer Electronics Show* en Las Vegas. Con un par de *smartphone* de la marca Casio, se consiguió el intercambio de datos a través de la variación de la intensidad de la luz de sus pantallas, detectable a una distancia de hasta diez metros [26].

En octubre de 2011 una serie de empresas y grupos industriales formó el Consorcio Li-Fi, para promover la óptica de alta velocidad de sistemas inalámbricos y para superar la limitada cantidad del espectro electromagnético inalámbrico disponible mediante su explotación de una forma completamente diferente. El consorcio cree que es posible conseguir más de 10 Gbps, lo que permite descargarse una película de alta definición en 30 segundos.

2.5.1 Modo de funcionamiento

Cuando una corriente constante se aplica a una bombilla de luz LED, un flujo de fotones constantes son emitidos de manera que se observa como luz visible. Si la corriente se varía lentamente, la intensidad de salida de la luz se atenúa. Esto ocurre porque las bombillas LED son dispositivos semiconductores, y la corriente, y por lo tanto, la salida óptica, pueden ser moduladas a velocidades extremadamente altas que pueden ser detectadas por un dispositivo fotodetector y convertidas de nuevo a la corriente eléctrica. La modulación de la intensidad es imperceptible para el ojo humano, y por lo tanto la comunicación es tan transparente como los sistemas de comunicación por radiofrecuencia. Usando esta técnica, la información de alta velocidad puede transmitirse desde una bombilla de luz LED [27].

La comunicación por radiofrecuencia requiere de circuitos de radio, antenas y receptores complejos, mientras que Li-Fi es mucho más simple y utiliza métodos de modulación directos similares a los utilizados en los dispositivos de comunicaciones por infrarrojos de bajo coste, tales como unidades de control remoto. La comunicación de infrarrojos está limitada en potencia debido a los requisitos de seguridad de los ojos, mientras que las bombillas LED tienen altas intensidades y pueden alcanzar velocidades de datos muy grandes.

2.5.2 Ventajas y desventajas

Li-Fi al ser una comunicación por luz visible comparte muchas ventajas y desventajas con VLC. Entre las ventajas más destacables de Li-Fi, se encuentra el uso en lugares restringidos, como aviones, donde no se puede usar la tecnología WiFi por la razón de que interfiere con otros tipos de señales. Además, es más seguro porque no atraviesa paredes, es más barato, la velocidad de transmisión es alta (va desde los 15 Mbps hasta los 20 Gbps), como se transmite directamente no requiere autorización de usuario. Gracias al uso de bombillas LEDs es posible la doble funcionalidad, mientras hay iluminación, obtienes internet mediante Li-Fi. Esto permite un ahorro debido a que con la misma energía y el mismo producto se puede disfrutar de dos funciones diferentes.

Por el contrario, algunas de sus desventajas son: al no atravesar paredes, no se puede usar fuera de la habitación donde está instalado; como es una tecnología reciente surgen problemas de compatibilidad y uso, pocos dispositivos cuentan con receptor de Li-Fi integrado y además muy pocas personas conocen el funcionamiento y los beneficios de esta forma de comunicación; no trabaja bajo la luz del sol directa debido a que causa interferencia y puede causar pérdidas de datos y de señal; y el rango de cobertura no es muy grande, aproximadamente unos diez metros desde la fuente de transmisión.

A pesar de todas las ventajas que supone Li-Fi, no es probable que, de aquí a un futuro cercano, sustituya al WiFi en su totalidad, sino que se complementen, para así poder crear redes más seguras y más rápidas.

Actualmente, los investigadores están trabajando en la adaptación de los dispositivos actuales para que sean compatibles con Li-Fi. Por ejemplo, PureLiFi, empresa creada por Haas y su equipo, ofrece una aplicación para acceso inalámbrico seguro, o también, la empresa francesa Oledcomm está trabajando con Li-Fi y está instalando su propio sistema en hospitales.

Al mismo tiempo, compañías como Samsung, LG y otros fabricantes de dispositivos electrónicos están interesados en fabricar teléfonos inteligentes con sensores de luz Li-Fi.

2.5.3 Aplicaciones

El crecimiento del uso de bombillas LEDs en la iluminación proporciona la oportunidad para incorporar esta tecnología en los lugares donde estos estén implementados.

Li-Fi es especialmente adecuado para muchas aplicaciones de internet de consumo de contenido, tales como descarga de archivos multimedia, videoconferencia, etc. Algunas de las aplicaciones principales para Li-Fi son [28]:

- **Alivio del espectro de RF:** La demanda excesiva de la capacidad de las redes celulares puede ser cedida a las redes Li-Fi donde hay más disponibilidad.
- **Iluminación inteligente:** Toda la iluminación, tanto pública como privada incluyendo las farolas de las calles, se pueden utilizar para proporcionar puntos de acceso Li-Fi.
- **Conectividad móvil:** Los ordenadores portátiles, teléfonos inteligentes, tabletas y otros dispositivos móviles se pueden interconectar entre ellos directamente a través de Li-Fi. Gracias a que son enlaces de corto alcance, proporcionan velocidades muy altas además de seguridad.
- **Entornos peligrosos:** Li-Fi ofrece una alternativa segura a la interferencia electromagnética de comunicaciones por radiofrecuencia como en minas o plantas petroquímicas.
- **Hospitales y centros de salud:** Li-Fi no emite ninguna interferencia electromagnética. Por esta razón, se puede usar cerca de instrumentación médica o de escáneres de resonancia magnética sin causar interferencias.
- **Vehículos y transportes:** se están introduciendo en los faros y en las luces traseras de los vehículos luces LEDs, con lo que se pueden comunicar dos vehículos entre ellos. Además, las farolas y señales de tráfico que llevan luz incorporada pueden comunicarse con los vehículos. Mediante estas dos formas de comunicación, vehículo-vehículo o vehículo-carretera, se puede conseguir mayor seguridad vial y mejor gestión del tráfico.
- **Evitar la RF:** Algunas personas son extremadamente sensibles a las frecuencias de radio y necesitan una alternativa. Li-Fi es una buena solución a este problema.
- **Servicios basados en la localización (LBS):** Los servicios de información específicos de localización de alta precisión, como por ejemplo, la publicidad o navegación que permiten conocer la localización del receptor para que este reciba la información adecuada.
- **Juguetes:** Muchos juguetes incorporan luces LEDs que pueden ser utilizadas para permitir la comunicación de bajo coste entre los juguetes interactivos.

2.6. VLCC

El consorcio de las comunicaciones por luz visible (VLCC) se estableció en Japón en noviembre de 2003, con las principales compañías de telecomunicaciones (*Fuji Television*), de iluminación (*NEC Lighting*), de potencia eléctrica (*The Tokyo Electric Power Co.*) de esta ciudad. El objetivo de VLCC es dar a conocer y estandarizar la tecnología de comunicación por luz visible, que ha sido discutida y evaluada en los diversos campos de la industria [29].

En mayo de 2014, tras 11 años de actividad del VLCC, se creó la asociación de comunicaciones por luz visible (VLCA, *Visible Light Communication Association*).

VLCA se centra en crear la base del negocio de las comunicaciones por luz visible, ya que actualmente, las luces LEDs se utilizan en una gran variedad de aplicaciones. Por eso quieren establecer una nueva asociación general constituida para apoyar estas actividades. Por este motivo piden a las empresas de varias industrias,

como la industria de las telecomunicaciones, industria de la iluminación, industria de la infraestructura social, la industria de Internet, la industria informática, la industria de los semiconductores, entre otras, que se unan a la Asociación de Comunicaciones por luz visible para la realización de la infraestructura de comunicación luz visible y su negocio. Quieren hacer realidad una vida cotidiana cómoda y un ambiente de trabajo mediante el uso de tecnologías de la comunicación por luz visible [30].

2.7. Líneas futuras

Con esta tecnología, se encuentran muchas posibilidades de crear nuevas aplicaciones para los hogares o ámbitos de trabajo que no somos capaces de imaginar. Además, los últimos desarrollos que se están produciendo relacionados con las comunicaciones por luz visible no hacen más que avanzar y reforzar su importancia en los próximos años.

Por ejemplo, el recientemente constituido *Intelligent Lighting Centre* (ILC) es un centro de investigación de innovación abierta de la Universidad de Strathclyde que trabaja con grandes y pequeñas empresas para ayudarles a desarrollar y probar nuevas tecnologías, servicios, modelos de negocios y aplicaciones de fuentes y sistemas de iluminación de estado sólidos. Está trabajando en un nuevo tipo de bombillas LED específicas para este tipo de aplicaciones que, frente a las que se usan en la actualidad, son de un tamaño mucho menor ya que ocupan un milímetro cuadrado y son capaces de parpadear mucho más rápido (mil veces más rápido que las actuales). Por consiguiente, gracias a la velocidad del parpadeo, se puede conseguir una tasa de transmisión muy superior, ya que puede alcanzar el orden de gigabits por segundo [31].

Actualmente las aplicaciones por luz visible, como VLC, están todavía en fase de desarrollo y experimentación. Sin embargo, de aquí a unos años esta tecnología está llamada a tener un papel fundamental en nuestro entorno cotidiano.

3 SISTEMA VLC

En este capítulo se va a profundizar en los componentes fundamentales que se necesitan en un enlace VLC. Un enlace básico consta de tres bloques esenciales, transmisor, canal y receptor como se muestra en la Figura 3-1.



Figura 3-1. Esquema básico de comunicación [32]

En primer lugar se encuentra el transmisor, cuya fuente de alimentación es un diodo de emisión de luz. Se suele usar o bien LEDs de luz blanca o LEDs rojos, azules o verdes combinados para así obtener el color deseado o de un solo LED, normalmente azul, que excita a un fósforo amarillo para crear una emisión global blanca. El enfoque triplete permite que el color se vaya alterando hasta conseguir el color de LED deseado y también permite que diferentes datos sean enviados en cada dispositivo. Sin embargo, mantener el balance de colores puede ser un reto y hacer que los dispositivos sean más complejos. El LED único es un enfoque más simple y por lo tanto más atractivo para las aplicaciones en general [33].

En la Figura 3-2, se muestra la respuesta en frecuencia de pequeña señal, tanto para el LED azul como para la emisión de un LED blanco. Como se puede apreciar, el ancho de banda es de aproximadamente de 2 MHz para el LED blanco, mientras que para el azul es de aproximadamente 10 MHz. Esto es debido a que el tiempo de bajada de dicho LED es mayor que en el caso del LED blanco que proporciona una limitación del ancho de banda total disponible. Además, las luces de LED azul no están diseñadas para aplicaciones de alta velocidad y de área muy grande en comparación con los dispositivos utilizados para las comunicaciones de alta velocidad [34].

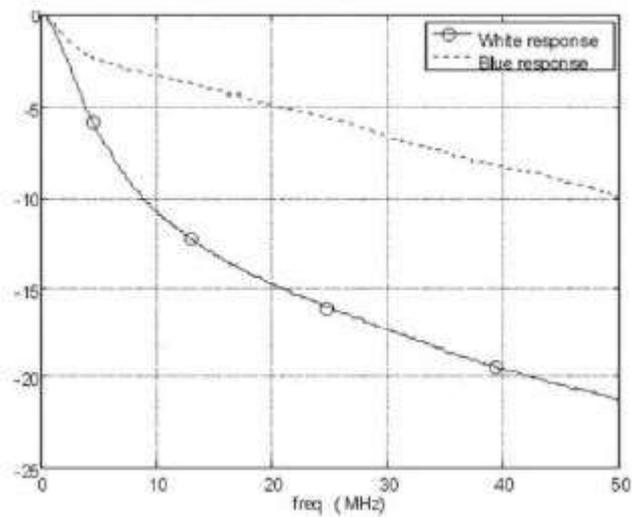


Figura 3-2. Respuesta en frecuencia de pequeña señal [34].

En segundo lugar está el canal, que es el medio por donde se propagan los datos transmitidos, en este caso es el aire.

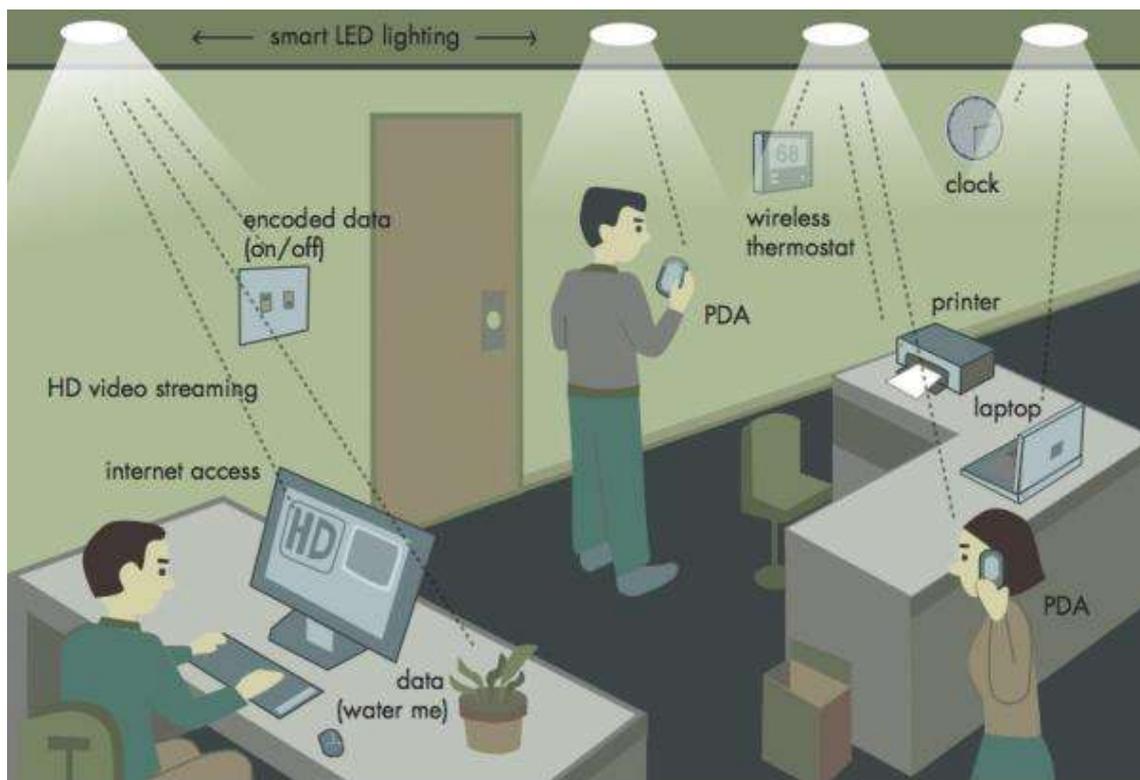


Figura 3-3. Escenario VLC [35]

En la Figura 3-3 se muestra una habitación iluminada con LEDs en el techo. El terminal de comunicación puede estar en un escritorio, por ejemplo, o en otro lugar con visibilidad directa con el LED. En este caso, el canal de comunicación consiste en la línea de visión directa de la ruta desde la unidad del terminal junto con un canal difuso que proviene de otro LED, que no es el que va a transmitir directamente, que se refleja en múltiples superficies dentro de la habitación. Estos dos canales se pueden modelar por separado para obtener la potencia total recibida y por el ancho de banda del canal.

Por último, está el receptor. En este caso, es el bloque más complejo ya que incluye combinadores, comparadores, filtros y recuperadores entre otros. El receptor consiste en un elemento para recoger y

concentrar la radiación del receptor fotodetector. Convierte la radiación en fotocorriente, la cual es tanto preamplificada como postamplificada antes de la recuperación de datos. El elemento óptico normalmente tiene una ganancia máxima limitada por la constante de radiación [36].

3.1 Modelo básico

En los enlaces OWC se suele utilizar la modulación por intensidad y detección directa (IM/DD, *Intensity Modulation/ Direct Detection*), un capítulo de este trabajo se dedicará a dicha modulación. Esta modulación lo que hace es modular directamente la potencia instantánea de los datos que se desean transmitir emitidos por el LED y, tras la propagación por el canal, la información llega al receptor que recupera la información por detección directa en el fotodiodo [37].

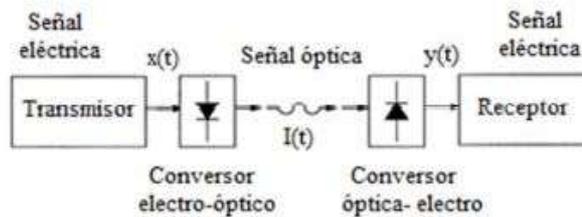


Figura 3-4. Modelo básico sistema VLC [37].

Estos sistemas se pueden modelar como un sistema equivalente de banda base, como se muestra en la Figura 3-5, donde $X(t)$ es la señal de entrada, $Y(t)$ la señal de salida y el término $Rh(t)$, donde R simboliza la respuesta del fotodiodo y $h(t)$ es una función lineal e invariante en el tiempo, es la dispersión temporal que sufre la señal transmitida como consecuencia de la propagación del canal.

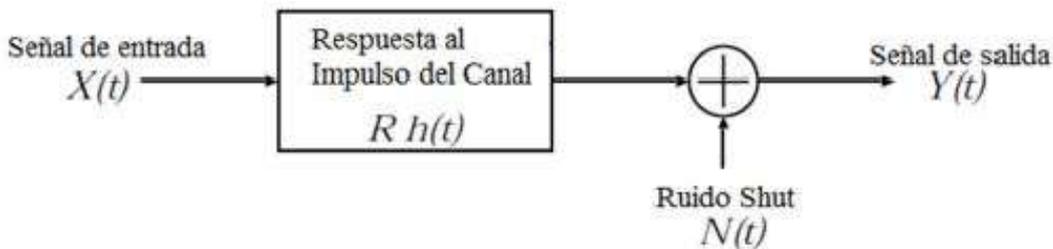


Figura 3-5. Diagrama de bloques

Como en cualquier sistema de comunicación habrá ruido añadido, en este caso es ruido *shot*, de alta intensidad provocado por la luz ambiental. Este ruido se modela como ruido blanco, gaussiano, aditivo e independiente de la señal transmitida. Se simboliza como $N(t)$ [37].

Por lo tanto, el diagrama de la Figura 3-5 se puede resumir en la siguiente ecuación:

$$Y(t) = X(t) \otimes Rh(t) + N(t) \quad (3-1)$$

La ley cuadrática inversa indica que el nivel de iluminación producida por una fuente de luz en una determinada dirección es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la que se encuentra la fuente, por lo tanto, a mayor distancia menor será el nivel de iluminación.

Debido a la ley cuadrática inversa, la corriente de salida del foto-receptor es inversamente proporcional al nivel de potencia incidente. Esto provoca que las pérdidas de potencia en la propagación de los enlaces ópticos sean el doble que las pérdidas de potencia en los enlaces radio. Esta gran atenuación es la causante de que las comunicaciones ópticas tengan problemas para conseguir coberturas elevadas y obliga a los enlaces ópticos a manejar altos niveles en transmisión para así compensar las pérdidas del canal [37].

3.2 Canal

La OWC es un término que explica las comunicaciones inalámbricas por medio de las tecnologías ópticas. Los sistemas OWC incluyen los sistemas de corto alcance por infrarrojos y la comunicación óptica en el espacio libre (FSO) para comunicaciones que requieran un mayor alcance [38].

Como se ha dicho en capítulos anteriores, las comunicaciones por luz visible denotan una tecnología de comunicación que utiliza luz visible tanto para la transmisión como para la iluminación. Hoy en día, se han desarrollado activamente los LEDs en el rango visible de longitud de onda (380nm ~780nm) y se pueden utilizar como fuente de transmisión, mientras que como elemento receptor se utiliza un fotodiodo de silicio debido a que este material presenta una buena capacidad de respuesta. El canal de transmisión es el aire, ya sea en espacios interiores o al aire libre.

Actualmente, los estudios sobre VLC se centran en aplicaciones interiores. Los canales en los sistemas de luz visible están clasificados según las comunicaciones convencionales por infrarrojos, ya que las configuraciones de enlace de VLC son similares a la comunicación por infrarrojos [39].

Las diferentes características provienen de operar en distinto rango de longitud de onda y a su vez, ésta depende del dispositivo (LED visible, fotodetector de silicio, etc.) y del hecho de que VLC tiene doble funcionalidad, comunicación e iluminación. Los otros principios físicos relacionados con la óptica se pueden aplicar de manera similar, incluyendo la transmisión de la luz y la reflexión [40].

Las configuraciones de enlace se clasifican en cuatro tipos básicos, dependiendo de dos parámetros, uno de ellos es si se encuentra en línea de visión (LOS, *Line Of Sight*, Non-LOS) y el otro es según la direccionalidad del receptor al transmisor (*directed, non-directed*). Con estos dos criterios, los tipos de enlaces básicos son, directed LOS o línea de visión directa dirigida, línea de visión no dirigida o non-directed LOS, línea de visión no directa dirigida o directed Non-LOS, o línea de visión no directa y no dirigida o non-directed Non-LOS. La decisión de que el enlace sea dirigido o no depende de si el transmisor tiene la dirección hacia el receptor o no. Mientras que la decisión que el enlace sea LOS o non-LOS depende de si existe un obstáculo que bloquee la transmisión de luz entre un transmisor y un receptor [40].

- **Directed LOS:** En este caso el transmisor y receptor tienen visibilidad directa sin ningún obstáculo que se interponga en la comunicación como se muestra en la Figura 3-6. En este enlace, la luz se puede concentrar en un haz estrecho, consumiendo poca energía. Además ofrece, de entre los cuatro tipos de enlaces mencionados, la más alta velocidad de transmisión y al no haber obstáculos entre el transmisor y receptor y al estar orientados el uno con respecto al otro, la señal no sufre distorsión y el ruido de las fuentes de luz es rechazado cuando el campo de visión (FOV, *Field Of Vision*) es estrecho. Como consecuencia, la velocidad está limitada por la pérdida de trayectoria en el espacio libre en vez de por la dispersión multitrayecto [38].



Figura 3-6. Enlace directed LOS [41]

- **Non-directed LOS:** En esta configuración, mostrada en la Figura 3-7, el transmisor y el receptor tienen visibilidad directa pero el transmisor no está dirigido hacia el receptor. Utiliza transmisores con un haz ancho y receptores con un FOV amplio. La tasa de transmisión que alcanza puede ser más alta que la que ofrecen los sistemas de RF.

Una ventaja que ofrece este tipo de sistema es que no necesita ni alineamiento ni seguimiento gracias a que se puede superar el problema de bloqueo utilizando las superficies reflectantes de los objetos. Por lo tanto, al fotodetector llegará una elevada proporción de luz transmitida procedente de un gran número de direcciones diferentes.

Sin embargo, esto conlleva una pérdida significativa de la trayectoria óptica y por lo tanto es necesaria una potencia de transmisión alta [41].



Figura 3-7. Non-directed LOS [41]

- **Directed non-LOS:** Como el propio nombre indica, entre el transmisor y el receptor hay un obstáculo. Este enlace se puede observar en la Figura 3-8. Se suelen incorporar transmisores y receptores con un ángulo de emisión y campo de visión estrechos, por ello se intenta que el receptor apunte a una superficie reflectante que permita superar al obstáculo.

En esta configuración se consigue superar un obstáculo gracias a que la señal recibida es la reflejada en la superficie a la que el transmisor apunta. Debido a esto se minimiza la dispersión multitrajecto.

El problema central de esta topología es la dificultad de encontrar la alineación entre el transmisor y receptor [38].

En un sistema de VLC, el enlace no dirigido LOS es importante debido a que la iluminación general trabaja en el medio donde la transmisión transcurre pero no es enfocada ni dirigida.



Figura 3-8.Directed Non-LOS

- **Non-directed Non-LOS:** En esta configuración puede que haya obstáculos que bloquean la visión directa entre el transmisor y el receptor y, por lo tanto, para que haya intercambio de información se ayuda de las superficies reflectantes para crear trayectorias alternativas entre el transmisor y el receptor. En la Figura 3-9 se muestra esta configuración.

Normalmente, en esta configuración, el receptor apunta directamente hacia una pared o el suelo emitiendo un amplio haz de luz. Al contrario que el enlace anterior, esta topología no necesita una alineación tan cuidadosa.

El gran problema de estos sistemas es la alta pérdida de la trayectoria [40].



Figura 3-9.Non-directed Non-LOS [41]

3.2.1 Modelo de propagación para canales NON-LOS

Para enlaces NON-LOS, es decir, sin línea de visión directa o difusas, las pérdidas de trayectoria de la luz son complejas de analizar debido a que hay varios factores que intervienen como la reflectividad de objetos intermedios en la comunicación como por ejemplo muebles, las dimensiones de la habitación donde se produce el intercambio de información, las posiciones y orientaciones del receptor y el transmisor entre otros.

La potencia recibida se define como [42]:

$$P_{r-LOS} = (H_{LOS}(0) + H_{nLOS}(0))P_t = (H_{LOS}(0) + \sum_{ref} H_{ref}(0))P_t, \quad (3-2)$$

donde H_{ref} simboliza el camino reflejado.

La característica de reflexión de dichos objetos intermedios en la comunicación varía dependiendo del material, la longitud de onda y el ángulo de incidencia entre otros.

Para llegar a una aproximación de las pérdidas que se producen en canales de este tipo, es preciso hacer un análisis de la distribución de potencia.

En un enlace NON-LOS, la señal alcanza al receptor por medio de las reflexiones, difracciones y dispersiones, por lo tanto, la señal que llega al receptor consiste en la suma de las componentes del camino directo, los múltiples caminos reflejados y la ruta de propagación por difracción. Estas señales provienen de un trayecto diferente, poseen distintas longitudes de onda y retardos diferentes [42].

La respuesta al impulso de este canal se calcula integrando la potencia de todas las componentes que llegan al receptor debido al multitrayecto. La respuesta impulsiva sigue la distribución de Rayleigh, ya que no existe línea de visión directa entre el transmisor y el receptor. La envolvente de la señal se puede modelar a través de dicha distribución dando lugar al desvanecimiento conocido también como Rayleigh *fading* [43].

3.2.1.1 El desvanecimiento Rayleigh

El desvanecimiento de Rayleigh es un modelo estadístico para el efecto de un entorno de propagación de una señal radio.

Los modelos de desvanecimiento Rayleigh asumen que una señal que ha pasado a través de un medio de transmisión variará aleatoriamente, o se desvanecerá, según la distribución Rayleigh [44].

El teorema del límite central sostiene que si hay suficiente cantidad de dispersión, la respuesta al impulso del canal será modelada como un proceso gaussiano con independencia de la distribución de los componentes individuales. Si no hay ningún componente dominante en la dispersión, el proceso tendrá media cero y fase uniformemente distribuida entre 0 y 2π radianes. La envolvente de la respuesta del canal, por lo tanto, seguirá la distribución de Rayleigh.

Llamando a la variable aleatoria R , la función de densidad de probabilidad vendrá dada por la siguiente expresión:

$$p_R(t) = \frac{2r}{\Omega} \cdot e^{-\frac{r^2}{\Omega}} \quad r \geq 0 \quad (3-3)$$

donde $\Omega = E(R^2)$.

Normalmente, los elementos de ganancia y fase de un canal de distorsión están representados como números complejos. En este caso, en el desvanecimiento de Rayleigh las componentes real e imaginaria de la respuesta son modeladas por procesos gaussianos independientes e idénticamente distribuidos con media cero, de tal modo que la amplitud de la respuesta es la suma de ambos procesos, componente real e imaginaria.

3.2.2 Modelo de propagación con canales LOS

Para este tipo de enlaces existe línea de visión directa entre transmisor y receptor. Esta señal también está formada por varias componentes. La señal principal es la componente de visión directa, otras señales son aquellas que provienen de rayos reflejados, como en el canal NON-LOS. En este caso, la envolvente de la señal se correspondería con una distribución Rice y el desvanecimiento que se produce una distribución de tipo Rician *fading* [45].

La función de transferencia viene dada por la siguiente fórmula:

$$H_{ow}(f) = H_{LOS} + H_{nLOS}(f), \quad (3-4)$$

donde H_{LOS} es la función de transferencia de la componente de los rayos directos, que se puede considerar independiente de la frecuencia de modulación pero sin embargo depende de la distancia entre el transmisor y el receptor y de su orientación. H_{nLOS} es referente a la contribución de los rayos reflejados.

3.2.2.1 El desvanecimiento Rician

El desvanecimiento Rician es un modelo estocástico para una propagación de radio anómala causada por la cancelación parcial de la señal de radio transmitida. La señal llega al receptor por varios caminos diferentes. El desvanecimiento Rician se produce cuando uno de los caminos, normalmente, uno de los que llega por medio de visibilidad directa, tiene mayor potencia que los otros. En el desvanecimiento Rician, la ganancia de amplitud se caracteriza por una distribución de Rice [46].

Sin embargo, el desvanecimiento de Rayleigh es el modelo de especialización de desvanecimiento estocástico cuando no hay una línea visibilidad directa de la señal, y es a veces considerado como un caso especial del desvanecimiento Rician. En desvanecimiento de Rayleigh, la ganancia de amplitud se caracteriza por una distribución de Rayleigh.

3.3 Transmisor

El transmisor VLC es diferente de los transmisores de otras comunicaciones convencionales, desde el punto de vista de que debe actuar como transmisor de comunicaciones y dispositivo de iluminación simultáneamente. Por lo tanto, debemos tener en cuenta los siguientes dos requisitos.

En primer lugar, el transmisor VLC, como su propio nombre indica, debe actuar para la comunicación. Por lo general, la fuente de iluminación que se utiliza suelen ser los LEDs. Se debe considerar el ancho de banda de la modulación de los LEDs. Generalmente los LEDs que se necesitan son altos en brillos y los fabricantes de estos no los desarrollan con esta característica. Sin embargo, la mayoría de los LEDs con luz visible tienen un ancho de banda de modulación de alrededor de las decenas de megahercios. Hubo una investigación sobre el aumento del ancho de banda de los LEDs de luz blanca usando la modulación de múltiples resonantes para el sistema de comunicación por luz visible. El experimento demostró que un sistema VLC con 16 LEDs podría conseguir un ancho de banda de 25 MHz [47].

En segundo lugar, el transmisor VLC debe actuar también como fuente de iluminación. El requisito que se debe cumplir es que la iluminancia debe ser entre 200 y 1000 lx para la iluminación interior de la habitación donde se integra esta tecnología de acuerdo con la recomendación ISO. Los LEDs de alto brillo operan con corriente directa mayor de 100 mA en comparación con los dispositivos de comunicación habituales es bastante alta. Por lo tanto, para modular los datos en los LEDs de alto brillo, manteniendo el nivel de iluminación, hace que el diseño del transmisor VLC sea más complejo que diseño convencional del transmisor de comunicación [47].

Todos los tipos de fuentes de luz teóricamente pueden usarse como dispositivo de transmisión en los sistemas VLC. Sin embargo, algunos están mejor capacitados que otros. Por ejemplo, las luces incandescentes se queman cuando se encienden y apagan frecuentemente, de modo que no es una fuente de luz eficiente para VLC, ya que la velocidad es lenta y el tiempo de vida sería muy corto. Por lo tanto, hay que tener ciertas consideraciones en las características como potencia máxima, eficiencia, vida útil, resistencia, dimensiones, etc. La mejor opción considerando todos estos aspectos son los LEDs. Respecto a la eficiencia energética, consumen un 10% del gasto de una bombilla incandescente y un 50% del de una lámpara fluorescente con un mismo nivel de iluminación [48]. La vida útil del LED es de 5000 horas aproximadamente, que supera a las 1200 horas de las bombillas incandescentes y a las 1000 horas de las lámparas fluorescentes.

Se pueden encontrar tantos tipos de LEDs como colores se puedan generar, pero los que generalmente interesan son los de luz blanca ya que mantienen el confort visual.

Hay más LEDs capaces de generar luz blanca como los diodos orgánicos, OLED (*Organic Light-Emitting Diode*) o PLED (*Polymer Light-Emitting Diode*), hasta el momento su uso se ha limitado en pantallas o *displays*. Actualmente es una tecnología en desarrollo y se están creando nuevas aplicaciones. Con respecto a los LEDs, su precio es muy alto y su eficiencia es muy baja [49].

Por último, las fuentes de iluminación artificial tradicionales como las lámparas fluorescentes, se pueden usar como transmisor en sistemas VLC que no precisen de un gran ancho de banda, pero la eficiencia energética, la tasa de transmisión de datos y el confort visual son algunos de sus problemas principales [49].

3.3.1 El led

Un diodo emisor de luz (LED) es una fuente de luz de semiconductor de dos hilos. Es un diodo de unión p-n, fabricado de material semiconductor AlGaAs (arseniuro de aluminio y galio) o GaAsP (arseniuro de fósforo de galio) que emite luz cuando se activa. Cuando se aplica una tensión adecuada a los conductores, los electrones son capaces de recombinarse con los huecos de electrones dentro del dispositivo, liberando energía en forma de fotones. Este efecto se denomina electroluminiscencia, y el color de la luz (correspondiente a la energía del fotón) se determina por el intervalo de banda de energía del semiconductor [50].

3.3.1.1 Funcionamiento

Al valor umbral de funcionamiento del LED se le conoce como TOV (*Turn On Voltage*). Esta tensión umbral es el inicio de flujo de corriente, en este caso en el transmisor, y con eso de la emisión de la luz y el inicio de la comunicación. Cuando el voltaje se encuentra por debajo del TOV, el diodo no está conduciendo y por lo tanto no emitirá luz. A esta zona de funcionamiento se le llama región de corte.

Como se muestra en la Figura 3-10, una vez que se alcanza el TOV la corriente aumenta exponencialmente en relación a la corriente aplicada, esta zona es la que se conoce como región de conducción de corriente.

La luz de salida del LED se puede considerar lineal. Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 3-10, se debe considerar la respuesta real de la tensión y de la intensidad del LED que disminuyen la eficiencia en una transmisión eléctrico-óptica (EO) y en el diseño del circuito de control se debe tener en cuenta los parámetros de voltaje DC y de la señal modulante para garantizar que el LED se encuentra en la región de conducción y no se produzca sobrecalentamiento con el fin de evitar la degradación de la luz, o en el peor de los casos, el fracaso total de la comunicación [51].

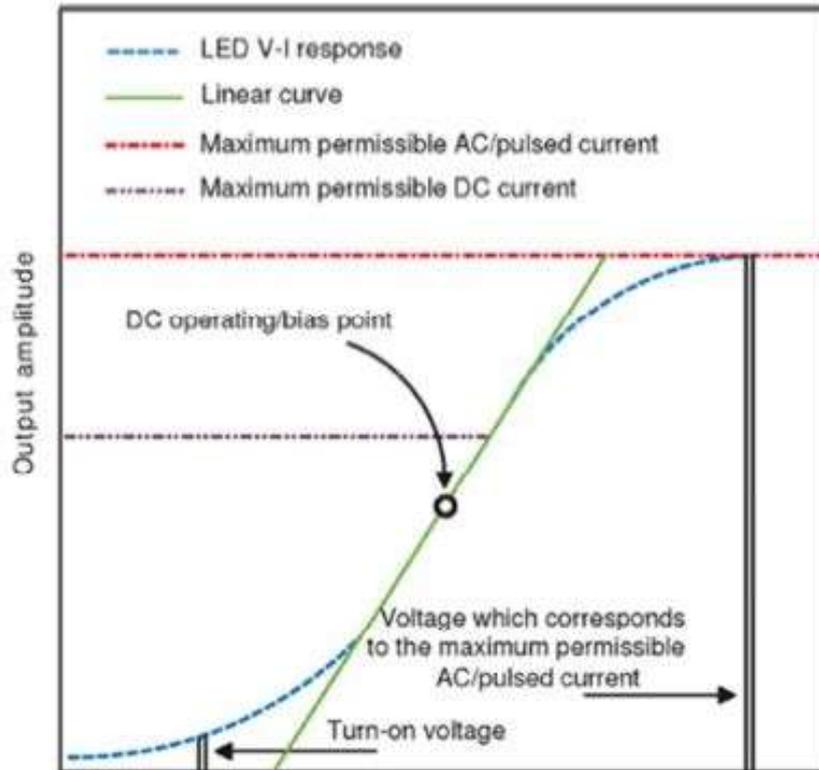


Figura 3-10. Curva del LED, voltaje-intensidad [51].

3.3.1.2 LED BLANCO

El LED blanco ofrece propiedades ventajosas, tales como alta luminosidad, fiabilidad, menor consumo de energía y larga vida útil. Estos dispositivos se utilizan no sólo para iluminar habitaciones, sino también para un sistema de comunicación inalámbrico óptico. En general, las luces están instaladas en nuestra habitación. Por lo tanto, su diferencia de camino óptico debe ser considerada [49].

El LED es más ventajoso que la luz incandescente existente en términos de larga duración, alta tolerancia a la humedad, bajo consumo de energía y generación de calor mínimo en la iluminación. El LED se utiliza en las pantallas a todo color, señales de tráfico y en muchos otros medio de iluminación. Mediante la mezcla de tres luces de color rojo, verde y azul se produce la luz de color blanco. Este LED blanco es considerado como una fuerte candidata para la tecnología de iluminación del futuro. En comparación con los métodos de iluminación convencionales, el LED blanco tiene un menor consumo de energía y baja tensión, vida útil más larga, unas dimensiones más pequeñas y mejor funcionamiento [52].

Para evaluar la calidad del LED blanco hay que tener en cuenta dos parámetros. La temperatura del color, CTT (*Correlated Colour Temperature*), se define como la temperatura a la que un cuerpo negro emitirá luz de ese color. Da una idea si es una luz cálida, más anaranjada, o una luz fría, más cercana al azul. El segundo parámetro es el índice de reproducción cromática, CRI (*Colour Rendering Index*), es una medida de la capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores de varios objetos en comparación con una fuente de luz natural o ideal. Dependiendo de estos parámetros se utilizará para una aplicación u otra.

Para producir la luz blanca existen varios modos, o bien combinando LEDs de colores rojo verde y azul o usando un LED azul cubierto con una capa de fósforo luminiscente [52].

El primer modo para generar LED de luz blanca es utilizar LEDs de colores primarios RGB (rojo, verde, azul), combinándolos y así conseguir luz blanca. La ventaja de este sistema es la flexibilidad del diseño

ya que modificando la intensidad de cada uno de los LEDs que lo forman, el color o la temperatura de color pueden variar en tiempo real.

Sin embargo, el inconveniente de combinar los LEDs rojo verde y azul para generar luz blanca es el bajo índice de reproducción cromática que tiene, y la complejidad de calibrar la alimentación individual de los LEDs de la forma apropiada para mantener el color estable cuando se modulan y a lo largo de su vida útil.

El segundo modo para producir luz blanca es mediante un LED azul recubierto de fósforo que produce una luz amarilla. La luz emitida por el LED azul choca con el fósforo y parte de ella es absorbida de tal modo que emite luz en otra longitud de onda. De la combinación de esta luz con distinta longitud de onda y de la luz no absorbida, que sigue siendo azul, se produce una luz blanca tal como se muestra en la Figura 3-11 [53].

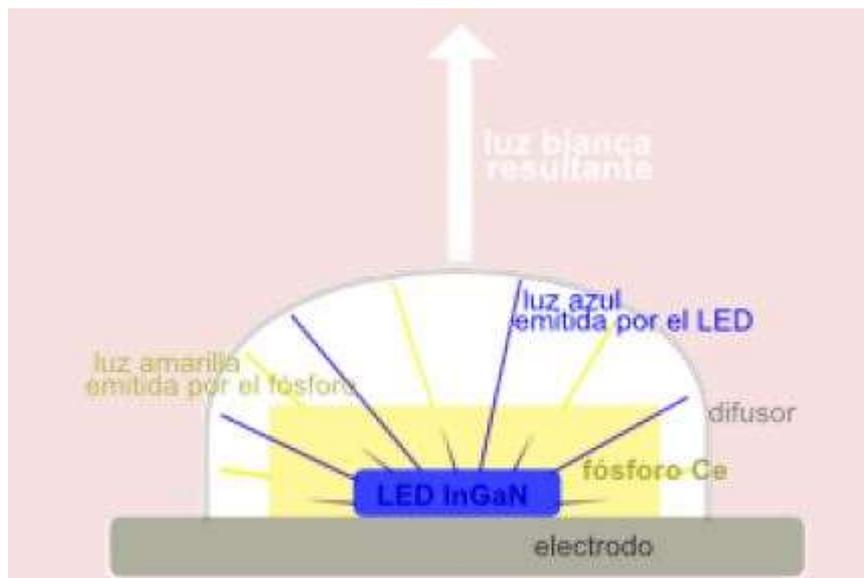


Figura 3-11. Luz blanca generada mediante LED azul [52].

Actualmente es la tecnología más usada para producir LEDs blancos debido a que el coste de fabricación es muy bajo, además de ser muy eficiente, llegando a duplicar la eficiencia del LED RGB. La temperatura puede variar dependiendo del grosor y la concentración de la capa de fósforo empleada desde una temperatura cálida (luz anaranjada) a una más fría (luz azul). Su temperatura de color puede ser desde una temperatura cálida (anaranjada), hasta una demasiado fría para algunos ambientes como un hogar, dependiendo del grosor y la concentración de la capa de fósforo empleada.

Por lo general, esta configuración de luz blanca es una buena elección como transmisor en sistemas VLC llegando a alcanzar tasas de transmisión por encima de los 100 Mbit/s [49].

-El Ministerio de Comercio Internacional e Industria de Japón estima que, si el LED sustituyese a la mitad de todas las lámparas incandescentes y fluorescentes que hoy en día se utiliza en este país, en Japón se ahorraría la producción equivalente de seis plantas de energía de tamaño medio, y se reduciría la producción de gases de efecto invernadero. Un programa nacional en curso en Japón ha sugerido que el LED blanco merece ser considerado como una tecnología general de iluminación del siglo XXI debido al bajo consumo de energía eléctrica.

3.3.1.3 Propiedades básicas de las luces LED

Los LEDs tienen dos propiedades básicas, una es la intensidad luminosa y la otra es la potencia óptica transmitida. Se conoce como intensidad luminosa la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido, se mide en candela (Cd), y se relaciona con la iluminancia en una superficie iluminada. La intensidad luminosa se utiliza para expresar el brillo de un LED [49].

La intensidad luminosa viene dada por:

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}, \quad (3-5)$$

donde Ω es el ángulo espacial y ϕ es el flujo luminoso, el cual depende del flujo de energía y su expresión es:

$$\phi = K_M \int_{380}^{780} V(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda, \quad (3-6)$$

donde $V(\lambda)$ es la curva estándar de la luminosidad y K_M es la máxima visibilidad, y la visibilidad máxima es de unos 683 lm / W a $\lambda = 555 \text{ nm}$ [49].

La integral del flujo de energía en todas las direcciones ϕ_e es la potencia óptica transmitida P_t , que viene dada como:

$$P_t = \int_{A_{\min}}^{A_{\max}} \int_0^{2\pi} \phi_e(\lambda) d\theta d\lambda, \quad (3-7)$$

donde A_{\max} y A_{\min} están determinadas por la curva de sensibilidad del fotodiodo (PD).

Iluminancia del LED

La iluminancia expresa el brillo de una superficie iluminada. La intensidad luminosa en el ángulo ϕ está dada por [54]:

$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi) \quad (3-8)$$

La iluminancia E horizontal en un punto (x, y) viene dada por:

$$E_{hor} = I(0) \frac{\cos^m(\varphi)}{D_d^2 \cos(\psi)}, \quad (3-9)$$

donde $I(0)$ es el origen de la intensidad luminosa de un LED, φ es el ángulo de irradiación, ψ es el ángulo de incidencia, y D_d es la distancia entre un LED y un detector de superficie. Se supone que un chip de LED tiene un patrón de radiación Lambertiana. Por lo tanto, la intensidad radiante depende de φ el ángulo de irradiación, m es el orden de Lambert de emisiones.

Se requiere la consideración de la iluminación del LED. Generalmente, la iluminancia de las luces está estandarizada por la Organización Internacional de Normalización (ISO). Por este conjunto de normas, la iluminancia típica es de 300 a 1500 lx en el uso cotidiano o laboral [49].

Potencia recibida de luz directa

Como se está analizando un sistema VLC se asume que el canal es inalámbrico y óptico, y esta condición se aplicará a los análisis posteriores. En un enlace óptico, la ganancia de canal DC se da como [55]:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos\psi & 0 \leq \psi \leq \psi_e \\ 0 & \psi < \psi_e \end{cases}, \quad (3-10)$$

donde A es el área física del detector del fotodetector, D_d es la distancia entre un transmisor y un receptor, ψ es el ángulo de incidencia, φ es el ángulo de irradiación, $T_s(\psi)$ es la ganancia de un filtro óptico, y $g(\psi)$ es la ganancia de un concentrador óptico, ψ_e denota la anchura de la campo de visión en un receptor. El concentrador óptico $g(\psi)$ se puede dar como:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2\psi_e} & 0 \leq \psi \leq \psi_e \\ 0 & \psi < \psi_e \end{cases}, \quad (3-11)$$

donde n simboliza el índice refractivo.

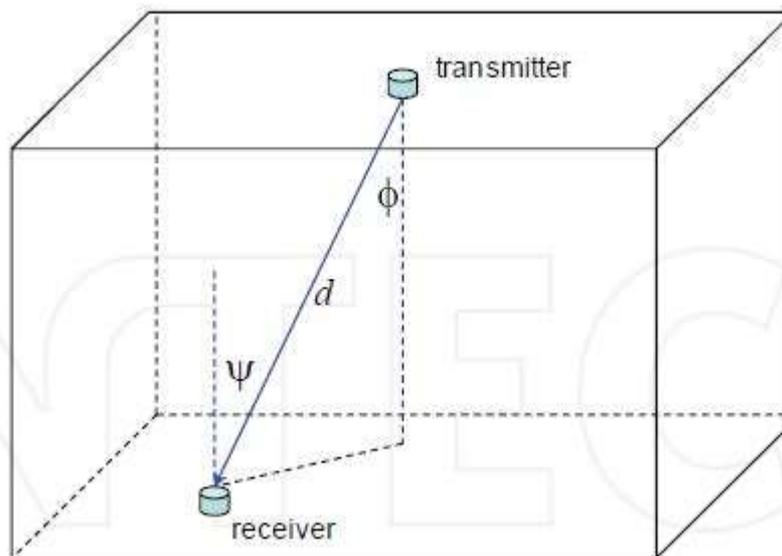


Figura 3-12. Ángulos sistema VLC [40].

La potencia óptica recibida, P_r , deriva de la potencia óptica transmitida, P_t , y viene dada por:

$$P_r = H(0)P_t \quad (3-12)$$

El espectro de potencia de un fotodetector tiene selectividad de longitud de onda, mientras que el filtro óptico paso de baja se puede diseñar con múltiples capas delgadas dieléctricas. Además, los LEDs blanco emiten luz en una amplia longitud de onda.

Como consecuencia, se puede usar la longitud de onda deseada con la cual la respuesta del fotodetector sea buena.

Por ejemplo, considérese el caso de tener un campo visual de 60° , el área de detección física del fotodetector de 1 cm^2 , el índice de refracción del concentrador óptico de 1,5. La eficiencia de conversión de O / E de un PD es de $0,53 \text{ A / W}$, y una relación de silicio del PD cuya sensibilidad máxima se supone que su longitud de onda está en el rango visible [49].

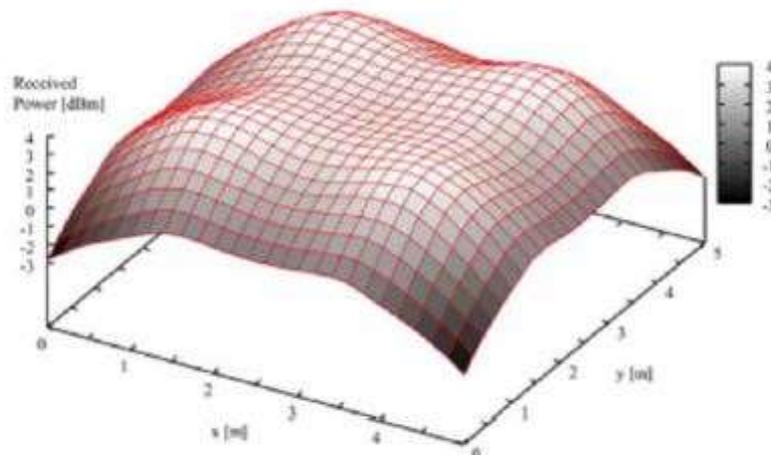


Figura 3-13. Potencia recibida de luz directa [49].

La Figura 3-13 muestra la distribución de la potencia recibida de la luz dirigida desde las luces LED. De esta figura, la potencia recibida es -2.8 a 4.0 dBm en todos los lugares de la habitación. La potencia recibida, que es mayor que la potencia emitida en comunicaciones por infrarrojos, hará posible la comunicación en banda ancha [49].

Potencia recibida de la luz reflejada

En este apartado, se va a analizar la potencia que llega a través del efecto refractivo de las paredes. La potencia recibida se da por la ganancia DC del canal en el camino directo $H_d(0)$ y en el reflejado $H_{ref}(0)$ [56].

$$P_r = \sum_{leds} \left\{ P_t \cdot H_d(0) + \int_{wall} P_t dH_{ref}(0) \right\} \quad (3-13)$$

La ganancia DC del canal en la primera reflexión es:

$$dH_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1) \cdot A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho dA_{wall} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & \text{si } 0 \leq \psi \leq \psi_e \\ 0 & \text{si } \psi > \psi_e \end{cases} \quad (3-14)$$

donde D_1 es la distancia entre el LED y el punto reflexivo y D_2 es la distancia entre el punto reflexivo y el receptor, ρ es el factor de reflexión, dA_{wall} es el área de la región refractiva, ψ es el ángulo de incidencia, α es el ángulo de irradiación al punto refractivo y β es el ángulo de irradiación al receptor.

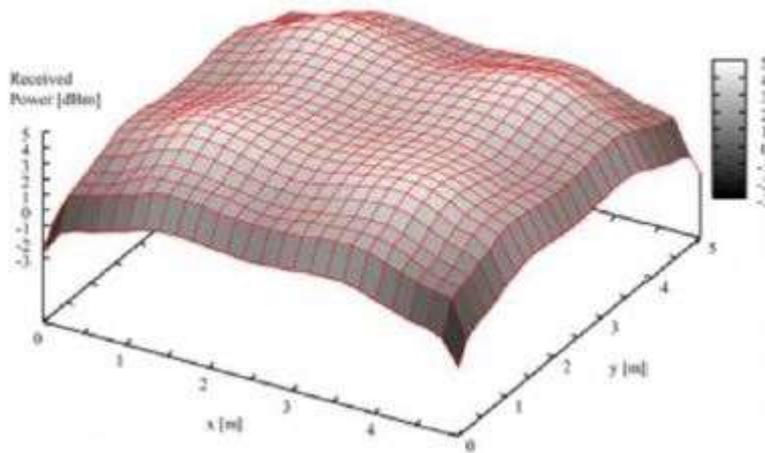


Figura 3-14. Distribución de potencia recibida [49].

La Figura 3-14 muestra la distribución de potencia recibida incluyendo la componente reflectiva. La potencia

recibida está entre -2,4 y 4,2 dBm en todos los lugares de la habitación. La potencia media recibida con reflexión es 0,5 dB mayor que la potencia media recibida directa, es decir, sin reflexión [49].

3.4 Receptor

En un sistema de comunicaciones ópticas, la función del receptor es transformar la señal óptica en una señal eléctrica.

Como existen muchos tipos de sensores, hay que encontrar cuáles son más adecuados para los sistemas de telecomunicaciones. Para ello, hay que analizar tanto la velocidad de respuesta como la sensibilidad. Estos dos parámetros se definirán posteriormente [57].

La velocidad de respuesta es el tiempo finito desde que se enciende una fuente de luz hasta que hay un valor constante de salida [58].

La sensibilidad determina la relación entre la salida del sensor ante una entrada determinada, se mide mediante la relación entre la salida y la potencia lumínica incidente. En general la sensibilidad aumenta en función de la superficie del sensor, sin embargo, la velocidad de respuesta disminuye [59].

En la Tabla 3-1 se muestra una comparación entre los distintos sensores que se pueden utilizar para un sistema VLC.

Tabla 3-1. Características fotodetectores [57].

	Foto- multiplicador	Foto- diodo	Foto- transistor	Célula Fotovoltaica	Foto- resistor	Fotosens o MSM
Velocidad de respuesta	Muy alta	Muy alta	Alta	Baja	Baja	Muy alta
Longitud de onda (µm)	0.2-0.4	0.2-2	0.4-1.1	0.4-0.7	0.4-0.7	0.4-0.8
Sensibilidad	Excelente	Muy alta	Alta	Alta	Baja	Alta
Rango Dinámico	Bueno	Excelente	Muy bueno	Bueno	Bueno	Muy Bueno
Estabilidad	Muy bueno	Muy bueno	Bueno	Pobre	Bueno	Muy bueno
Coste	Alto	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Bueno	Medio
Robustez	Pobre	Alto	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Tamaño	Grande	Pequeño	Pequeño	Pequeño	Pequeño	Medio

De las distintas tecnologías anteriores cualquiera se podría utilizar como fotosensor en el receptor de un sistema VLC, pero viendo las características de cada uno de ellos, se puede concretar cuál de ellos es el mejor para que el sistema sea igual o mejor que las redes domésticas actuales. Por ello, habría que descartar los fotosensores con velocidad de respuesta baja, es decir, la célula fotovoltaica y el fotorresistor. Sin embargo, estos se podrían considerar para aplicaciones que no necesiten un ancho de banda grande, o en otras palabras, una velocidad alta debido a su bajo coste.

Como se muestra en la tabla, las características de los fotomultiplicadores son muy deseables ya que presentan una velocidad de respuesta alta, y una sensibilidad excelente, pero su tamaño, fragilidad y alto coste hacen que no sea el fotosensor más deseado.

Los fototransistores tienen una velocidad de respuesta alta y además cuentan con la ganancia del propio transistor. El resto de las características le convierten en buena alternativa a los fotodiodos.

Los fotodiodos son los fotosensores más utilizados. Además de que las características que tienen son muy deseables, hay una gran variedad de ellos. Se pueden fabricar en distintos materiales y dependiendo de esto presentan diferente respuesta espectral. Los de silicio son los que mejor respuesta tienen en el rango visible además de tener un bajo coste. Los primeros fotodiodos se fabricaron con una unión P-N. Tras el desarrollo de esta industria, se llegó a una estructura más conveniente añadiendo un semiconductor intrínseco entre las capas P y N. Con esta estructura se consigue una mayor captación de fotones y una capacitancia menor, por lo tanto, tienen una mayor velocidad de respuesta y sensibilidad. Estos son conocidos como fotodiodos PIN [57].

Los fotodiodos de avalancha, también conocidos como APD (*Avalanche Photodiode*), tienen una estructura similar a los fotodiodos PIN pero optimizada para conseguir el efecto avalancha. Este efecto genera una ganancia interna, gracias a esto, se pueden medir niveles bajos de luz sin necesitar una etapa amplificadora. Como desventaja, se necesita una gran tensión en inversa para conseguir este efecto, lo que provoca ruido adicional y una salida no lineal.

Los fotosensores MSM (Metal- Semiconductor- Metal), también conocido como diodo Schottky, tienen una conversión de luz a corriente similar a los fotodiodos con la diferencia de que no tienen unión P-N. Tienen una capacitancia menor, lo que permite una mayor anchura de banda, en otras palabras, una velocidad de respuesta mayor; sin embargo, su estructura hace que su sensibilidad, comparando con los fotodiodos, sea baja.

Por lo tanto, de todas las opciones posibles, la más conveniente para estos sistemas son los fotodiodos. Posteriormente se desarrollará más el concepto.

El receptor VLC se compone de elementos de recepción ópticos que incluyen concentrador óptico y el filtro óptico, un fotodiodo, un amplificador, y el circuito de recuperación de la señal (CDR, *Clock and Data Recovery*), como se muestra en la Figura 3-15 [60].

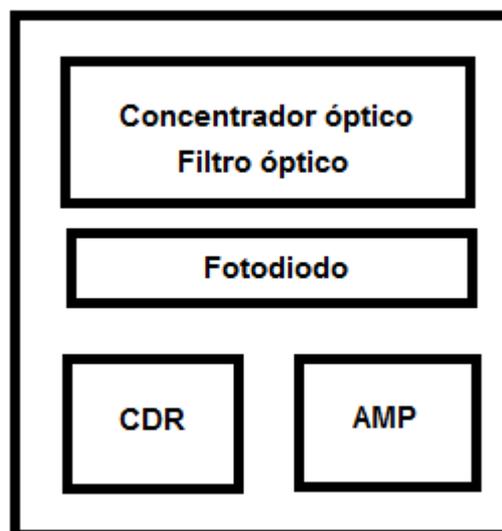


Figura 3-15. Receptor VLC.

Básicamente, el sistema VLC está diseñado para emplear la detección directa en el fotodiodo.

El concentrador óptico se utiliza para compensar la alta atenuación espacial debido a la divergencia del haz del LED que ilumina un área grande. Al utilizar un concentrador adecuado, el área de recogida eficaz puede aumentarse. Puesto que el rango de longitud de onda es diferente de la que tiene la comunicación por infrarrojos, los parámetros de diseño específicos para el sistema de VLC cambiarán con respecto a los parámetros que se utilizan para diseñar comunicación por infrarrojos.

El sistema de VLC es vulnerable a la luz del sol y otras iluminaciones, y por lo tanto, es importante emplear un filtro óptico apropiado para rechazar los componentes no deseados de ruido procedentes de otras fuentes de iluminación en la señal de datos recuperada.

Los fotodiodos con buena capacidad de respuesta a la luz visible son el fotodiodo de silicio de tipo PIN (PIN de Si-PD) y el fotodiodo de avalancha de silicio (Si APD). El material de silicio fotodiodo funciona a partir de 400 nm a 1200 nm, que incluye el intervalo de longitud de onda visible. Hay muchos fotodiodos cuyos anchos de banda de más de 200 MHz son mucho más amplios que los del transmisor LED de VLC [60].

-Hay varios tipos de circuitos de amplificación de la señal. Entre ellos, el amplificador de alta impedancia y el amplificador de transimpedancia se describen brevemente. La amplificación de alta impedancia es simple de implementar. La resistencia en serie está conectada con el ánodo del fotodiodo y el amplificador de alta impedancia de entrada detecta el voltaje a través de la resistencia serie y la amplifica. El amplificador de transimpedancia ofrece conversión de corriente a voltaje mediante el uso de resistencia de realimentación *shunt* alrededor de un amplificador inversor [60].

3.4.1 Fotodiodos

Un fotodiodo es un tipo de foto-detector capaz de convertir la luz en corriente o tensión, dependiendo del modo de funcionamiento.

Los fotodiodos son muy similares al diodo semiconductor común a excepción de una característica que los diferencia: es un dispositivo que conduce una cantidad de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que incide [61].

Esta corriente eléctrica fluye en sentido opuesto a la flecha del diodo y se llama corriente de fuga. El fotodiodo se puede utilizar como dispositivo detector de luz. Esto es posible gracias a que convierte la luz en electricidad y esta variación de electricidad es la que se utiliza para informar que hubo un cambio en el nivel de iluminación sobre el fotodiodo [61].

Muchos diodos diseñados para uso específicamente como un fotodiodo utilizan una unión PIN en lugar de una unión p-n. Los fotodiodos PIN mejoran la sensibilidad del dispositivo y aumenta la velocidad de respuesta. Un fotodiodo está diseñado para funcionar en polarización inversa. Si por el contrario el fotodiodo quedara conectado, de manera que por él circule la corriente en el sentido de la flecha (polarizado en sentido directo), la luz que lo incide no tendría efecto sobre él y se comportaría como un diodo semiconductor normal. La mayoría de los fotodiodos vienen equipados con una lente que concentra la cantidad de luz que incide, de manera que su reacción a la luz sea más evidente [62].

A diferencia de la fotorresistencia, el fotodiodo responde a los cambios de oscuridad a iluminación y viceversa con mucha más velocidad, y puede utilizarse en circuitos con tiempo de respuesta más pequeño. Si se combina un fotodiodo con un transistor bipolar, colocando el fotodiodo entre el colector y la base del transistor (con el cátodo del diodo apuntado al colector del transistor), se obtiene el circuito equivalente de un fototransistor [62].

3.4.1.1 Respuesta espectral

La magnitud de la fotocorriente generada por un fotodiodo depende la longitud de onda de la luz incidente. Los fotodiodos de silicio presentan una respuesta espectral que va desde la luz ultravioleta hasta la luz visible cercana a la región infrarroja. La respuesta espectral llega al máximo cerca de la región del infrarrojo entre 800 nm y 950 nm [60].

Los filtros ópticos también se pueden añadir para cambiar la respuesta espectral.

3.4.1.2 Sensibilidad radiométrica

Sensibilidad radiométrica (SR) es la relación entre la fotocorriente en cortocircuito generada por el fotodiodo dividida entre la energía de la luz incidente. Las curvas de esta medida de la sensibilidad a veces se representan con la SR normalizada para así mostrar la respuesta espectral relativa [62].

$$S_R = \frac{I_{SC}}{\phi}, \quad (3-15)$$

donde I_{SC} es la fotocorriente en cortocircuito medido en amperios, ϕ es el flujo radiante expresado en vatios y S_R es la sensibilidad radiométrica expresada en A/W.

3.4.1.3 Responsividad

La responsividad (Re) es una medida de sensibilidad que tiene en cuenta el área activa de un fotodiodo. Este parámetro se obtiene mediante la relación de la corriente en cortocircuito y la energía luminosa por unidad de área [63].

$$Re = \frac{I_{SC}}{E_e}, \quad (3-16)$$

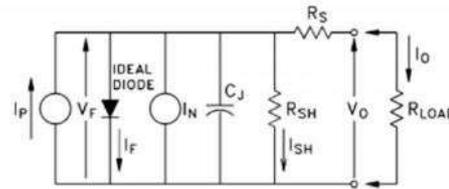
donde I_{SC} , está expresado en μA , E_e está expresado en $\mu W/cm^2$ y la Re en $[\mu A/(\mu W/cm^2)]$.

3.4.1.4 Sensibilidad

Uno de los métodos estándar utilizados para especificar la sensibilidad de un fotodiodo es manifestar su fotocorriente de cortocircuito (I_{SC}) a un nivel de luz emitida desde una fuente de luz bien definida. La fuente más utilizada es una lámpara de luz incandescente funcionando a una temperatura de color de 2850 K. Los fotodiodos tienen ganancia interna unidad. Con el objetivo de mejorar la sensibilidad a la luz se puede o aumentar el área activa del propio chip de fotodiodos o utilizar lentes para aumentar el área activa efectiva. La relación entre el área activa y la sensibilidad tiende a ser lineal: duplicando el área activa se duplica la corriente de salida [60].

3.4.1.5 Linealidad

A continuación se muestra el circuito equivalente de un fotodiodo. Aplicando polarización inversa, la fotocorriente se dividirá entre la unión interna o la resistencia de derivación y la resistencia de carga externa [60].



where

I_p = light generated photocurrent
 V_F = forward voltage drop across diode
 I_F = forward current through diode
 I_N = noise current
 C_J = junction capacitance
 R_{SH} = shunt resistance
 I_{SH} = shunt current
 R_S = series resistance
 V_O = output voltage
 I_O = output current

For an ideal photodiode, $R_S = 0$ and $R_{SH} = \text{infinity}$.

$$I_O = I_p - I_F$$

Figura 3-16. Linealidad de un fotodiodo.

3.4.1.6 Corriente oscura (ID)

La corriente oscura es la corriente de fuga que fluye cuando el fotodiodo está en Off, en otras palabras, en la oscuridad y se aplica una tensión inversa a través de la unión. Esta tensión se aplica a través de la unión. Esta tensión tiene un rango de valores muy amplio: puede ser tan baja como 10 mV o tan alta como 50 V y, por lo tanto, las corrientes oscuras variarán del orden de pA a μA , dependiendo de la zona de unión y el proceso utilizado.

La corriente oscura depende de la temperatura. Aproximadamente la corriente oscura tiende a aumentar el doble cada 10°C que aumenta la temperatura ambiente [60].

3.4.1.7 Resistencia de derivación (RSH)

La resistencia de derivación o resistencia dinámica de unión a tensión cero se determina mediante la aplicación de una pequeña tensión al fotodiodo, de aproximadamente 10 mV, y midiendo la corriente resultante. Los valores típicos de esta resistencia pueden oscilar entre 100 k Ω a 100 G Ω .

La resistencia de derivación depende de la zona activa del chip de diodo y en el tipo de procesamiento utilizado. También es dependiente de la temperatura, ya que el valor de la resistencia disminuye cuando aumenta la temperatura [60].

3.4.1.8 Condensador de Unión (CJ)

Una capacitancia se asocia con la región de saturación que existe en la unión P-N.

El tiempo de respuesta de un fotodiodo depende en gran medida del producto de la capacidad de la unión y de la resistencia de carga externa.

La capacidad de la unión aumenta al aumentar la zona de unión del fotodiodo.

Es también una función de cualquier tensión inversa aplicada a través del fotodiodo. Cuando se aplica tensión inversa a la capa se expandirá y la capacidad de unión por lo tanto disminuirá. La capacitancia continuará disminuyendo con el aumento de la tensión inversa aplicada hasta que la región de saturación se expanda, cuando la capacitancia del diodo se hace casi constante.

3.4.1.9 Tensión inversa *Breakdown* (VBR)

Esta es la máxima tensión inversa que se puede aplicar con seguridad a través del fotodiodo antes de que se produzca ruptura en la unión. El diodo no debe ser expuesto a VBR aunque sea por un corto período de tiempo ya que se puede producir un daño permanente. Los valores de VBR típicos para los fotodiodos están entre 5V y 100V [60].

3.4.1.10 Tiempo de respuesta

Un fotodiodo necesita una cierta cantidad de tiempo para responder a un cambio repentino en los niveles de la luz. Es una práctica común expresar el tiempo de respuesta en términos del tiempo de subida (t_R) y el tiempo de caída (t_F) donde [64]:

t_R = El tiempo requerido para que la salida aumente de 10% a 90% de su valor final.

t_F = El tiempo requerido para la salida caiga de 90 % a 10 % de su valor actual.

En la Figura 3-17 se representa el tiempo de subida de un fotodiodo, el tiempo de bajada se representaría igual pero a la inversa.

El tiempo de respuesta de un fotodiodo depende de muchos factores, entre ellos la longitud de onda de la luz, el valor de la tensión aplicada a través del diodo (ya que esto tiene un efecto importante de la capacidad de la unión), y la resistencia de carga. Las curvas características dadas con cada proceso muestran que el tiempo no saturado de respuesta en gran parte depende del producto de la capacidad de la unión y la resistencia de carga. Sin embargo, cuando este producto es pequeño, otros efectos se vuelven significativos y limitan el tiempo de respuesta.

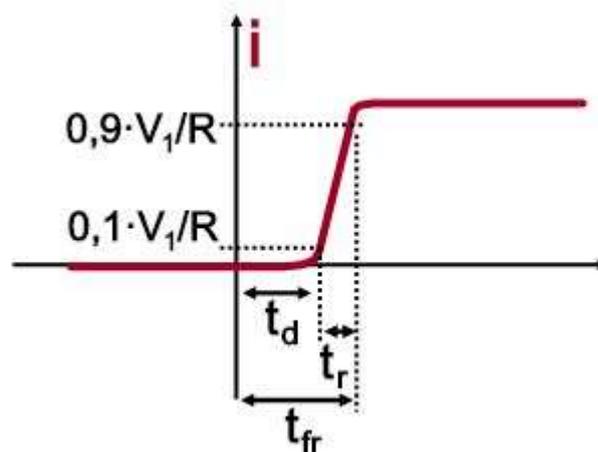


Figura 3-17. Tiempo de subida de un fotodiodo [65].

3.4.2 Fotodiodo PIN

Con el objetivo de mejorar la sensibilidad del fotodetector se suelen utilizar fotodiodos PIN, es decir, diodos formados por una capa de un semiconductor tipo p fuertemente dopado, un semiconductor intrínseco y una capa donde hay un fuerte dopado tipo n. La estructura de este fotodiodo se muestra en la Figura 3-18. Como se puede observar, el espesor de la zona p es estrecho con el objetivo de minimizar la absorción de la luz en esta zona, sin embargo, la región intrínseca es lo suficientemente ancha para que en ella se absorba prácticamente toda la luz. Gracias a esta estructura, se consiguen las siguientes ventajas respecto al fotodiodo de unión PN [66]:

- Mayor rango espectral de fotodetección.
- Además de mayor sensibilidad, mejor eficiencia.
- Mayor velocidad.

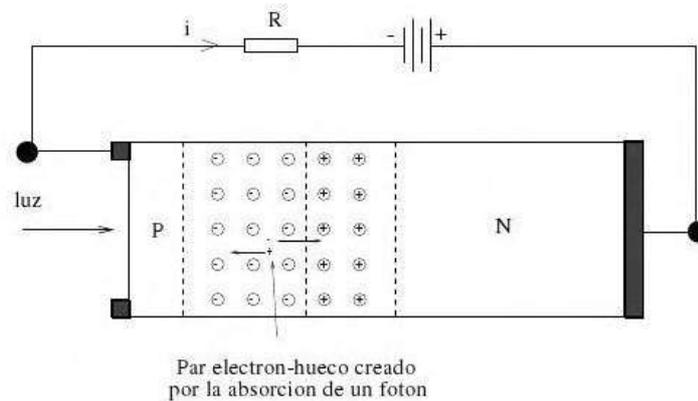


Figura 3-18. Estructura fotodiodo PIN [67].

El ensanchamiento de la zona de transición disminuye la capacitancia de la misma, con lo que la respuesta del dispositivo será más rápida por la reducción de la constante de tiempo RC. El tiempo de respuesta es del orden de decenas de picosegundos a un ancho de banda correspondiente de 50 GHz [68].

La corriente que llega al diodo es una corriente de circulación que toma un valor muy pequeño si la unión no está iluminada y será algo mayor si hay luz incidente. En este último caso, el pulso de luz que llega tiene una energía I_0 . Esta energía será la suma de la corriente eléctrica de los electrones, $i_n(t)$ y de los huecos, $i_p(t)$ fotodetectados en la zona de transición [68].

$$i_0(t) = i_n(t) + i_p(t) \quad (3-17)$$

Las tensiones de polarización inversas necesarias para que la región de carga espacial se extienda por toda la región intrínseca, como se puede ver en la Figura 3-18, son del orden de decenas de voltios.

Hay que tener en cuenta que cuando el fotodiodo PIN opera en modo fotoconductor tiene problemas para niveles de iluminación bajos. Esto es debido a que la corriente térmica generada es una fuente de ruido importante, mientras que para niveles de luz suficientes, esto no es problema y la respuesta es más rápida que si opera en modo fotovoltaico, que con menor corriente ofrece una buena sensibilidad a niveles bajos de luz. El inconveniente en este caso es la fotocorriente generada, que necesita una inmediata amplificación [68].

3.4.3 Fotodiodo de avalancha

Los fotodiodos PIN presentan importantes ventajas respecto a los fotodiodos de unión PN simple y los fotoconductores, pero no tienen ganancia interna.

Es por ello que surgió la idea de modificar la estructura de los PIN para así conseguir un efecto de ganancia interno. Esto es lo que originó el fotodiodo de avalancha.

Los fotodiodos de avalancha se utilizan en múltiples aplicaciones ya que ofrecen alta velocidad y alta sensibilidad inigualables por los fotodiodos PIN. Un APD ideal, tendría cero ruido oscuro, amplio espectro, una ganancia con un rango desde 1 a 10^6 , bajo coste y no tendría exceso de ruido. Simplificando, un APD sería un buen fotodiodo PIN con ganancia interna [68].

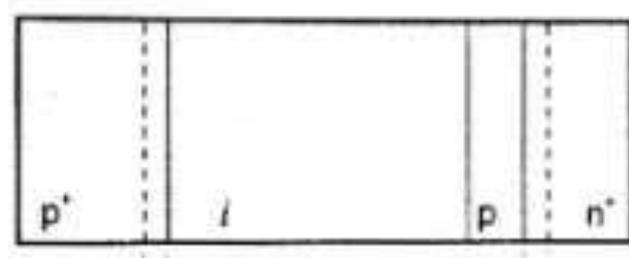


Figura 3-19. Estructura de un fotodetector APD [69].

La estructura de un APD consta de una región de absorción A, capa intrínseca, y una región de multiplicación M, zona PN^+ . En la región A hay presente un campo eléctrico E, que origina el efecto avalancha, que sirve para separar los huecos y electrones fotogenerados y barre las portadoras hacia la región PN^+ . Esta región A soporta un campo eléctrico bastante alto para proporcionar una ganancia interna por ionización. La ganancia interna generada tiene un valor de al menos 100 dB para APD de silicio o entre 10 y 40 dB para APD de germanio [70].

El funcionamiento es similar al de un PIN, exceptuando que cuando los portadores fotogenerados en la zona intrínseca llegan a la región PN^+ dopada se encuentran con el campo eléctrico y se origina el efecto avalancha, ampliando M veces la responsividad [70]:

$$R_{APD} = M \cdot R_{PIN} \quad (3-18)$$

El factor multiplicador depende de los coeficientes de ionización por impacto de electrones y huecos, α_n y α_p respectivamente y se expresa como:

$$M_{n,p} = \frac{(1 - K_{n,p})e^{\alpha_{n,p}W_a(1-K_{n,p})}}{1 - K_{n,p} \cdot e^{\alpha_{n,p}W_a(1-K_{n,p})}} \quad (3-19)$$

donde K_n y K_p son los coeficientes relativos de ionización por impacto, cuando la inyección en la zona de avalancha, es por electrones o por huecos y W_a es la anchura de la zona de avalancha.

3.4.4 Ruido en fotodetectores

En el proceso de fotodetección aparecen componentes de señal no deseadas, es decir, ruido. Las causas de este, en los fotodiodos, son la oscuridad, el ruido de fondo y el ruido *shot* y en los fotodiodos APD -además el efecto de avalancha también es causa de ruido [71].

Por lo tanto, se puede considerar que en esta etapa del sistema pueden aparecer los siguientes tipos de ruido:

- **Ruido de fondo:** Debido a que junto con la señal óptica deseada puede incidir otra no deseada o de fondo, que el fotodetector trata como deseada, dando lugar a una corriente media de valor I_{of} , esta tiene una variación aleatoria que constituye la señal de ruido i_{of} .

- **Ruido de oscuridad:** Si no existe radiación óptica incidente alguna, la corriente de salida del fotodetector será su corriente de polarización, I_p , que en realidad es la corriente inversa de saturación, que representa una componente alterna i_{os} aleatoria.
- **Ruido *shot* o de disparo:** Debida a que la fotogeneración es cuántica, en torno al valor de fotones detectados que corresponden a la señal óptica de valor medio I_o con una variación aleatoria que constituye la señal de ruido i_{sn} .

Los tres ruidos anteriores pueden ser interpretados como ruidos de disparo, y por lo tanto, sus valores cuadráticos medios son proporcionales al valor medio de la corriente fotodetectada y al ancho de banda considerado [71]:

$$\overline{i_{of}^2} = 2 \cdot q \cdot I_{of} \cdot B \quad (3-20)$$

$$\overline{i_{os}^2} = 2 \cdot q \cdot I_p \cdot B \quad (3-21)$$

$$\overline{i_{sh}^2} = 2 \cdot q \cdot I_o \cdot B \quad (3-22)$$

Si estos se producen conjuntamente, al ser aleatorios, se suman en potencia. Por lo tanto la potencia total de ruido se puede expresar:

$$\overline{i_{rt}^2} = \overline{i_{of}^2} + \overline{i_{os}^2} + \overline{i_{sh}^2} = 2 \cdot q \cdot B \cdot (I_{of} + I_p + I_o) = 2 \cdot q \cdot B \cdot I_T \quad (3-23)$$

Cuando el fotodetector es un APD, el ruido penetra en la zona de avalancha produciendo un exceso de ruido que se refleja mediante el factor F, resultando un ruido total a la salida del fotodetector:

$$\overline{i_{rt}^2} = 2 \cdot q \cdot B \cdot I_T \cdot M^2 \cdot F \quad (3-24)$$

Se puede tomar esta expresión como ruido general a la salida de un fotodetector, particularizándola en los fotodiodos PIN haciendo $M=1$ y $F=1$.

El factor de ruido F depende tanto del factor multiplicador, M, como de la relación de ionización, K. esta relación se muestra en la Figura 3-20.

De ella se observa que mientras menor sea la relación de ionización, menor será el factor de ruido, por lo tanto, lo que interesa es que la ionización por avalancha se realice por un solo tipo de portador. Además si K es lo suficientemente bajo, se puede conseguir que el factor de ruido apenas dependa del factor multiplicador, lo cual es bastante deseable.

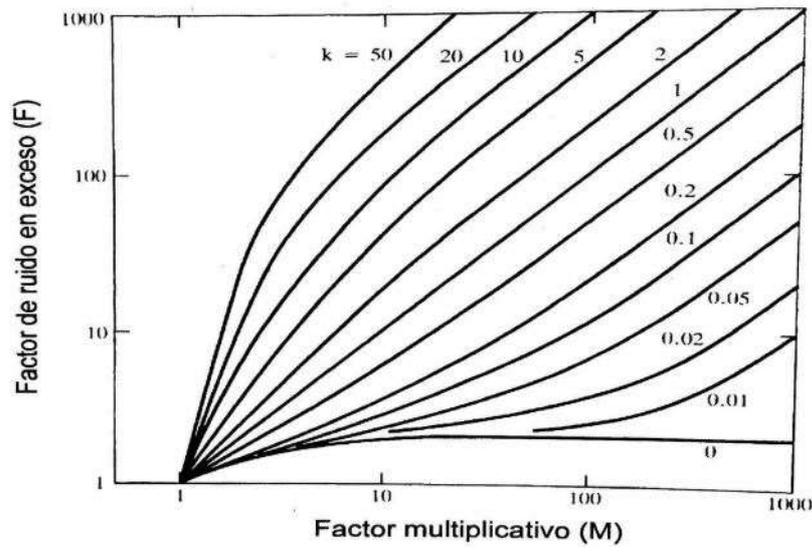


Figura 3-20. Dependencia del factor de ruido en un fotodetector APD [72]

En diodos fotodetectores se suele definir como figura de mérito la potencia equivalente de ruido, PER, que se define como el flujo o potencia óptica incidente para dar lugar a una respuesta igual a la detección estándar del ruido, es decir, la cantidad mínima de potencia óptica detectable. Se desea que el valor del PER sea lo más bajo posible ya que ello permitiría detectar señales ópticas con menores niveles de ruido.

En un diodo PIN, la expresión de esta es:

$$PER = P_0 = \frac{h \cdot c}{\eta \lambda} \cdot \sqrt{\frac{2(I_{of} + I_p + I_o)}{q}} \quad (3-25)$$

4 MODULACIONES EN LOS SISTEMAS VLC

Como ya se ha visto, VLC es una nueva tecnología prometedora en las infraestructuras por sistemas luminosos. Estos sistemas de comunicación no deberían interferir con los sistemas luminosos existentes. Para evitar estas interferencias el esquema de modulación debe tener un rango limitado para evitar el parpadeo y el efecto de atenuación.

La información de un sistema óptico puede ser transmitida de forma analógica o digital. La modulación analógica consiste en cambiar el nivel de luz de manera continua. El rendimiento en estos sistemas está limitado por el ruido aleatorio de sistema.

En cambio, en un sistema con modulación digital la información está codificada en una serie de pulsos donde la presencia o ausencia de pulsos representa un bit de información. La señal enviada no tiene por qué ser transmitida fielmente. Esto es debido a que los pulsos tienen que tener potencia suficiente para que el receptor determine la presencia o ausencia del pulso. Las señales digitales tienen la posibilidad de ser codificadas para la detección y corrección de errores [73].

Existen varios esquemas de codificación digital con distintas características como símbolos por bit, si permite sincronizar el reloj, ciclo de trabajo, etc. Para las comunicaciones por luz visible hay que tener tres consideraciones específicas en el momento de escoger el esquema de codificación, estas son [74]:

- Lo que se conoce como *flicker*, que se define como los cambios de intensidad percibidos por el ojo humano. Estos son molestos, reducen el confort visual y pueden llegar a causar dolor de cabeza. Como los rangos de frecuencias en los que se operan están por encima de los 200 Hz, el ojo humano no es capaz de ver el parpadeo cuando los impulsos luminosos tienen una frecuencia igual o mayor de 200 Hz. La intensidad media de la luz se soluciona gracias al tipo de modulación que se desarrollará a lo largo de este capítulo [75].
- También hay que tener en cuenta que hay que conseguir un buen rendimiento óptico de la fuente de luz.
- La capacidad de controlar la atenuación o *dimming*, ya que es una funcionalidad que los LEDs orientados a la iluminación ya implementan.

A continuación se van a desarrollar algunas de las modulaciones más utilizadas en las comunicaciones por luz visible

4.1 Modulación OOK

Este esquema es utilizado en gran cantidad de sistemas inalámbricos por comunicaciones ópticas. Como su propio nombre indica, es una modulación de encendido y de apagado. Se basa en la transmisión de la luz, cuando es mayor que la corriente umbral se está transmitiendo un “1” binario, por el contrario, cuando la emisión es nula, entonces se transmitirá un “0” binario.

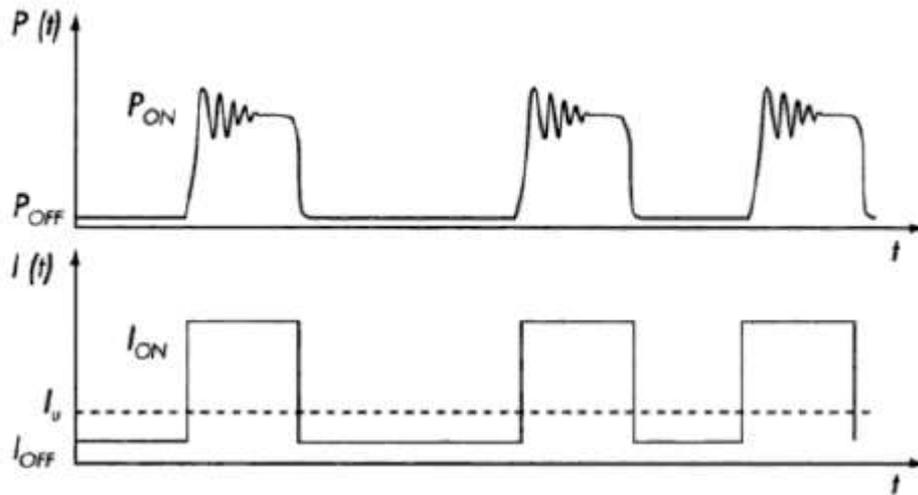


Figura 4-1. Modulación OOK [76].

La forma de onda básica del pulso $p(t)$ de la señal transmitida se describe como una serie infinita en el tiempo.

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k p(t - kT_b), \quad (4-1)$$

donde:

k : Número de LEDs.

a_k : Amplitud de la señal del LED k .

$p(t)$: Pulso rectangular.

T_b : Tiempo de bit.

Por esta razón, la emisión de 0's o 1's, este esquema de modulación sólo es capaz de modular con datos digitales. Como consecuencia, su eficiencia se reduce en el uso del ancho de banda.

Este esquema de modulación tiene un sencillo diseño y una implementación muy fácil. Esto implica un coste reducido, pero se encuentran algunas desventajas ya que es muy sensible a la presencia de interferencias por ruido eléctrico.

En las comunicaciones por luz visible se sugiere el uso con retorno a cero, lo que se conoce como pulso de Manchester. Este utiliza el doble de ancho de banda y gracias a ello se elimina el *flicker* provocado por largas series de unos y ceros, ya que la potencia media es constante [77].

4.1.1 BER OOK

OOK puede ser implementado con receptores de detección directa en los que la potencia óptica se convierte en señales electrónicas por un fotodetector. La tasa de conversión viene descrita por la responsividad del detector, R . La señal eléctrica resultante se denota, antes de la toma de decisiones, por y . El receptor integra las señales recibidas y la decisión de si se transmitió un "1" o un "0" depende del criterio dado. Se asume que el ruido electrónico, junto al ruido de fondo, es la fuente de ruido dominante y se modela por el ruido blanco aditivo que es estadísticamente independiente entre intervalos de tiempo. El ruido tiene media cero y covarianza de σ_1^2 y σ_0^2 para las señales "1" y "0", respectivamente. Después de la integración, las señales se describen mediante las siguientes densidades condicionales [78]:

$$P(y|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(y-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (4-2)$$

y

$$P(y|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(y-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (4-3)$$

En la siguiente sección, se analizan las fluctuaciones de sincronización y el *offset*. Por lo tanto, se va a reorganizar la expresión para la señal y el ruido de modo que la duración del bit/ símbolo, T, es parte de la señal. La señal está descrita por la raíz cuadrada de la energía, de manera que $\mu_1 = \eta_{Dimming} RP_1 \sqrt{T}$ y $\sigma_1^2 = \sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming} RP_1$ son la señal óptica recibida y la varianza estándar de ruido del receptor de acompañamiento respectivamente. Mientras que $\mu_0 = 0$ y $\sigma_0^2 = \sigma_{TH}^2$ son, respectivamente, la señal óptica recibida y la varianza estándar del ruido del receptor cuando no se recibe ninguna energía. P_1 es la potencia óptica, σ_{TH}^2 incluye el efecto del ruido térmico y el ruido de fondo y $\mu_{Dimming}$ es el factor de atenuación de la iluminación que además tiene un valor comprendido entre 0 y 1; $0 < \mu_{Dimming} \leq 1$.

El algoritmo de decisión en este caso está basado en el criterio MAP que mapea la señal recibida de acuerdo con lo siguiente [78]:

$$\hat{s} = MAX_S \left\{ \frac{P(y|s) P(s)}{P(y)} \right\} \quad (4-4)$$

donde $P(y|s)$ es la probabilidad condicional de que se reciba y si se transmite un bit s (de tomar uno o dos valores, 1 ó 0), $P(s)$ es la probabilidad a priori de que se transmita un 1 ó un 0 y $P(y)$ es la probabilidad a priori de y. El denominador es idéntico para todas las señales y por lo tanto no afecta a la decisión. En los sistemas de comunicación, las probabilidades de transmisión de bits de 1's y 0's son, en la mayoría de los casos, iguales, así que se puede utilizar el estimador de máxima verosimilitud, ML. En ese caso, la función de probabilidad viene dada por [78]:

$$\Lambda(y) = \frac{P(y|on)}{P(y|off)} = \quad (4-5)$$

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

En el caso de que $\sigma_{TH}^2 \gg 2q\eta_{Dimming}RP_1$ la ecuación 4-5 puede ser simplificada tomando logaritmo neperiano en ambos lados de la ecuación, cancelando factores comunes y reorganizando. Debido a la complejidad de esta expresión es común el uso de una aproximación de la probabilidad de error, BER, dada por:

$$BER \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\eta_{Dimming}RP_1\sqrt{T}}{\sqrt{\sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming}RP_1 + \sigma_1^2}} \right) \quad (4-6)$$

4.2 PWM Y PPM

Una técnica de modulación simple y fiable que es adecuada para comunicaciones ópticas es la modulación de impulsos. La modulación de impulsos es un tipo de sistema de comunicación de transmisión digital que es más resistente al ruido que la transmisión analógica. Además, los mensajes se representan de manera discreta, tanto en amplitud como en tiempo. Dos tipos de modulación de impulsos son modulación por ancho de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) y modulación por posición de pulso (PPM, *Pulse Position Modulation*). A pesar de que generalmente modulen datos digitales, ambos son capaces de modular datos analógicos. El principio de funcionamiento de estas modulaciones se ilustra en la Figura 4-2 [79].

En los esquemas PWM, el dato está representado por el ancho de banda del pulso, o dicho de otro modo por el *Duty Cycle*, representado por D. PWM al contrario que la modulación OOK, es capaz de modular datos analógicos. Por lo tanto, desde el punto de vista del ancho de banda, este esquema es más eficiente. Debido al hecho de que el ancho del pulso depende de los datos que son enviados, la potencia media transmitida variará, esto quiere decir que esta modulación puede causar un efecto de atenuación en la iluminación del sistema [80].

Sin embargo, en la modulación PPM, tanto la amplitud como el ancho del pulso son fijos. Esta técnica de modulación tiene un ancho de banda más eficiente. Como consecuencia de que el ancho de pulso sea constante, hará que la potencia media del LED sea constante, como resultado, el efecto de atenuación se minimiza comparando con PWM.

La modulación por ancho de pulsos, PWM de una señal es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo, D, de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para la cantidad de energía que se envía a una carga [81].

El ciclo de trabajo o *Duty Cycle* de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el periodo. Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T}, \quad (4-7)$$

donde

τ : El tiempo en que la función es positiva, es decir, el ancho de pulso.

T: Periodo de la función.

En esta técnica de modulación, como se ha visto, el dato es representado por la posición del pulso, donde el ancho de banda de éste está fijado. Variando la posición del pulso es posible modular datos analógicos, lo que

le hace más eficiente en ancho de banda comparándolo con la modulación OOK [81].

La Figura 4-2 (a) y (b) muestra la forma de la información de la señal en forma analógica y el pulso de muestreo, respectivamente. Las señales PWM y PPM son digitalizadas, por lo tanto tienen amplitud constante, representada en la Figura 4-2 por v_A . En PWM, el ancho de pulso en alto nivel es proporcional a la amplitud de la señal analógica muestreada. Cuanto mayor sea la amplitud de la señal analógica, mayor es el ciclo de trabajo. A diferencia de PWM que tiene impulsos con diferentes del ciclo de trabajo, la señal PPM tiene un pulso con un ciclo de trabajo constante. La amplitud muestreada de la señal analógica se asigna a la posición del pulso dentro de un intervalo de tiempo prescrito. En la Figura 4-2, los intervalos de tiempo para el pulso PPM es t_s . Cuanto mayor sea la amplitud de la señal analógica muestreada entonces la posición de pulso PPM se encuentra más a la derecha en el intervalo de tiempo. Variando el ciclo de trabajo en PWM surge el problema de la función de iluminación del LED. El valor medio de la tensión de un pulso PWM cambiará en cada ciclo de trabajo [79].

$$\bar{v}_{PWM} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt, \quad (4-8)$$

$$\bar{v}_{PWM} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} v_{high}(t) dt + \int_{DT}^T v_{low}(t) dt \right) \quad (4-9)$$

Como la señal PWM es una señal digital, entonces, $v_{high} = v_A$ y $v_{low} = 0$, por lo tanto:

$$\bar{v}_{PWM} = D v_A \quad (4-10)$$

De acuerdo con la ecuación 4-10, el valor medio de la tensión del pulso PWM dependerá del ciclo de trabajo variable. Esto significa que en el intervalo uno, el valor medio de la tensión será $D_1 v_A$, en el segundo intervalo $D_2 v_A$, y así sucesivamente. Como el valor del ciclo de trabajo varía dependiendo del valor de la señal, esto provocará que la intensidad del LED también cambie. Por lo tanto, al no ser constante el valor medio de la tensión, se provoca un efecto de atenuación en la iluminación del sistema. Este efecto causa malestar en el ojo humano y debe ser minimizado [79].

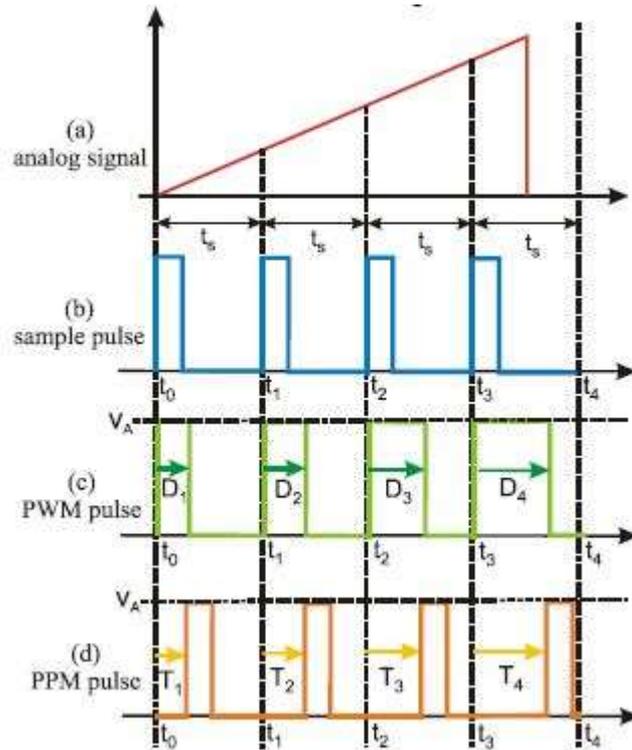


Figura 4-2. Esquemas modulaciones PWM y PPM [79].

A diferencia de PWM que varía su ciclo de trabajo, PPM tiene un ciclo de trabajo fijo. De acuerdo con (4-10), la tensión media de PPM siempre se mantendrá en todos los intervalos de tiempo porque la amplitud y el ciclo de trabajo son siempre constantes. En otras palabras, los datos transmitidos no afectarán a la tensión de LED. Se puede concluir que la intensidad de la luz LED tenderá a ser constante y no fluctúa como PWM.

4.2.1 PPM

La modulación por posición de pulso es un modo de modulación en el que M bits son codificados para transmitir un pulso de duración $T_C = T/2^M$ en uno de los 2^M posiciones posibles en un intervalo de tiempo de T segundos, que es la duración del símbolo.

Este esquema se repite cada T segundos, por lo tanto, la tasa de transmisión es M/T bits por segundo. La atenuación de la luz se lleva a cabo mediante la reducción de la potencia transmitida de acuerdo con el porcentaje requerido de atenuación.

Uno de los esquemas sugeridos es el esquema 4-PPM. En este esquema se representa cada pareja de bits por la posición de pulso en cuatro posiciones posibles como se aprecia en la Figura 4-3 [81].

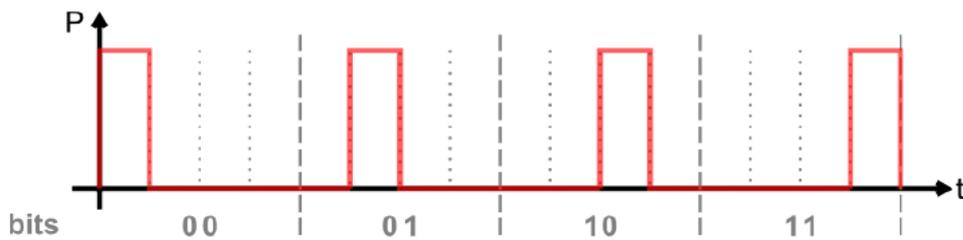


Figura 4-3. Modulación PPM [81].

Gracias a estos esquemas, como la potencia media es constante, se evitan las variaciones en la intensidad, pero para ello se necesita una buena sincronización. Este error se puede solucionar a través de la modulación por posición de pulso diferencial, D-PPM. Esto se lleva a cabo codificando cada pulso en relación al anterior, de tal modo que en el receptor se mide el tiempo entre pulsos.

4.2.2 PPM BER

La modulación por posición de pulso es una forma de modulación por intensidad que puede ser implementada con recepción de detección directa donde la potencia óptica es convertida en la señal electrónica por medio de un fotodetector. La señal electrónica resultante, antes de la decisión, viene dada por y_i , donde $i \in \{0, 1, \dots, 2^M - 1\}$. El receptor integra las señales recibidas en cada una de las 2^M . Se asume que el ruido electrónico junto al ruido de fondo es la fuente de ruido dominante cuando se ha recibido un 0, mientras que cuando se ha recibido un 1, la fuente de ruido dominante la conforman el ruido *shot*, junto con el ruido electrónico y el ruido de fondo. En ambos casos, el ruido se modela como ruido blanco gaussiano aditivo que es estadísticamente independiente entre intervalos de tiempos. El ruido tiene media 0 y covarianza σ_1^2 y $\sigma_{0_i}^2$ para 1 y 0 respectivamente. Tras la integración, las señales y_i se describen mediante las siguientes densidades condicionales [82]:

$$P(y_0 | "1") = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(y_0 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (4-11)$$

y

$$P(y_0 | "0") = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{0_i}} e^{-\frac{(y_0 - \mu_{0_i})^2}{2\sigma_{0_i}^2}}, \quad i \in \{1, \dots, 2^M - 1\}, \quad (4-12)$$

donde $\mu_1 = \eta_{Dimming} R P_1 \sqrt{T}$ y $\sigma_1^2 = \sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming} R P_1$ son la señal óptica recibida y la varianza estándar de ruido del receptor cuando se transmite un 1, respectivamente. Mientras que $\mu_{0_i} = 0$ y $\sigma_{0_i}^2 = \sigma_{TH}^2$ son, respectivamente, la señal óptica recibida y la varianza estándar del ruido del receptor cuando no se recibe ninguna energía. R es la responsividad del fotodetector, P_1 es la potencia óptica, σ_{TH}^2 incluye el efecto del ruido térmico y el ruido de fondo y $\mu_{Dimming}$ es el factor de atenuación de la iluminación que además tiene un valor comprendido entre 0 y 1; $0 < \mu_{Dimming} \leq 1$.

Al final del periodo de integración, el receptor compara los resultados de las 2^M integraciones y toma la decisión, eligiendo el tramo que tenga mayor valor. El algoritmo de decisión calcula los índices de los valores mínimos de la señal vector, que se describe matemáticamente por la función $[J, B] = \text{máx}(A)$. Esta función encuentra los índices de los valores máximos de A y los devuelve en el vector J , mientras que B es el elemento más grande de A . A viene dado por el vector $A = [\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{2^M - 1}]$. El cálculo de la BER puede ser muy sencillo si se calcula primero la probabilidad de la decisión correcta. La decisión correcta se calcula examinando la amplitud de la señal recibida en un rango de menos infinito a infinito. Para cada valor en este rango, se calcula la probabilidad de que la señal recibida en un intervalo de tiempo sea mayor que los valores de las señales en los otros intervalos de tiempo. Por lo tanto, si le restamos a uno la probabilidad correcta calculada, se obtendrá el valor de la probabilidad de error. También se asume que todas las y_i para $i > 1$ son procesos aleatorios idéntica e independientemente distribuidas, así que se representan con la función de densidad siguiente [82]:

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{0_i}} e^{-\frac{(y-\mu_{0_i})^2}{2\sigma_{0_i}^2}} \quad (4-12)$$

En este caso la BER viene dada por la siguiente expresión:

$$BER = \frac{2^{M-1}}{2^M - 1} \cdot \left[1 - \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \left(\int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{0_i}} e^{-\frac{(y-\mu_{0_i})^2}{2\sigma_{0_i}^2}} dy \right)^{2M-1} dx \right] \right] \quad (4-13)$$

El término $2M-1/(2M-1)$ se utiliza para convertir la tasa de error de símbolo. Empleando la función error, definida como $\text{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$, se obtiene la siguiente expresión de la BER [82].

$$BER = \frac{2^{M-1}}{2^M - 1} \left[1 - \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \left(1 + \text{erfc} \left(\frac{x - \mu_{0_i}}{\sqrt{2}\sigma_{0_i}} \right)^{2M-1} \right) \right] \right] \quad (4-14)$$

4.3 IPPM

La modulación por posición de pulsos inversa (IPPM, *Inversed Pulse Position Modulation*) es una forma de modulación en la cual los pulsos son codificados entre los 2^M estados posibles de forma que se transmite potencia en un instante de tiempo T_S , a excepción de un hueco cuya duración será de $T_C=T/2^M$. Este esquema se repite cada T segundos, así que la tasa de transmisión de bits es de M/T bits por segundo. La atenuación de la luz se implementa reduciendo la potencia de pulso transmitido, de acuerdo con el porcentaje de atenuación requerido [83].

Con esta modulación se consigue una mejora en la iluminación ya que se invierte el estado alto y bajo de los pulsos como se muestra en la Figura 4-4.

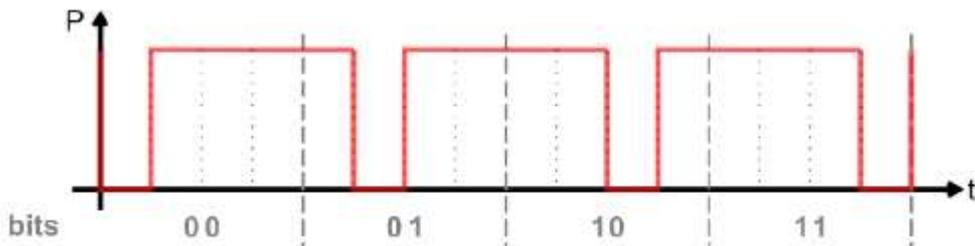


Figura 4-4. Esquema modulación IPPM [81].

4.3.1 IPPM BER

La modulación por posición de pulsos inversa o IPPM es un modo de modulación por intensidad, el cual puede ser implementado con receptores de detección directa en los que la potencia óptica es convertida en señales electrónicas por medio de un fotodetector, como ocurre en las modulaciones OOK y PPM. La señal eléctrica resultante, antes de que se tome la decisión, está dada por y_i donde $i \in \{0,1,\dots,2^M-1\}$. El receptor integra las señales recibidas en cada una de las 2^M posibles casos. Al final de la integración, el

receptor toma una decisión en función del resultado de las 2^M integraciones, comparando los resultados, el que tenga menor valor. Se asume que el ruido electrónico junto al ruido de fondo es la fuente de ruido dominante cuando durante la transmisión de un hueco y, en el caso de la transmisión de una señal, se considerará que la fuente de ruido dominante está conformada por el ruido *shot* junto al ruido electrónico y el de fondo. En ambos casos, se puede modelar como un ruido blanco gaussiano aditivo estadísticamente independiente entre intervalos de tiempo. El ruido tiene media cero y covarianzas σ_y^2 y σ_0^2 para la señal y el hueco, respectivamente. Después de la integración las señales x e y_0 se describen por las siguientes expresiones de densidad [84]:

$$P(y_0|"hole") = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(y_0-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (4-15)$$

y

$$P(y_i|"signal") = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(y_i-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad i \in \{1, \dots, 2^M - 1\}, \quad (4-16)$$

donde $\mu_i = \eta_{Dimming} RP_1 \sqrt{T_C}$ y $\sigma_i^2 = \sigma_{TH}^2 + 2q\eta_{Dimming} RP_1$ son la señal óptica recibida y la varianza estándar de ruido del receptor cuando se transmite un 1, respectivamente. Mientras que $\mu_0 = 0$ y $\sigma_0^2 = \sigma_{TH}^2$ son, respectivamente, la señal óptica recibida y la varianza estándar del ruido del receptor cuando no se recibe ninguna energía. R es la responsividad del fotodetector, P_1 es la potencia óptica, σ_{TH} incluye el efecto del ruido térmico y el ruido de fondo y $\mu_{Dimming}$ es el factor de atenuación de la iluminación que además tiene un valor comprendido entre 0 y 1; $0 < \mu_{Dimming} \leq 1$.

La algoritmo de decisión calcula el valor mínimo del vector de la señal que viene dado por la función matemática $[J, B] = \min(A)$. Esta función encuentra los índices de valores mínimos de A y los devuelve en el vector de salida J , mientras que B es el menor elemento del vector A , $A = [\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{2^M-1}]$. El cálculo de la probabilidad de error se hace igual que en la modulación PPM, calculando primero la probabilidad correcta, ya que así es más sencillo [84].

En este caso la BER viene dada por la siguiente expresión:

$$BER = \frac{2^{M-1}}{2^M - 1} \cdot \left[1 - \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} \left(\int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(y-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} dy \right)^{2^M-1} dx \right] \right] \quad (4-16)$$

4.4 VPPM

La modulación por posición de pulso variable (VPPM, *Variable Pulse Position Modulation*) es una forma de modulación de la señal en el cual el bit de mensaje se codifica transmitiendo un pulso al principio de la señal si se quiere transmitir un "0" y al final de la señal si se quiere transmitir un "1", como se muestra en la Figura 4-5. La duración del pulso está determinada de acuerdo con el porcentaje de la iluminación requerida. La principal ventaja de este método es que la comunicación no se ve afectada por un cambio en la cantidad de iluminación. Este esquema se repite cada T segundos, por lo tanto la tasa de transmisión es $1/T$ bits por segundos [83].

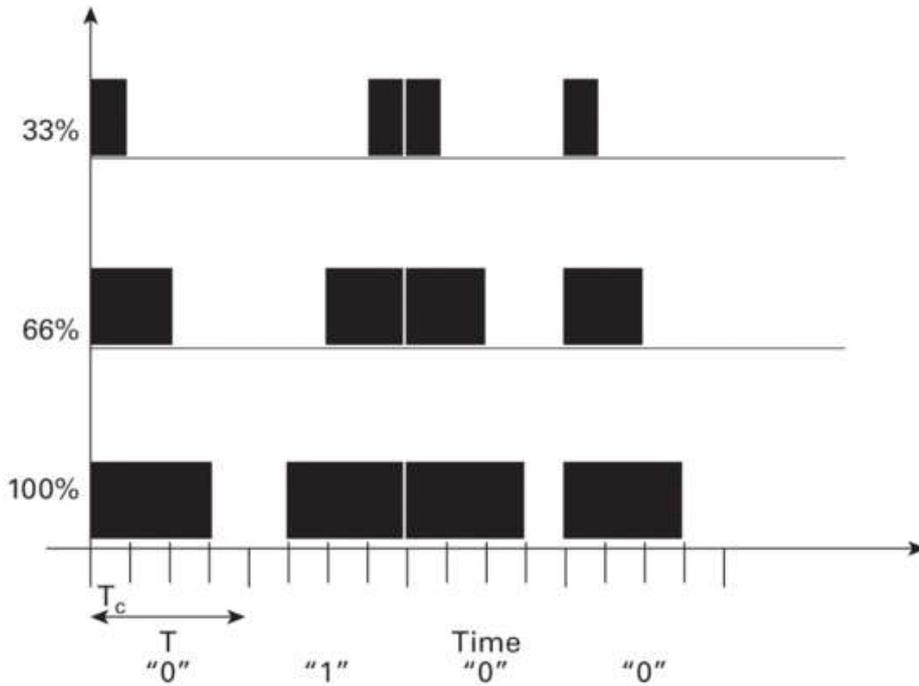


Figura 4-5. Modulación VPPM [83].

4.4.1 BER VPPM

VPPM es un modo de modulación de la intensidad de la señal, el cual puede ser interpretado como una combinación de PWM (modulación por ancho de pulso) que se usa para controlar la iluminación e IPPM (modulación por posición de pulso invertida) que son receptores de detección directa en los que la potencia óptica se convierte en señal electrónica por medio del fotodetector. La señal eléctrica resultante, antes de que se tome la decisión, viene dada por y . El receptor integra las señales recibidas en el primer y último intervalo de símbolo. Al final del periodo de integración, el receptor decide qué intervalo tiene mayor valor. Se asume que el ruido electrónico junto al ruido de fondo es el ruido dominante cuando no se transmite potencia y que la fuente de ruido dominante es el ruido *shot* de la señal junto al ruido de fondo y al eléctrico en otro caso. En ambos casos el ruido se puede modelar como ruido blanco gaussiano aditivo que es estadísticamente independiente entre intervalos de tiempos. El ruido tiene media 0 y covarianzas σ_i^2 y σ_0^2 para señal y el hueco respectivamente. Tras la integración de la señal y , se describe con las siguientes densidades condicionales [85]:

$$P(y|left_slot) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} e^{-\frac{(y-\mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} \tag{4-17}$$

y

$$P(y|right_slot) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} e^{-\frac{(y-\mu_R)^2}{2\sigma_R^2}} \tag{4-18}$$

Cuando se transmite un “1”, $\mu_R = RP_L\sqrt{T_C}$ y $\sigma_R^2 = \sigma_{TH}^2 + 2qRP_1$ y $\mu_L = 0$ y $\sigma_L^2 = \sigma_{TH}^2$ son la señal óptica recibida y la varianza estándar de ruido del receptor respectivamente para el intervalo derecho e izquierdo. Cuando se transmite un “0”, $\mu_L = RP_L\sqrt{T_C}$ y $\sigma_L^2 = \sigma_{TH}^2 + 2qRP_1$ y $\mu_R = 0$ y $\sigma_R^2 = \sigma_{TH}^2$ son la

señal óptica recibida y la varianza estándar de ruido del receptor respectivamente para el intervalo derecho e izquierdo [85].

$$BER = \left[\left(1 - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} e^{-\frac{(y_R - \mu_R)^2}{2\sigma_R^2}} \cdot \int_{-\infty}^{y_R} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} e^{-\frac{(y_L - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} \cdot \right) \Big|_{"1"} dy_R \right. \\ \left. \left(1 - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} e^{-\frac{(y_L - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} \cdot \int_{-\infty}^{y_L} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} e^{-\frac{(y_R - \mu_R)^2}{2\sigma_R^2}} \cdot \right) \Big|_{"0"} dy_L \right] \quad (4-19)$$

Esta ecuación se simplifica como:

$$BER = \left[1 - \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{TH}^2 + 2qRP_1)}} e^{-\frac{(x - RP_1\sqrt{T})^2}{2(\sigma_{TH}^2 + 2qRP_1)}} \left(1 + \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2\sigma_{TH}^2}} \right) \right) \right] \right] \quad (4-20)$$

4.5 OFDM

Muchas aplicaciones de VLC basan sus principios en sistemas de multiplexión por división de frecuencia ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). En estos sistemas, como se muestra en la Figura 4-6, la información se transmite en ráfagas de bits paralelos y produce una optimización del ancho de banda, por lo tanto, se crean sistemas más eficientes y con mejor velocidad de emisión y recepción de información.

La característica principal de este sistema es el envío de un conjunto de ondas portadoras de información a diferentes frecuencias. Normalmente se modula con QAM o PSK. Como se trabaja en tiempo discreto, se pasa del dominio de frecuencia al dominio de tiempo.

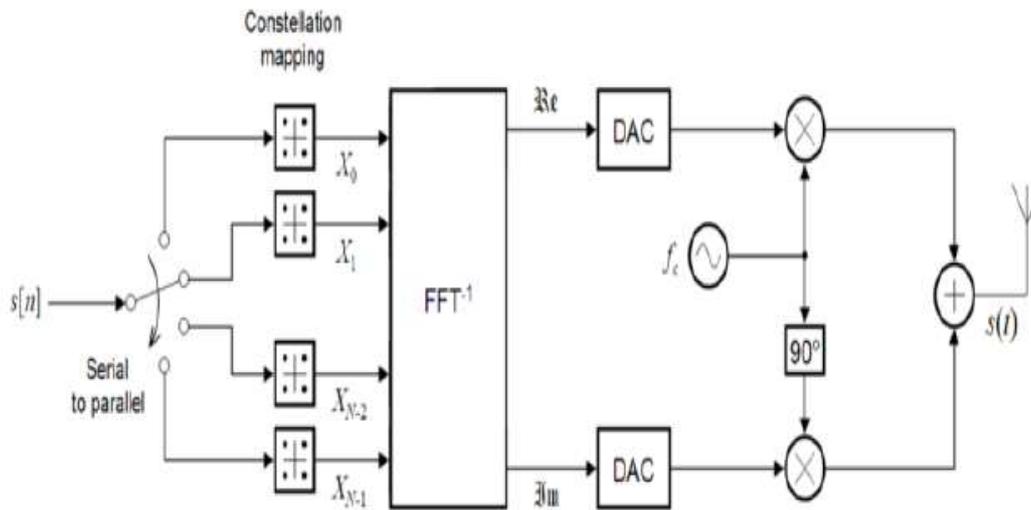


Figura 4-6. Esquema OFDM [86].

4.5.1 Modulaci3n QAM

La modulaci3n por amplitud de cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) varía tanto la amplitud como la fase. El flujo de datos está compuesto por M símbolos, cada uno compuesto por k bits del flujo de entrada. Por lo tanto, la constelaci3n está formada por $M=2^k$ símbolos, estos están equiespaciados unos de otros.

Cada componente QAM está formada por una componente real, $a(n)$ y una componente imaginaria, $b(n)$, y de esta forma se puede variar tanto la amplitud como la fase obteniendo la siguiente expresi3n [87]:

$$(4-21)$$

$$d(n) = a(n) + jb(n) =$$

$$= a(n) \cdot \cos(\omega t) + jb(n) \cdot \text{sen}(\omega t)$$

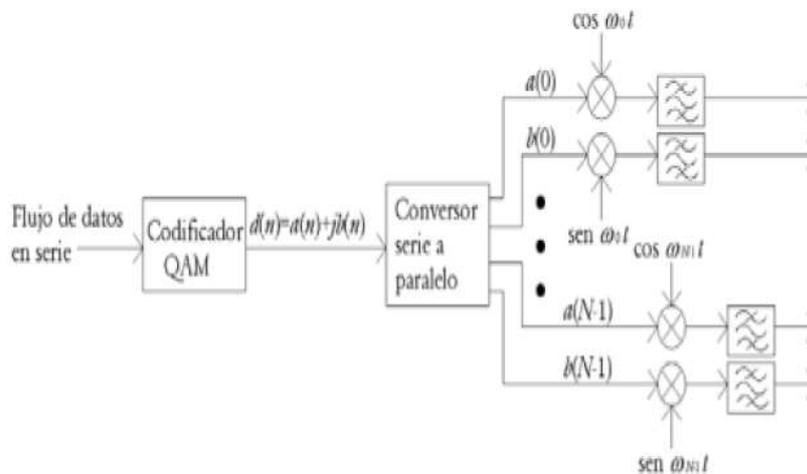


Figura 4-7. Modulaci3n QAM [86].

El funcionamiento de esta modulaci3n se basa en la transmisi3n de dos mensajes individuales, la componente en fase y la componente en cuadratura, xI y xQ respectivamente, dando lugar a la envolvente compleja, por un único camino. Esto se consigue modulando una misma portadora desfasada 90° entre los dos mensajes. Esto supone la formaci3n de dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda, por lo tanto se consigue una mejora en la eficiencia del ancho de banda [88].

4.5.2 Modulaci3n QPSK

La modulaci3n por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase-Shift Keying*), es una forma de modulaci3n en la que varía la fase. Está conformada por cuatro símbolos, y por lo tanto, cada símbolo está compuesto por dos bits. Como su propio nombre indica, está en cuadratura. Esto se debe a que cada uno de los símbolos está separado por 90° con respecto al anterior como se muestra en la Figura 4-8.

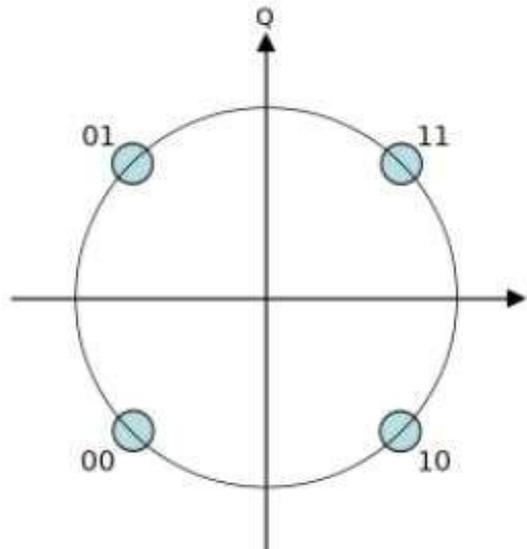


Figura 4-8. Constelación QPSK [89].

Los símbolos en esta modulación suelen seguir la codificación de Gray, cuya característica principal es cambiar un solo bit símbolo entre símbolos adyacentes. Con esto se consigue que la tasa de error por bit sea menor.

La modulación de una QPSK se puede generar combinando dos señales BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*) en cuadratura. En esencia, un modulador de QPSK son dos moduladores, de BPSK, combinados en paralelo [89].

$$V_{QPSK}(T) = I \cdot \cos(\omega_c t) + Q \cdot \sin(\omega_c t), \tag{4-22}$$

donde, I son los datos de la BPSK en fase y Q los dato de la BPSK en fase en cuadratura.

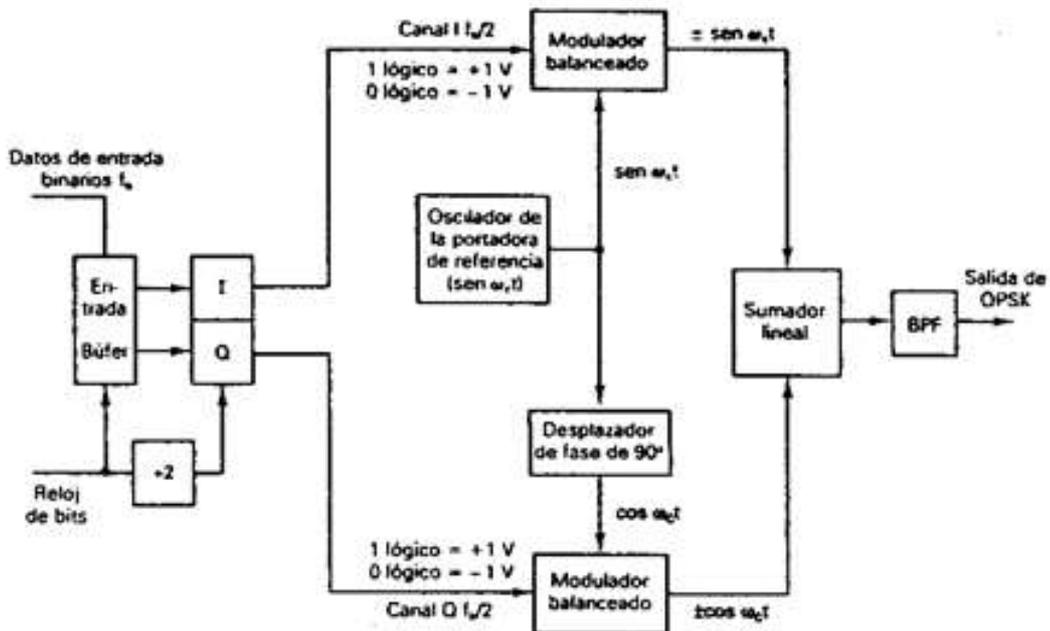


Figura 4-9. Esquema QPSK [90].

Como esta modulación sigue una codificación Gray, dependiendo de la variación de los bits se puede establecer el desfase [91]:

- Si los datos de un periodo al siguiente no han cambiado, la fase de la portadora no cambia.
- Si hay un cambio de un bit, la portadora es desfasada 90°.
- Si por el contrario, han cambiado los dos bits, la portadora sufrirá un desfase de 180°.

Con esta modulación se consigue una reducción del consumo de potencia y del ancho de banda, por lo tanto, hace que sea bastante eficiente.

4.5.3 Sistema de comunicación óptico inalámbrico

Los sistemas de comunicación óptico inalámbrico son también llamados comunicaciones 5G ya que transmiten gran cantidad de información a muy alta velocidad y sin que haya interferencias entre frecuencias, como pasa en los equipos que trabajan en el espectro de radiofrecuencia donde no se puede trabajar con equipos RF.

Para realizar estos sistemas se incorpora OFDM con el fin de conseguir mejoras en la velocidad de transmisión en paralelo y además combatir la interferencia entre símbolos o ISI. En la etapa de recepción se implementan ecualizadores para recuperar la información y obtener menor tasa de error de bit [92].

Es típico que este tipo de señales se module mediante modulación por intensidad y detección directa (IM/DD). Estas emplean receptores de detección directa, por lo tanto, la modulación sólo se le aplica a la potencia, en otras palabras, a la intensidad luminosa. Con este esquema las señales transmitidas deben ser reales y no negativas. Los sistemas que utilizan multiplexación por división de frecuencia producen una salida bipolar y compleja. Por lo tanto se tiene que convertir en una señal unipolar, es decir unas señales con los valores positivos y reales para así ser transmitidos por los componentes ópticos. Para ello se originó la multiplexación por división de frecuencia ortogonal óptica, O-OFDM.

O-OFDM se clasifica en dos grandes grupos, OFDM óptica asimétricamente recortada, ACO-OFDM (*Asymmetrically Clipped Optical OFDM*) y DC sesgada OFDM óptica, DCO-OFDM (*DC Biased Optical OFDM*). Hay otro grupo que es una combinación de estos dos, ADO-OFDM. Transmite simultáneamente ACO-OFDM en las subportadoras impares y DCO-OFDM en las pares [92].

4.5.3.1 ACO-OFDM (OFDM óptico simétrico recortado)

Para obtener una señal real y positiva a la salida del transmisor, habrá que modificar el procedimiento con respecto a las modulaciones QAM y QPSK en OFDM, ya que las salidas de estos dos sistemas son bipolares. Esto se consigue mediante las propiedades de la Transformada Rápida de Fourier [93].

Utilizar la simetría hermítica, implica formar un nuevo vector a continuación del original con los complejos conjugados de los valores obtenidos a la salida de un modulador QAM. Con estos dos vectores se trabaja con las propiedades de la transformada de Fourier: se introduce cero en las posiciones pares del vector $S(k)$ y en las posiciones impares los valores de la modulación QAM o QPSK.

$$S(k) = [0, x(k), \dots, x^*(N - k)] \quad k = 1, 3, \dots, N/2 - 1, \quad (4-23)$$

donde $x(k)$ son los valores obtenidos de la modulación QAM o QPSK y $x^*(N-k)$ son los valores complejos conjugados de $x(k)$.

Tras la salida de la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT, *Inverse FFT*) se tendrá la primera condición, todos los valores del vector $S(k)$ son reales. Para conseguir la segunda condición, que los valores sean positivos, se aplica el recorte asimétrico (ACO). Con ello se eliminan las componentes negativas que se tiene a la salida de IFFT, y que gracias a la simetría hermítica, no haya pérdida de información, ya que estos valores se repiten de modo positivo en la segunda parte del vector. [93]

4.5.3.1.1 U-OFDM

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal uniforme (U-OFDM) es una variante de ACO-OFDM. El proceso es similar al anterior hasta la salida que produce la IFFT. Si la salida tiene una muestra positiva, se forma un nuevo vector en el que en la primera posición se tendrá el valor activo y en la segunda posición se tendrá el valor inactivo. Si, por el contrario, a la salida el valor fuese negativo, primero se pondría el valor inactivo y en segundo lugar el valor inactivo. Se conoce como valor activo al valor absoluto de las muestras a la salida de la transformada de Fourier inversa, e inactivo a muestras con valor 0. En la Figura 4-10 se muestra un ejemplo [93].

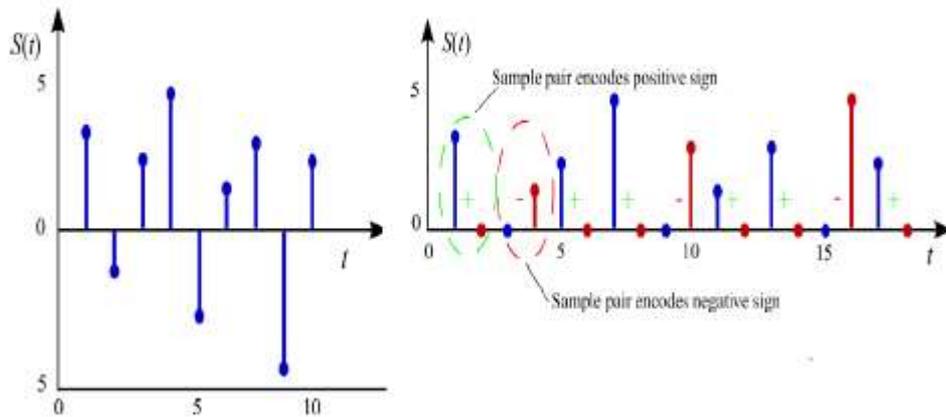


Figura 4-10. Ejemplo modulación U-OFDM [94].

A partir de este punto, lo que se tiene que hacer para que la señal U-OFDM sea transmitida es reordenarla, agrupando todos los valores positivos y después los valores negativos, como se muestra en la Figura 4-11. En la parte del demodulador, para recuperar los datos enviados, basta con realizar una resta de cada una de las muestras positivas con negativas y realizar los procesos inversos de OFDM [93].

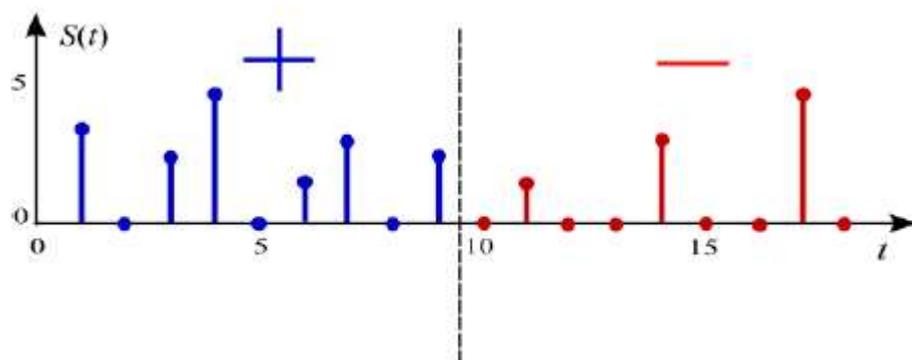


Figura 4-11. Resultado modulación U-OFDM [94].

4.5.3.2 DCO-OFDM

Igual que en la modulación ACO-OFDM, en este caso también se aplican las propiedades de la Transformada de Fourier. Se realiza la simetría hermítica para obtener los valores reales, tanto positivos como negativos. Pero, para que todos los valores sean positivos, en este caso no se realiza un recorte asimétrico, sino que se le añadirá un *offset* a la señal que se obtiene a la salida de IFFT [93].

Para encontrar el valor de continua que hay que añadir a la salida de la IFFT, con el cual se elimine toda componente negativa, habrá que encontrar el máximo valor de amplitud de las muestras positivas y negativas. Este es el valor que se utilizará como componente directa, por lo tanto, sumándolo a cada

muestra, se conseguirá que todos los valores sean positivos. Este procedimiento se puede apreciar en la Figura 4-12.

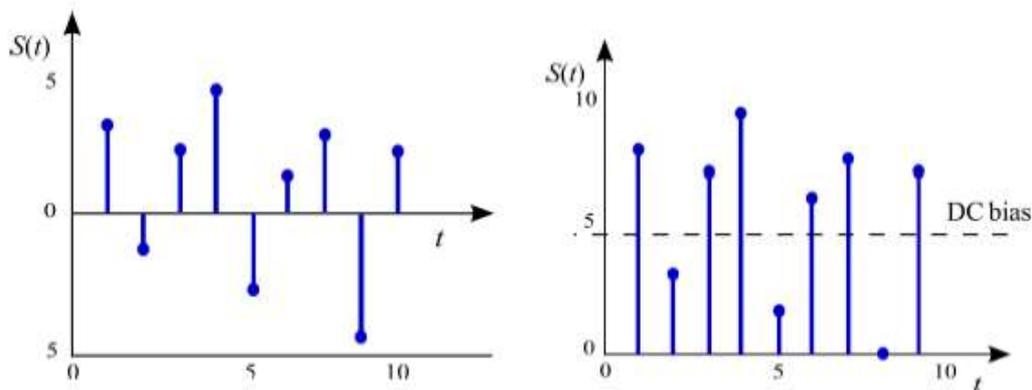


Figura 4-12. Ejemplo modulación DCO-OFDM [94].

[32] Xiao Zhang, Svilen Dimitrov, Sinan Sinanović, Harald Haas, "Optimal Power Allocation in Spatial Modulation OFDM for Visible Light Communications", Institute for Digital Communications Joint Research Institute for Signal and Image Processing School of Engineering The University of Edinburgh EH9 3JL, Edinburgh, UK, 2012

La Figura 4-12 presenta un caso ideal, pero en un caso real hay que tener en cuenta las características del LED. En un sistema real, hay que tener en cuenta estos componentes. Por eso, aparte de sumarle la componente DC, también se le agrega un cruce por cero y así se eliminan todas las componentes negativas sobrantes y se asegura que se obtiene una señal positiva [93].

En la etapa de recepción, se elimina la componente DC y se realizan los procedimientos inversos de OFDM, de este modo se recupera la información enviada.

4.5.3.2.1 NDCO-OFDM

La multiplexación por división de frecuencia óptica sin componente DC (NDCO-OFDM) es una variación de DCO-OFDM. Para conseguir la señal adecuada, se hace el mismo procedimiento que en los casos anteriores: las ráfagas de bits son modulados mediante QAM o PSK, se le aplica la simetría hermítica y así, cuando se le aplique la transformada de Fourier inversa, se obtengan valores reales pero que pueden ser tanto positivos como negativos.

Para convertirla en una señal positiva, se le aplica modulación espacial a la salida de la IFFT. El vector $x(k)$ se separa en dos vectores, $L_1(k)$ y $L_2(k)$, en uno se almacenarán los valores positivos y en el otro los negativos. Si el valor es negativo, entonces el vector $L_1(k)$ se rellena con un 0 y el $L_2(k)$ con el valor absoluto del valor. Si, por el contrario, el valor es positivo, $L_1(k)$ se rellena con el valor absoluto y $L_2(k)$ con un 0. Este procedimiento se hace con todos los valores de IFFT. Con este procedimiento se consigue que no haya componente DC y además se cumplen las dos condiciones de los sistemas ópticos [93].

En la parte de recepción de los sistemas NDCO-OFDM, se realizan los procesos inversos del transmisor. La información enviada que pasa por el canal óptico se ve afectada por ruido e interferencia. Mediante ecualizadores y detectores de errores se consigue optimizar el sistema. Tras el proceso de demodulación OFDM se recupera la información enviada.

4.5.3.3 ADO OFDM

En ADO-OFDM, tanto ACO-OFDM como DCO-OFDM son transmitidas simultáneamente. ACO-OFDM se transmite en las subportadoras pares y DCO-OFDM en las muestras subportadoras pares. Las subportadoras impares se demodulan como un receptor convencional ACO-OFDM y las subportadoras pares son demoduladas tras un proceso de cancelación de interferencia [95].

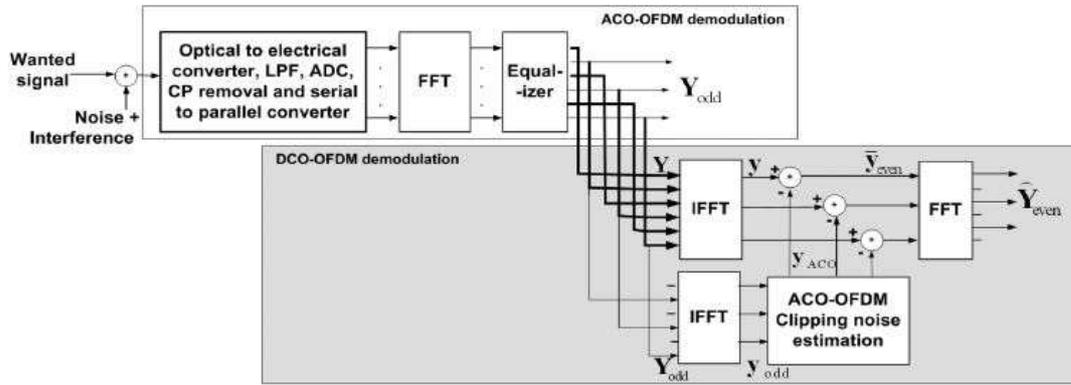


Figura 4-13. Esquema transmisor ADO-OFDM [95].

En la Figura 4-13 se muestra un diagrama de bloques de un transmisor ADO-OFDM. En la parte superior el transmisor genera las señales ACO-OFDM, mientras que en la parte inferior se originan las muestras DCO-OFDM. El procesador de la señal ACO-OFDM es muy parecido a un transmisor convencional ACO-OFDM. El vector de entrada X , al que se le aplica la simetría hermítica, está dividido en componentes pares e impares, X_{odd} y X_{even} donde $X_{\text{odd}} = [0, X_1, 0, X_3, 0, \dots, 0, X_{N-1}]$ y $X_{\text{even}} = [X_0, 0, X_2, 0, \dots, 0, X_{N-2}, 0]$. Como los elementos de X tienen simetría hermítica, X_{odd} y X_{even} también la tienen. X_{odd} y X_{even} son las entradas de dos transformadas inversas de Fourier separadas, y dan como salida x_{odd} y x_{even} , respectivamente, donde $x_{\text{odd}} = [x_{\text{odd},0}, x_{\text{odd},1}, \dots, x_{\text{odd},N-1}]$ y $x_{\text{even}} = [x_{\text{even},0}, x_{\text{even},1}, \dots, x_{\text{even},N-1}]$. La señal x_{odd} resultante es real y bipolar. Tras esto se recortan los picos negativos de la señal ACO-OFDM y se genera x_{ACO} , que se representa por [96]:

$$x_{\text{ACO}} = \frac{1}{2}x_{\text{odd}} + n_{\text{ACO}}, \quad (4-25)$$

donde n_{ACO} es el ruido de recorte. La transformada de Fourier de n_{ACO} comprende sólo las componen pares, mientras que n_{DCO} comprende sólo las subportadoras impares.

En DCO-OFDM, x_{DCO} se genera añadiendo un sesgo de DC al dominio del tiempo discreto de la señal x_{even} recortando todos los picos negativos. Como x_{even} se genera a partir de las subportadoras de índice par, tiene simetría. Por lo tanto [96]:

$$x_{\text{even},k} = x_{\text{even},k+\frac{N}{2}} \quad 0 \leq k < \frac{N}{2} \quad (4-26)$$

Cuando se le añade un sesgo de DC, B_{DC} , la nueva expresión será:

$$x_{\text{even},k} + B_{\text{DC}} = x_{\text{even},k+\frac{N}{2}} + B_{\text{DC}} \quad 0 \leq k < \frac{N}{2} \quad (4-27)$$

Por lo tanto, cuando se recortan picos negativos, para $0 \leq k < N/2$, se recorta un pico idéntico en $k+N/2$. Para simplificar el análisis, se asume que el recorte es correcto y se denota la nueva componente continua por B'_{DC} .

El ruido producido por el DCO-OFDM se denota por n_{DCO} . Por lo tanto, la señal resultante DCO-OFDM viene dada por:

$$x_{DCO} = x_{even} + n_{DCO} + B'_{DC}, \quad (4-28)$$

donde

$$x_{DCO,k} = x_{DCO,k+\frac{N}{2}} \quad 0 \leq k < \frac{N}{2} \quad (4-29)$$

$$n_{DCO,k} = n_{DCO,k+\frac{N}{2}} \quad 0 \leq k < \frac{N}{2}$$

Las señales x_{ACO} y x_{DCO} son serializadas y convertidas de digital a analógico y enviadas a un LPF ideal dando lugar una señal continua en el dominio del tiempo, $x_{ACO}(t)$ y $x_{DCO}(t)$. La señal $x'(t)$ es generada por la suma de estas dos señales [96]:

$$x'(t) = x_{ACO}(t) + x_{DCO}(t) \quad (4-29)$$

$x'(t)$ se envía desde un transmisor óptico ideal.

5 EL ESTÁNDAR VLC

En este capítulo se va a introducir los estándares de VLC, además de la norma IEEE 802.15.7, el grupo al que pertenece VLC, para así poder entender mejor de que trata esta norma y en que contexto se desarrolló.

5.1 Introducción

En 2007, el Consorcio de las Comunicaciones por Luz Visible propuso dos estándares para VLC, *Visible Optical Communications System Standard* y *Visible Light ID System Standard*. Ambos fueron aceptados por la Asociación Japonesa de Electrónica y Tecnología de la Información (JEITA, *Japan Electronics and Information Technology Industries Association*) como JEITA CP-1221 y JEITA CP-1222. En 2013 se creó JEITA CP-1223 [97].

El primero de ellos restringe la longitud de onda de la luz visible dentro del rango 380-750 nm. Este estándar fue pensado para transmitir información de identidad pero también es posible transmitir mensajes sin un formato de datos fijo [98].

El estándar JEITA CP-1222 se diferencia del anterior en su funcionalidad. Restringe la frecuencia de la subportadora a 28.8 kHz y propone utilizar la modulación 4-PPM [98]. Este estándar requiere verificación por redundancia cíclica para la detección y corrección de errores.

En 2008, el VLCC advirtió que los estándares de los sistemas de comunicaciones ópticas estaban regulados por la IrDA (*Infrared Data Association*) e ICSA (*Infrared Communication System Association*).

En 2013, se creó el grupo JEITA CP-1223, que acordó un método unidireccional de comunicaciones conocido como *light beacon*. Este se usa para la identificación de objetos como una etiqueta RFID o para proporcionar información de la posición de un objeto [99].

Por otro lado, el grupo de trabajo IEEE 802.15 que trabaja en los estándares de redes inalámbricas de área personal creó el grupo 7 dedicado a VLC.

5.2 Estándar

5.2.1 Alcance del estándar VLC

VLC tiene la ventaja de que la fuente de emisión de comunicación inalámbrica utiliza LED. El estándar para la iluminación se ha desarrollado cubriendo la conexión entre las lámparas y la potencia eléctrica en términos de seguridad eléctrica tal como se establece en la norma IEC TC 34. El estándar para VLC necesita un número de protocolos entre la parte transmisora y la receptora dada en PLASA E1.45 y IEEE 802.15.7 así como hacer frente a la seguridad electrónica. Hay que considerar las compatibilidades entre el área de servicio de VLC, la iluminación, los proveedores y los estándares [100].

5.2.1.1 Compatibilidad del área de servicio de VLC

El servicio de VLC puede proporcionar distintos espacios de iluminación, como por ejemplo museos, centros comerciales, restaurantes, etc. Existen dos estilos de servicios VLC. El primero de ellos es para un área más

específica, como una empresa u organización con una localización definida en la cual se utilizan equipos propios. La otra se refiere más a servicios públicos, donde, con el fin de comunicarse, el equipo debe ser compatible con estándares de comunicación [101].

Cuando se diseña para un área específica, no necesita ningún estándar para VLC, por lo tanto, el diseño de un sistema VLC se puede hacer fácilmente sin ninguna restricción o limitación porque el diseño está basado en tecnología propia y no en un estándar. Este estilo específico tiene la ventaja de que la implementación es barata y rápida. Pero, por contra, carecen de compatibilidad con otros equipos de servicio VLC.

Por el contrario, cuando se diseña un área pública, se necesita un estándar para asegurar la compatibilidad en el área de servicio de VLC. Las normas internacionales que respaldan estos estándares son IEEE 802.15.7 y PLASA E1.45 [102].

5.2.1.2 Compatibilidad de iluminación VLC

Hay varios tipos de iluminación LED dependiendo de la potencia, capacidades, accesorios o color, sus capacidades y formas varían de acuerdo a su uso. Aunque hay una amplia gama de sistemas de iluminación LED, el estándar VLC tiene que aplicarse a todos los tipos de sistemas LEDs [103].

Por eso, se deben conocer las normas de iluminación LED en IEC TC 34, con el fin de continuar con el desarrollo de nuevos estándares.

5.2.1.3 La compatibilidad entre proveedores VLC

Hay muchos proveedores de iluminación LED, que pueden introducir y retirar los productos de iluminación de LED libremente. Tanto la iluminación como los terminales de recepción pueden dejar de funcionar. La norma VLC tiene que apoyar la compatibilidad entre proveedores VLC. De forma que se puedan elegir estos de manera transparente sin seleccionar proveedores o productos específicos y que se puedan reemplazar en cualquier momento, cualquier producto de cualquier fabricante, y que sigan siendo compatibles.

Con el fin de lograr compatibilidad entre proveedores VLC, se necesita un estándar con perfiles interoperables. Si no se compra un producto adecuado con la compatibilidad VLC, se tiene que reinstalar la iluminación y sustituir el terminal de recepción.

5.2.1.4 Compatibilidad entre estándares

Hay varias normas relativas a la comunicación por luz visible, IEEE 802.15.7, VLC PHY/MAC, iluminación LED IEC TC 34, PLASA E1.45 DMX-512A VLC.

El estándar IEEE 802.15.7 emitido en 2011 cubre la iluminación LED VLC PHY interior y receptores PHY VLC.

La iluminación LED IEC TC 34 del sistema inteligente de iluminación (ISL, *Intelligent System Lighting*) se creó como un grupo de trabajo que elabora normas para las componentes funcionales digitales, incluyendo VLC. El estándar PLASA E1.45 DMX - 512A VLC emitido en 2013 cubre los datos de comunicación la luz visible, y la transferencia por cable entre la iluminación LED y un servidor de control. El consorcio Zhaga se aplica a las fuentes de luz LED para la iluminación. La conmutación de encendido y apagado de la iluminación LED se puede controlar mediante el uso de redes inalámbricas: ZigBee, IrDA, Bluetooth y WiFi [104].

Las especificaciones de estándares internacionales o nacionales se pueden desarrollar simultáneamente por muchas organizaciones de normalización o grupos de trabajo. Esto es posible gracias a que pueden compartir sus actividades de normalización y proyectos de especificaciones a través del intercambio de documentos. Esto debería asegurar la compatibilidad entre estándares. Una nueva especificación estándar puede actualizarse a partir de uno anterior, y debe ser por escrito para asegurar la compatibilidad con estándares anteriores y posteriores. Los resultados son principios consistentes para los desarrolladores y usuarios finales y evitan la confusión.

5.2.2 Estándar de transmisión de datos VLC

Hay dos tipos de transmisión de datos mediante comunicación por luz visible, uno es con dato fijo y el otro con dato variable dentro de la iluminación para VLC. El dato variable puede cambiar de acuerdo con protocolos de transmisión por cable o protocolos por transmisión inalámbricos [105].

5.2.2.1 Protocolo de transmisión por cable

Hay dos tipos de protocolos de transmisión por cable con VLC: PLASA E1.45 DMX-512A VLC y UEC 62386 DALI VLC. PLASA es una asociación comercial de iluminación y sonido profesional con un programa de normalización técnica.

PLASA E1.45 DMX-512A VLC fue emitido en 2013 para permitir la comunicación de datos luminarios de 802 a lo largo de enlaces de datos ANSI E-1.11 para la transmisión de datos desde esas luminarias que utilizan VLC, IEEE 802.15.7. ANSI E1.11, revisada en 2008, describe un método de transmisión de datos digitales para el control de equipos y accesorios de iluminación, incluyendo reguladores de luz, color, conmutadores y equipos relacionados. DMX512 -A se puede utilizar para la iluminación mediante LED en fachada para medios de comunicación al aire libre.

IEC TC 34 62386 DALI es uno de los protocolos candidatos para la transmisión de datos mediante VLC. La comisión electrotécnica internacional (IEC, *International Electrotechnical Commission*) es la organización mundial que prepara y publica estándares internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas. IEC 62386 *Digital Adressable Light Interference* (DALI) especifica un protocolo para el control de señales digitales de equipamientos de iluminación electrónica.

5.2.2.2 Protocolo de transmisión inalámbrico

Hay protocolos complementarios para la transmisión inalámbrica: ZigBee, IrDA, Bluetooth, y WPAN. VLC necesita habilidades de comunicación inalámbrica adicionales debido a que es una comunicación principalmente unidireccional.

ZigBee, definido en el estándar IEEE 802.15.4 se utiliza en aplicaciones que sólo requieren una tasa de datos baja, una batería con una vida útil grande y una red segura con una tasa de transmisión de 250 kbits/s. ZigBee se puede utilizar para conmutadores de luz inalámbricos incluyendo el control de atenuación.

5.2.3 Estándar de la iluminación

La gran ventaja de la tecnología VLC es su uso de la iluminación LED sin ningún otro medio de transmisión, por lo que sólo es necesario aplicar las normas de iluminación tradicionales. El estándar TC 34 prepara normas internacionales para lámparas y otros equipos relacionados, y se estableció en 1948 [106].

5.2.3.1 Interfaz de la fuente de iluminación LED

El consorcio internacional Zhaga está desarrollando especificaciones de interfaz que permiten la intercambiabilidad de las fuentes de luz LED de diferentes fabricantes. Las especificaciones de Zhaga describen las interfaces entre luminarias LED y emisores de luz LED. Esto acelerará la adopción de soluciones de iluminación LED en el mercado.

La comunicación por luz visible utiliza luces LEDs, pero el módulo LED del consorcio Zhaga aún no ha sido considerado como comunicación por luz visible. Cuando se desarrolla la capa PHY de VLC y un servicio de aplicación, se deben tener en cuenta las especificaciones del módulo LED de Zhaga.

5.2.3.2 Interfaz del accesorio

El Comité Técnico Internacional de la Comisión de Electrotécnica TC 34 ha sido el desarrollador de normas internacionales relacionadas con las especificaciones para las lámparas LED, incluyendo los casquillos y portalámparas, el equipo de control de lámparas, luminarias y varios equipos relacionados no

cubiertos por los proyectos de otros comités técnicos.

VLC puede ser una de las funciones de una luminaria. IEC TC 34 aún no ha desarrollado ninguna especificación para la comunicación de la luz visible. Se necesita para especificar cómo combinar la iluminación en sí y la comunicación inalámbrica por medio de la luz.

5.2.3.3 Interfaz de iluminación del sistema inteligente LED

El IEC TC 34 del sistema inteligente de iluminación se creó como un Grupo de Trabajo que tuvo una primera reunión cara a cara en enero de 2014. Su misión es la convergencia creativa en nueva tecnología entre la industria de la iluminación tradicional y la tecnología de la información y las comunicaciones (ICT). La función de la iluminación LED ha introducido el uso de las ICT tales como la comunicación inalámbrica, la comunicación por cable, y las comunicaciones de luz visible. Las tecnologías de comunicación inalámbrica como ZigBee, Bluetooth, IrDA y WLAN se pueden adaptar de acuerdo con los requisitos específicos de la aplicación.

VLC necesita el desarrollo de las funciones de luminarias cooperativas y otras tecnologías de la información como la comunicación inalámbrica y comunicación por cable.

5.2.3.4 Estándar del servicio VLC

Se pueden encontrar actividades estándar de servicios para VLC en el estándar IEEE 802.15.7, IEC TC 34, PLASA CPWG, TTA VLC WG, VLCC y el UIT-T SG 16.

Algunas aplicaciones de VLC son sistemas de guía de VLC, sistemas imaginables de color VLC, VLC navegador en interior y sistemas de apoyo a la conducción de automóviles VLC.

Un sistema de guía VLC utiliza lámparas que iluminan un patio, frontera nacional, o instalación, para la orientación, así como para la protección contra ataques externos. Las lámparas tienen un número de identificación (ID VLC o ID de LED) y la información de orientación. Un sistema de colores imaginables VLC utiliza lámparas de color para la información de color en sí, ya sea por instinto o para la educación. Un navegador de interior VLC utiliza lámparas con luz visible de comunicación para la navegación de área de ventas interiores en lugares donde no se admite GPS. Un sistema de apoyo a la conducción de automóviles VLC utiliza lámparas incluyendo los faros, faros antiniebla, intermitentes y luces de freno para una conducción segura.

El Grupo de Trabajo VLC (WG4021) en TTA se estableció en mayo de 2007. El Grupo de Trabajo desarrolló las especificaciones del estándar VLC TTA 5, que abarca: Configuraciones básicas del transmisor PHY para VLC, Configuraciones básicas del receptor PHY para VLC, Configuración básica de Interfaz de LED para la iluminación y VLC, Configuración básica de la Luz sobre la ubicación Servicio Modelo usando VLC y configuración básica de identificación de Iluminación en VLC.

Grupo de Trabajo de VLC desarrolló TTA 23 VLC y proyectos de normas relacionadas con el control del LED. Las 18 especificaciones se centran en las formas de combinar tecnologías de la comunicación y de la luz visible.

La comunicación por luz visible puede ofrecer servicios creativos, pero las especificaciones estándar relevantes aún no se han desarrollado. Sin embargo, la especificación VLC PHY en el estándar IEEE 802.15.7, y datos por cable VLC especificaciones de transmisión en PLASA E1.45 están disponibles. La apertura del mercado de VLC necesita especificaciones estándar de servicio. Estas proporcionarán orientación a los usuarios desde el punto de vista del desarrollo de la función de servicios de aplicaciones.

5.3 IEEE 802.15

Los estándares de redes inalámbricas como 802.11 y WiMax están centrados en la comunicación de ordenador a ordenador o de ordenador a ISP (*Internet Service Provider*) en lo que se conoce como WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*). Sin embargo, existen muchas aplicaciones en las que no se necesita una cobertura tan amplia como por ejemplo conectar a un teléfono móvil periféricos de forma inalámbrica o añadir componentes a un sistema de cine en casa.

Las redes de área personal surgieron para este tipo de aplicaciones, ofrecen cobertura en un vecindario desde 1

metro a 100 metros y una variedad de tasa de datos. Además, gracias a que los dispositivos para los que se diseña este tipo de aplicaciones suelen ser móviles y ligeros, suele consumir poca energía.

El 802.15 es un grupo de trabajo del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) especializado en WPAN (*Wireless Personal Area Network*), es decir, en redes inalámbricas de área personal. Este grupo se divide en diez subgrupos, no todos ellos vigentes. Entre uno de estos se puede encontrar el 802.15.7 que desarrolla la tecnología *Visible Light Communication* [107].

La norma 802.15 se centra en redes de cortas distancias como por ejemplo Bluetooth. Este grupo de trabajo tiene como objetivo la comunicación e interoperación entre distintos dispositivos portátiles como PCs, PDAs, teléfonos/*smatphones*, etc.

El origen de este grupo fue causado porque Bluetooth no puede coexistir con una red inalámbrica del grupo 802.11.x, se desarrolló este estándar permitiendo la interoperabilidad de redes inalámbricas LAN (*Local Area Network*) con PAN [107].

Actualmente existen 10 grupos de esta norma, a continuación se dará una idea detallada de en lo que consiste cada grupo. En la Figura 5-1 se muestra la organización del IEEE 802.15.

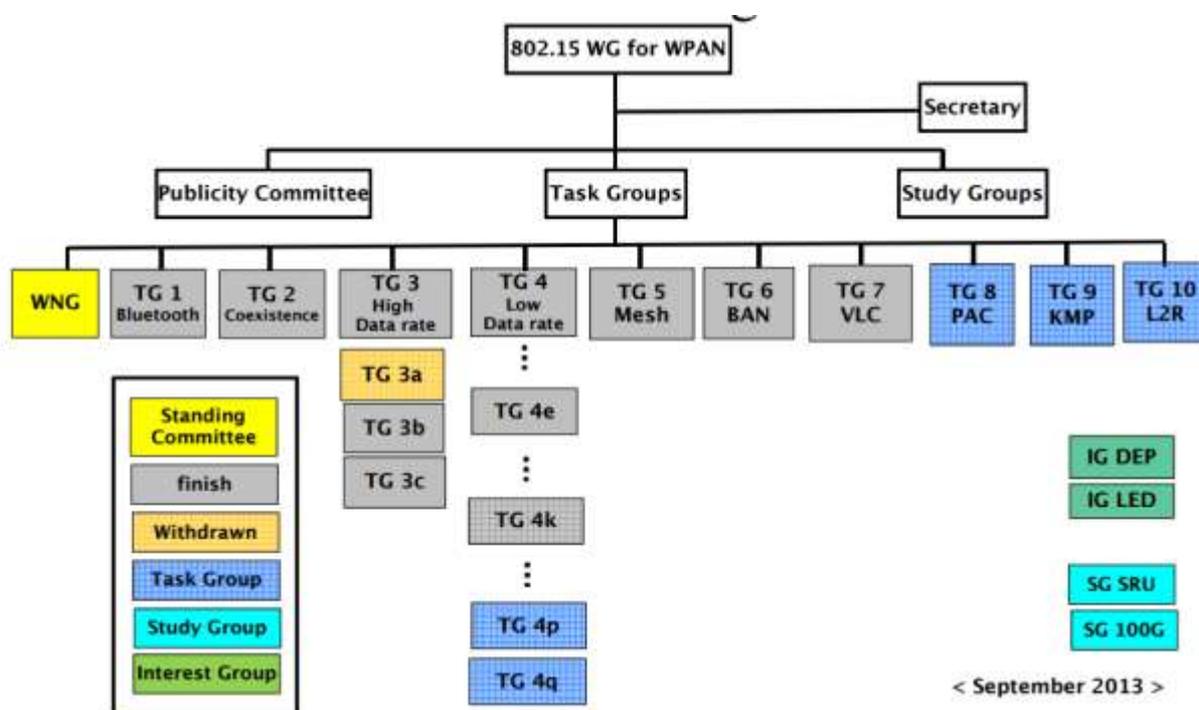


Figura 5-1. Organización estándar 802.15 [108].

5.3.1 802.15.1

Este subgrupo es más conocido como Bluetooth. Esta norma hace posible la transmisión de voz y datos entre distintos dispositivos gracias a un enlace por radiofrecuencia en la banda de 2.4 GHz.

Esta tecnología fue creada en 1994 como otra opción inalámbrica para el intercambio de datos mediante transmisiones radio. Bluetooth fue diseñado como un estándar abierto para permitir la conexión entre productos dispares [109].

Los tres grandes objetivos de este estándar son:

- Facilitar las comunicaciones entre terminales móviles.
- Prescindir de cables y conectores.
- Conseguir pequeñas redes inalámbricas en cortas distancias y facilitar la transmisión de datos entre equipos personales.

Una de las aplicaciones más conocidas de este grupo son los auriculares inalámbricos, la conectividad de manos libres en los coches o altavoces que transmiten música desde un teléfono o una *tablet*.

5.3.2 802.15.2

Este grupo se centra en resolver los problemas que pueden surgir a causa de la coexistencia de dispositivos WPAN con otros equipos inalámbricos que utilizan bandas de frecuencias no reguladas como por ejemplo redes WLAN.

Hay dos clases de mecanismos de coexistencia: colaborativa y no colaborativa. Si es posible para WPAN y WLAN intercambiar información entre ellos, es posible desarrollar el mecanismo de coexistencia colaborativo donde dos redes inalámbricas se comunican para reducir la interferencia que causan entre ellos. Si no hay método para intercambiar información entre dos redes inalámbricas, entonces se usará el mecanismo de coexistencia no colaborativo. Ambos mecanismos cumplen los mismos objetivos, dependiendo del entorno se usará uno u otro [110].

5.3.3 WPAN de alta velocidad

El estándar 802.15.3 surgió para que las WPAN transmitiesen datos de modo rápido y eficiente. Este subgrupo determina los niveles en la capa física, PHY (3a y 3c) y para el control de acceso al medio, MAC (3b) para redes inalámbricas de área personal de alta velocidad, 11-55 Mb/s.

Este grupo tenía la intención de desarrollar un estándar que su implementación no fuese muy costosa en precio ni operación, por lo tanto es una norma sencilla. Además, mientras en el estándar sea menos complejos en los protocolos, el formato de las tramas, la modulación, etc., más eficiente y rápida será la transmisión de datos [111].

De esta norma también se puede decir que es segura ya que la información compartida estará encriptada gracias al estándar *Advances Encryption Standard* (AES 128).

La capa física define cinco rangos de velocidad de transmisión (11, 22, 33, 44 y 55 Mb/s). Las modulaciones más usuales son BPSK, PSK y QPSK, esta última cuando se transmite sin codificación de datos.

El IEEE 802.15.3 opera en la misma banda libre que en la que trabaja 802.11, pero gracias a que la norma 802.15.3 transmite menos potencia y ocupa menor ancho de banda, es decir, causa menos interferencia, es posible la coexistencia de ambas tecnologías en un mismo lugar [111].

5.3.3.1 802.15.3a

El IEEE 802.15.3a era una tentativa para conseguir mejoras en el nivel físico de *Ultra-WideBand* para el uso en aplicaciones que implican imágenes y multimedia.

Los miembros del grupo no fueron capaces de llegar a un acuerdo entre dos tecnologías propuestas y fue rechazada en enero de 2006 [111].

5.3.3.2 802.15.3b

Esta norma estudia las mejoras en el grupo 802.15.3 para clarificar la implementación e interoperabilidad de MAC. Esta enmienda incluye muchas optimizaciones, errores corregidos y aclaró ambigüedades. Entre otros cambios, la enmienda define las siguientes nuevas características [107]:

- Una nueva entidad de gestión de capa MAC.
- Política de reconocimiento implícita que permite sondeo.
- Protocolo lógico de control/acceso de la subred de enlace
- Asignación de direcciones de multidifusión.
- Un método para renunciar a tiempo de canal a favor de otro dispositivo en la PAN.
- Una red más rápida que se recupera en el caso de que la *piconet* se desconecte bruscamente.
- Un método para que el dispositivo vuelva información sobre calidad de la señal de un paquete recibido.

5.3.3.3 802.15.3c

Este grupo se creó en 2005 y estudia otra alternativa en el desarrollo de una PHY basado en ondas milimétricas para suplir el estándar 802.15.3a, el estándar fue publicado en septiembre de 2009.

Esta red de área personal trabajará en el rango de frecuencias de 57 a 64 GHz. Gracias al uso de estas frecuencias, se consigue una coexistencia muy alta en todos los sistemas de microondas del grupo 802.15. Al ser ondas milimétricas permite una velocidad de datos muy alta de corto alcance, superando los 2 Gbit/s para aplicaciones que incluyen acceso a internet de alta velocidad o *streaming*, como por ejemplo televisión digital [110].

Se definen tres modos PHY en la norma:

- Modo de única portadora, hasta 5.3 GHz.
- Modo de interfaz de alta velocidad, HSI. Una sola portadora, hasta 5 Gb/s.
- Modo audio/visual, AV. OFDM, hasta 3.8 Gb/s.

5.3.4 802.15.4

Las WPANs de baja velocidad, como su propio nombre indica, se ocupan de sistemas que transmiten pocos datos. La batería de estos equipos es de larga duración (meses, incluso años) y son de complejidad baja. La norma define la capa 1, capa física, y la capa 2 (de enlace) del modelo OSI. La primera edición de esta norma fue aprobada en mayo de 2003. En marzo de 2004 se formó el subgrupo 802.15.4b, en el que se pueden encontrar trazos de ZigBee [112].

Las características más importantes de este estándar son la flexibilidad de red, bajo consumo de energía, bajo coste. Gracias a esto, esta norma tiene múltiples aplicaciones en el hogar ya que requieren una tasa de datos baja. Se puede implantar una red en el hogar y así facilitar la vida a los propietarios. Se pueden clasificar según usen cables o no. Cada uno de ellos tienen distinta necesidad de ancho de banda, coste y procedimientos de instalación.

En el caso de los sistemas inalámbricos suponen un ahorro en los gastos de instalación ya que no se precisa modificar el cableado. Estas redes permiten una gran transmisión de información con un coste de instalación muy bajo [113].

También se puede clasificar según la necesidad de transmisión de información, en conexión a internet, conexión multi-PC, redes de audio y vídeo, automatización del hogar, ahorro de energía y seguridad. Dependiendo de su ancho de banda, coste y procedimientos de instalación tienen más ventajas o desventajas.

Dentro de este estándar se desarrollaron varios subgrupos que se explicarán brevemente a continuación.

5.3.4.1 802.15.4a

IEEE 802.15.4a, también conocido como PHY alternativa, es una enmienda del grupo 802.15 especificando normas de la capa física adicionales de la norma original. El principal objetivo es proveer a estos sistemas de un rango de precisión más alto y una capacidad de localización mejor, alta productividad agregada, añadir escalabilidad en la tasa de datos, mayor rango y reducir costes y consumo de potencia.

En marzo de 2005, las líneas de base seleccionadas fueron dos opciones PHY que consistían en un radio pulso UWB, operando en el espectro de UWB sin licencia, y técnicas de espectro de dispersión *Chirp*, trabajando en la banda de 2.4 GHz. La primera se basa en la tecnología UWB de pulso continuo que será capaz de entregar comunicaciones y rango de alta precisión [111].

5.3.4.2 802.15.4b

En el IEEE 802.15.4b, aprobado en junio de 2006 y publicado en septiembre del mismo año, hay que destacar que es un grupo de revisiones, correcciones y aclaraciones específicas sobre la norma 802.15.4a [107].

- Un método para la distribución de tiempo compartido.
- Soporta nuevas asignaciones de frecuencias para Europa, China y Japón.
- Mecanismo para comunicar el nivel de transmisión.

Esta norma es completamente compatible con el estándar 802.15.4a.

Uno de los objetivos principales es la resolución de ambigüedades y la reducción de la complejidad, el incremento de la flexibilidad en el uso de las claves de seguridad, entre otras cosas.

5.3.4.3 802.15.4c

La norma IEEE 802.15.4c se probó en 2008 y se publicó en enero de 2009. Define una enmienda PHY añadiendo nuevas especificaciones al espectro de RF, para adaptarse a los cambios regulatorios de China que han abierto las bandas de 314 a 318 MHz, 430 a 434 MHz y 779 a 787 MHz para el uso de redes PAN en China [107].

5.3.4.4 802.15.4d

Este grupo se centra en la modificación de la capa física o PHY y del control de acceso al medio o MAC para Japón. Se creó para hacer una modificación al IEEE 802.15.4b. Estas contemplaban cambios en la capa física y en la de control de acceso al medio necesarios para soportar la nueva asignación de frecuencias en Japón, 950 a 956 MHz, mientras coexiste con otros sistemas en la misma frecuencia de bandas [107].

5.3.4.5 802.15.4e

Este estándar es una modificación de la norma anterior, 802.15.4. Se caracteriza porque define mejoras en la capa de control de acceso al medio (MAC). La intención de esta enmienda es mejorar y añadir funcionalidad a la capa MAC y así conseguir un mejor apoyo a los mercados industriales y la compatibilidad con las modificaciones del WPAN Chino.

Hubo algunas modificaciones específicas como agregar salto de canal y una opción de intervalos de tiempo variables compatibles con ISA100.11a. Estas mejoras se llevaron a cabo en 2011 [113].

5.3.4.6 802.15.4f

Este grupo se creó para definir nuevas capas físicas inalámbricas y mejorar la capa MAC del 802.15.4-2006 que son necesarias para apoyar la nueva capa PHY para sistemas bidireccionales RFID activos y aplicaciones que determinan la localización [114].

Para proporcionar un estándar de bajo coste, de muy bajo consumo de energía, flexible y de comunicación fiable se necesita un protocolo de interfaz aire para RFID activo y aplicaciones de sensores.

Un Sistema RFID activo es un servicio que está vinculado con un activo o persona con una identificación única y capacidad para producir su propia señal radio no derivada de ninguna señal radio externa. Las aplicaciones incluyen telemetría inalámbrica de sensores, control y determinación de una ubicación. Para generar una radio señal, las etiquetas RFID activas deben emplear alguna fuente de potencia. Tradicionalmente esto ha sido solucionado gracias a baterías integradas, aunque existen diseños para tales dispositivos cuya fuente de energía es la ambiental.

Dos mejoras que destacar en la capa inalámbrica RFID activa y de control de acceso al medio:

- Frecuencia de repetición de pulso de baja tasa: con frecuencia centrales 6489.6 MHz, 6988.8 MHz y 7987.2 MHz
- Modulación por desplazamiento mínimo (PSK).

5.3.4.7 802.15.4g

El grupo de trabajo 802.15.4g fue creado para formar una nueva capa física que modifique 802.15.4 para proporcionar un estándar que facilite a gran escala aplicaciones de control de procesos como la utilidad de redes inteligentes capaces de soportar geográficamente diversas redes con una infraestructura mínima [115].

5.3.5 802.15.5

El IEEE 802.15.5 proporciona un marco arquitectónico que permite servicios WPAN para promover la creación de redes malladas estables, escalables y con interoperabilidad [116].

Los objetivos de esta norma son:

- La extensión de la cobertura de la red sin incrementar ni la potencia transmitida ni la sensibilidad.
- Mayor fiabilidad a través de la redundancia de rutas.
- Mejorar la duración de batería del dispositivo gracias a un menor número de retransmisiones.
- Menor complejidad de la configuración de red.

Este estándar se compone de dos partes: redes WPAN de baja tasa y redes WPAN malladas de alta tasa. Las

redes malladas de baja tasa están basadas en la capa MAC de la norma 802.15.4b-2006, mientras que las de alta tasa utilizan IEEE 802.15.3b. La característica común de ambas redes es que incluyen la inicialización de la red, direccionamiento y el envío a un único receptor desde un único transmisor multisaltos. Además las redes malladas de baja tasa soportan multidifusión (envío de la información en múltiples redes a múltiples destinos simultáneamente), difusión fiable, portabilidad, trazado de ruta y la función de ahorro de energía. En cambio, las redes malladas de alta tasa son compatibles con el servicio de tiempo garantizado multisaltos.

Algunas de las aplicaciones más destacables son [107]:

- Redes domésticas multimedia: Como se puede apreciar en la Figura 5-2, esta red es muy útil para la electrónica de consumo como vídeo (HDTV), audio (VoIP) o juegos interactivos. También se puede usar para ampliar la cobertura a través de multisaltos.

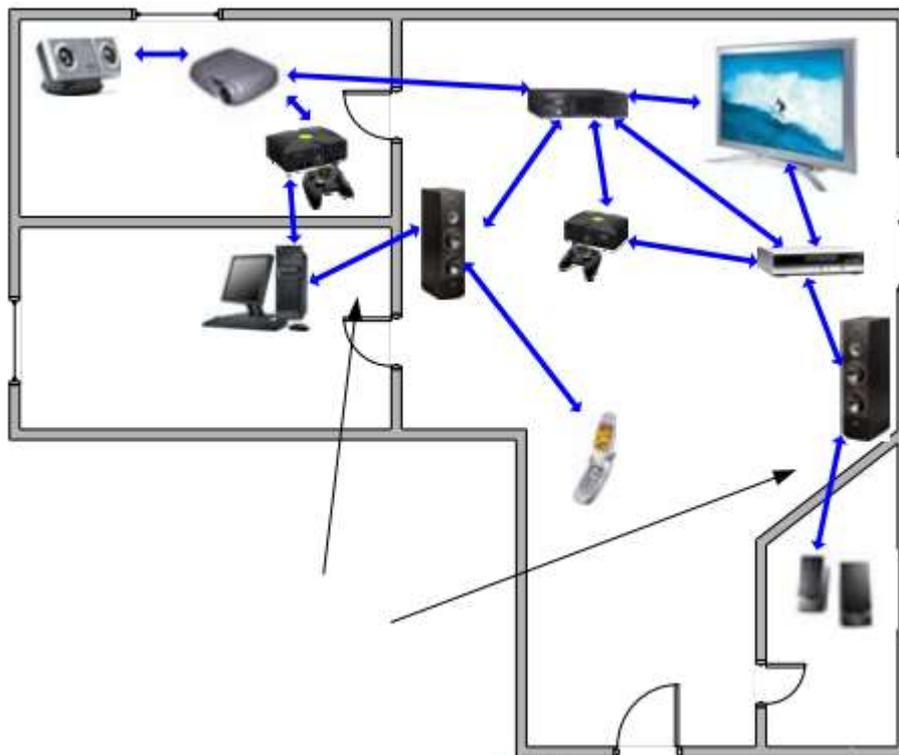


Figura 5-2. Red doméstica multimedia [107].

- Interconexión entre ordenadores y periféricos, como por ejemplo impresoras, servicio de interfaz humano o transferencia de ficheros locales como se muestran en la Figura 5-3. Estas redes se suelen implementar en pequeñas habitaciones u oficinas. Gracias a estas mallas se permite una potencial mejora en la capacidad de la red.



Figura 5-3. Interconexión entre PC y periféricos [107].

- Interconexión entre servicios de mano. Esta red puede estar en cualquier lugar y puede lograr una red fiable y con un ahorro de energía. Con los servicios de mano se refiere a auriculares inalámbricos, descarga de contenidos MP3, archivos de cámara de fotos o transferencia de archivos de internet. Como se puede ver en la Figura 5-4.



Figura 5-4. Interconexión entre servicios de mano [107].

5.3.6 802.15.6

Este estándar es el último estándar internacional sobre las redes inalámbricas de área corporal (WBAN, *Wireless Body Area Network*) [107].

En diciembre de 2011 se aprobó una norma para las tecnologías de BAN. Este grupo se creó en noviembre de 2007 centrado en redes inalámbricas de baja potencia y de corta distancia para ser optimizados en dispositivos y operación alrededor del cuerpo humano (pero no limitado a los seres humanos) para servir a una amplia variedad de aplicaciones incluidas médicas, electrónica de consumo y entretenimiento personal [117].

Utiliza bandas médicas y científicas así como bandas de frecuencias aprobadas por las autoridades médicas o

reglamentarias nacionales vigentes. Se requiere apoyo para la calidad de servicio, potencia extremadamente baja y tasa de datos por encima de los 10 Mbps. Esta norma tiene en cuenta los efectos sobre antenas portátiles debido a la presencia de una persona (variando si es hombre o mujer, ligero o pesado, etc.), diagrama de radiación de conformación para minimizar la tasa de absorción específica (SAR, *Specific Absorption Rate*) en el cuerpo y cambios en características como consecuencia de movimientos del usuario.

5.3.7 802.15.8

El propósito del IEEE 802.15.8 es proporcionar un estándar global escalable, de baja potencia y comunicaciones inalámbricas de alta fiabilidad tanto en servicios emergentes como en redes sociales, publicidad, juegos, *streaming* y servicios de emergencias. Las normas existentes podían proporcionar parte de parte de los servicios de PAC (*Peer Aware Communications*), pero no había una única norma que proporcionase comunicaciones PAC con coordinación [107].

Este estándar se aprobó en marzo de 2012. Define mecanismos de las capas PHY y MAC para WPAN y es conocido como PAC optimizadas de igual a igual (*peer to peer*) y comunicaciones basadas en infraestructura con coordinación distribuida completa operando en bandas por debajo de los 11 GHz. El objetivo de este estándar son tasas de datos de más de 100 Mb/s, con tasas de datos escalables por encima de los 10 Mb/s.

Las características que incluye PAC son:

- Descubrimiento de información entre pares y sin asociación.
- Descubrir el número de servicios en la red.
- Número escalable de dispositivos.
- Tasa de transmisión de datos escalable, normalmente por encima de 10 Mbps.
- Comunicaciones multigrupo simultáneas, normalmente por encima de 10.
- Posicionamiento relativo.
- Enlace multisaltos.
- Seguridad.
- Operación en bandas sin o con licencia disponible a nivel mundial por debajo de 11 GHz capaces de soportar estos requisitos.

5.3.8 802.15.9

El IEEE 802.15.9 fue aprobado en diciembre de 2011 para formar un grupo de trabajo para desarrollar una práctica recomendada para el transporte de datagramas del protocolo de administración de claves (KMP, *Key Management Protocol*). La recomendación práctica define una trama de mensaje basada en Elementos de Información como método de transporte para datagramas de KMP y directrices para el uso de algunos KPM existentes en el estándar IEEE 802.15.4. La práctica recomendada no crea un nuevo KMP [107].

Aunque el estándar 802.15.4 siempre ha soportado la seguridad de datagramas, no ha proporcionado un mecanismo para establecer las claves. Añadir soporte KPM es fundamental para un marco de seguridad adecuado. Algunos de los KPM existentes son IETF PANA, HIP, IKEv2.

5.3.9 802.15.10

El estándar IEEE 802.15.10 se aprobó en agosto de 2013 para formar un grupo que desarrolla una práctica recomendada para paquetes de enrutamiento con cambios dinámicos (cambios en el orden de una trama por minuto) con impacto mínimo en la ruta. El objetivo es ampliar tanto la extensión de la cobertura como el número de nodos. Las capacidades de ruta que la práctica recomienda se incluyen en los siguientes puntos [107]:

- Establecimiento de ruta.
- Reconfiguración dinámica de la ruta.
- Descubrimiento y adición de nuevos nodos.
- Rotura de rutas establecidas.
- Pérdida y recurrencia de rutas.
- Recolección en tiempo real del estado de enlace.
- Permitiendo sólo salto en la capa de red.
- Apoyo a la difusión.

- Soporte de multidifusión.
- Expedición de tramas efectivas.

Para el enrutamiento en redes multisalto hay dos métodos para habilitarlo, con características ligeramente diferentes entre ellas.

- *Route-Over* (L3 o *IP routing*). Este tiene mecanismos de enrutamiento ampliamente adaptado, se usa para tratar a cada huésped como un *router* en una subred independiente pero tiene problemas de eficiencia.
- Malla-Bajo (enrutamiento L2). En este caso se utiliza enrutamiento L2 para conectar dispositivos en la subred, mantiene la apariencia de red de tipo Ethernet, simplifica las capas superiores y proporciona multidifusión más eficiente.

5.3.10 IEEE 802.15.7

El estándar IEEE 802.15.7 son protocolos que se utilizan para las comunicaciones inalámbricas mediante luz visible. El estándar IEEE 802.15.7 define 2 características fundamentales, la capa de acceso (MAC) y la capa física (PHY), con una velocidad de datos que es capaz de soportar audio, vídeo y multimedia.

La capa de acceso al medio proporciona mecanismo de direccionamiento y control de acceso al canal que lo hace posible para varios terminales o dispositivos. El hardware que implementa la capa MAC se refiere al controlador de acceso al medio. Este canal puede proporcionar servicios de comunicación *multicast*, *unicast* o *broadcast* [118].

Las leyes físicas definen las especificaciones eléctricas y físicas para los dispositivos. Define la relación entre un dispositivo y el medio físico. Un dispositivo transmite datos al medio y otro dispositivo recibe los datos desde el medio basándose en las leyes físicas. Las funciones y servicios de la capa física son el establecimiento del enlace y la terminación de una conexión a un medio de comunicación. El estándar IEEE 802.15.7 presenta tres tipos de capa física diferentes, cada una con sus respectivas características. Estas son PHY I, PHY II y PHY III.

Ahora se van a explicar las diferentes capas PHY. Generalmente las capas PHY I y PHY II tienen transmisión SISO, es decir, una única entrada y una única salida, con una sola fuente de iluminación y que normalmente utiliza la modulación OOK (*On-Off Keying*) o VPPM (*Variable Pulse Position Modulation*). Mientras que en la capa PHY III es una comunicación MIMO, múltiples entradas y múltiples salidas, por lo tanto, capaz de soportar múltiples fuentes ópticas generalmente utilizando modulación por desplazamiento de color (CSK, *Color-Shift Keying*) [119].

5.3.10.1 Modelo PHY I

El modelo PHY I se utiliza generalmente en entornos exteriores donde no se necesita una velocidad muy elevada, en torno a las decenas a cientos de kb/s. Para este modelo se utiliza el siguiente diagrama de bloques, que se muestra en la Figura 5-5, para el transmisor y el receptor utilizando VLC [119].

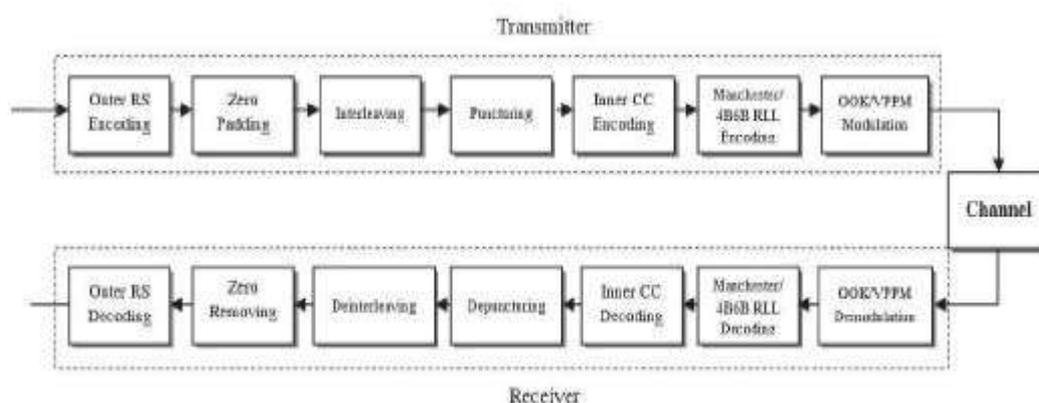


Figura 5-5. Transmisor y receptor PHY I [119].

Los bits de entrada entran, en primer lugar, en un bloque con un codificador Reed-Solomon (RS). El código Reed-Solomon es un código corrector de errores basado en bloques en donde el codificador procesa un bloque de símbolos de datos, a los que agrega redundancia para producir un bloque de símbolos codificados. Tras este bloque, entra en un codificador RLL, aplicando la codificación Manchester o 4B6B, teniendo a la salida un símbolo de 2, 4 ó 6 bits respectivamente. Finalmente pasa por el modulador, y se envía por el canal con una sola fuente de luz, ya que es un sistema SISO.

En el caso del receptor, para recuperar la información se utiliza un detector de umbral. Tras esto, se hace el proceso inverso al que se realizó en el transmisor. Esta información es demodulada, pasa por un bloque decodificador RLL y por otro RS.

5.3.10.2 Modelo PHY II

El modelo PHY II se utiliza en entornos internos en aplicaciones donde se requiere una velocidad media, en torno a las decenas de Mb/s [119].

De la misma manera, en la Figura 5-6, se mostrará un diagrama de bloques donde se indica el modelo de un sistema PHY II en el estándar IEEE 802.15.7.

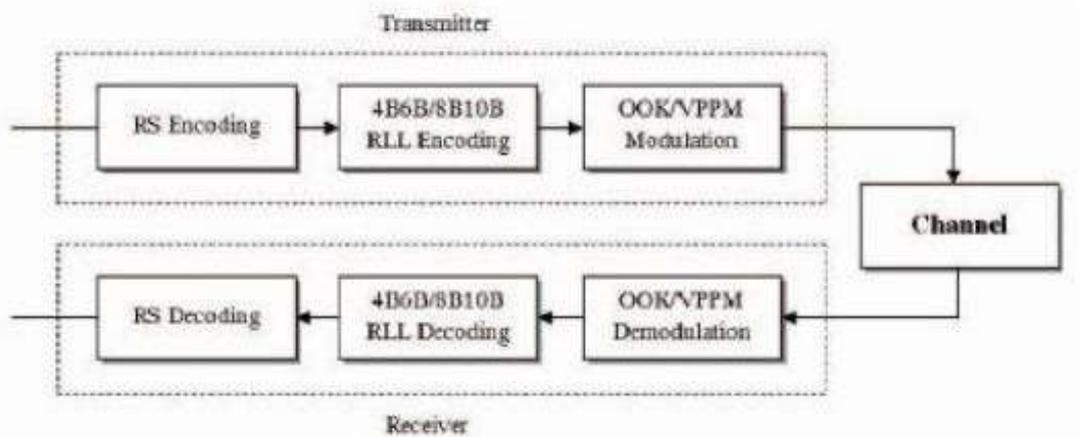


Figura 5-6. Transmisor y receptor PHY II [119].

Este esquema es más sencillo y eficiente que el utilizado en el modelo PHY I. Al igual que en el caso anterior, los bits de entrada se codifican mediante el codificador Reed-Solomon (RS) y la salida pasa por un codificador RLL. Finalmente, se modulará con la modulación deseada, generalmente OOK o VPPM.

En el lado del receptor, se demodula con la modulación correspondiente la señal recibida, y pasa por los decodificadores RLL y RS, para así recibir la información enviada.

5.3.10.3 Modelo PHY III

Al contrario que los modelos anteriores, este modelo opera bajo una transmisión MIMO, es decir, múltiples entradas y múltiples salidas, por lo tanto, se puede utilizar en aplicaciones con muchas fuentes de luz por donde se enviará la información a múltiples receptores [119].

En la Figura 5-7 se muestra el proceso y el comportamiento del diagrama de bloques del modelo PHY III del estándar IEEE 802.15.7.

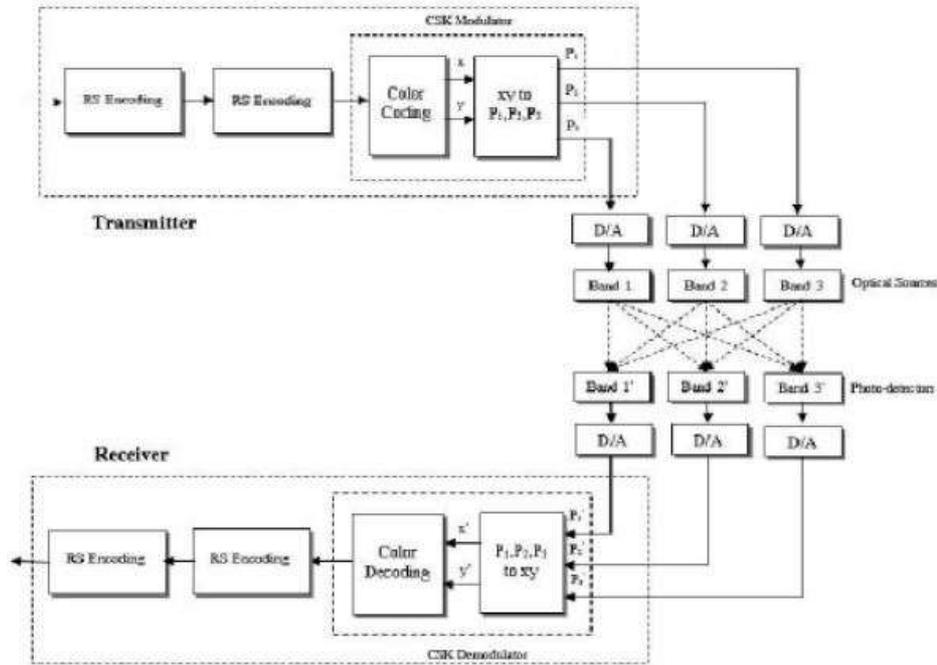


Figura 5-7. Transmisor y receptor PHY III [119].

Al igual que en los casos anteriores, la señal de entrada se codifica mediante un bloque de codificación RS, para convertir la trama larga de entrada en tramas más pequeñas y aleatorias, tras este bloque, hay otro bloque idéntico, un codificador RS. La diferencia con los otros modelos es el bloque de modulación, que suele ser CSK.

El espectro de luz visible 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 para poder componer la constelación formando los vértices del triángulo y así dar lugar a las constelaciones que son necesarias. Los datos que ingresan para ser modulados son primeros analizados en conjuntos de $\log(M)$, donde M representa el tamaño de la modulación. Cada uno de estos valores tiene una posición x-y, cada 3 valores van formando los vértices del triángulo que son la constelación, para luego estos puntos ser pasados a valores RGB, se normalizan las intensidades de los LEDs y se puede enviar la información.

En la parte del receptor, se realizará el proceso inverso. Se tienen tres fotodetectores, cada uno detecta un color diferente, ya que tienen tres longitudes de onda diferentes. Las intensidades recibidas son inversamente asignadas a los valores x-y, con la ayuda de un detector de distancia mínima se corrigen y se determinan los símbolos verdaderos de la constelación. Por último, la señal pasa por los dos codificadores RS y obtiene la información enviada.

6 APLICACIONES VLC

En este capítulo se van a desarrollar algunas de las aplicaciones más importantes de las comunicaciones por luz visible, en concreto las comunicaciones en interiores, las comunicaciones entre objetos, comunicaciones dentro de un sistema inteligente de transporte, posicionamiento y comunicaciones en entornos restringidos.

Las aplicaciones de VLC basadas en la iluminación de los LEDs son más atractivas en ambientes donde la luz siempre está encendida. La implementación es bastante fácil, ya que los datos se pueden proporcionar desde un punto de agregación a las luces mediante infraestructura existente como cables eléctricos.

Iluminación inteligente: Estos sistemas cooperan y controlan la iluminación en un espacio para atender las necesidades de los usuarios mientras ahorran energía. Los sistemas de iluminación inteligente forman redes de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Network*) para monitorizar factores como la intensidad de la luz, el color y control de la iluminación por atenuación [120]. Se han propuesto varios sistemas para combinar VLC y sistemas de iluminación inteligente, como por ejemplo, encender las luces en un área determinada solo cuando sea necesario, luz de intensidad baja para ver películas, luz brillante para leer y hacer videoconferencia. Recientemente Philips hizo “Hue”, un accesorio de iluminación inteligente que puede controlar el color y la atenuación utilizando un iPhone [121]. El sistema está en fase de desarrollo y planea utilizar GPS para encender automáticamente las luces cuando el usuario llega a casa. Los ordenadores portátiles, *smartphones* o televisiones inteligentes pueden utilizar en gran medida esta tecnología.

Comunicaciones por fibra óptica de plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*): Estas fibras son más baratas y flexibles, y actualmente han sustituido a la fibra óptica de cristal para enlaces de corto alcance. POF tiene ventana de atenuación más baja dentro del rango de longitud de onda entre 520-780 nm (entre el verde y rojo) pero, sin embargo, tienen mayor atenuación en comparación con la fibra óptica de cristal (GOF, *Glass Optical Fiber*) [122]. Por otra parte POF soporta las vibraciones mejor, tiene menor radio de curvatura y no tiene EMI. Además consigue tasa de transmisión a lo largo de varios metros [123].

Power Line Communication (PLC): PLC, también conocido como banda ancha de potencia (BoPL, *Broadband over Power Line*) utiliza la línea de potencia para transmitir información, donde las tomas de corriente eléctrica se pueden usar para encender los dispositivos, así como para recibir datos. Aunque esta tecnología existe desde hace tiempo, no ha adquirido importancia a nivel mundial, sino en países de Europa y de Asia [124]. PLC tiene que competir con el precio y la calidad de las líneas de suscripción digital, DSL, pero tiene la ventaja de las líneas de potencia, es decir, pueden alcanzar áreas remotas que DSL no cubre. PLC se ajusta muy bien a VLC, ya que los datos de la línea de potencia se pueden utilizar para modular LEDs directamente y además se puede alcanzar una velocidad de 600 Mbits/s [125].

Comunicaciones bajo al agua: La comunicación bajo el agua de alta velocidad, WSN (*Water Submarine Network*), se ha desarrollado durante los últimos años para su implementación en vehículos de operación remota y para la comunicación con buzos. La banda de frecuencia ISM de 2,4 GHz tiene ancho de banda y velocidad limitados debido a la alta atenuación en el agua del mar [126]. Los dispositivos de comunicación acústica son caros y tienen tasa de datos limitada debido a la baja velocidad de las ondas acústicas en el agua. Por lo tanto, las comunicaciones ópticas inalámbricas, incluyendo VLC, están siendo consideradas como método alternativo de comunicaciones bajo el agua de alta velocidad. En agua clara, la absorción de la luz visible es mayor en la parte roja del espectro, con una absorción mínima en torno a los 450 nm. Sin embargo, esto puede cambiar dependiendo de los constituyentes e impurezas del agua, como el plancton o las algas. Por

lo tanto, la longitud de onda se determina dependiendo de la aplicación y del entorno [127].

Las comunicaciones por luz visible permiten varias aplicaciones que aprovechan los LEDs instalados. Se espera que de aquí a unos años surjan muchas más aplicaciones que las mencionadas y que las que se van a desarrollar a lo largo de este capítulo.

6.1 Comunicaciones en interiores

Se considera que VLC sea uno de los candidatos fundamentales de las tecnologías de acceso a redes inalámbricas 5G para entornos interiores. La habilidad de explotar la luz visible en la banda de frecuencias no reguladas entre los 375 y 780 nm para la transmisión de datos proporciona algunas ventajas. El haz de luz es más seguro comparado con las ondas radio, no se propaga a través de las paredes y no causa interferencia electromagnética [128].

VLC se puede usar solo o combinándose con la tecnología de RF para aplicaciones domésticas. Se suele utilizar esta combinación con el fin de proporcionar cobertura en todo el área cuando la luz visible no puede acceder a todos los puntos [128].

En un sistema de comunicaciones VLC hay que tener en cuenta ciertas características, como por ejemplo la tasa de transmisión, el impacto del ruido de ambiente, pérdidas en el camino, dispersión o movilidad. Dependiendo del tipo de enlace, LOS o Non-LOS, estas serán mejor o peor para las comunicaciones por luz visible en interiores.

En los entornos interiores, se pueden encontrar infinidad de aplicaciones. Una de las más interesantes son los sistemas de localización en entornos interiores, que se desarrollarán en otro apartado del capítulo. A continuación se mencionan algunos escenarios típicos donde pueden aparecer los sistemas VLC en interiores.

Uno de los sistemas posible en entornos interiores es la difusión de información a múltiples usuarios por medio de VLC en una estación. Los enlaces de transmisión inalámbricos se podrían ofrecer a los pasajeros a través de la iluminación, por ejemplo, en las estaciones de metro o de tren o en el mismo vagón. La gran ventaja de esta aplicación es que la luz siempre está encendida sin tener cuenta la hora que es, por lo tanto se produce un ahorro de energético y de instalación, ya que la infraestructura de la iluminación se puede reutilizar. Este tipo de sistema de interior requiere la transferencia de datos de forma unidireccional o *streaming*, el sistema de transmisión sólo alcanzará unos metros y el receptor necesitará un campo de visión ancho [129].

La funcionalidad básica de una aplicación de este tipo es bastante similar a las aplicaciones inalámbricas ópticas tradicionales, en las que la velocidad alcanzada era baja y se usaba luz infrarroja, es lo que se conoce como control remoto. Sin embargo, la tecnología actual ofrece grandes mejoras, puede proporcionar velocidades de datos muy altas pudiendo alcanzar el rango de un gigabit por segundo.

Otra aplicación donde VLC se combina con la iluminación general es conocida como WiFi óptica o Li-Fi. En escenarios de red de área local inalámbricos, el enlace descendente se proporciona del mismo modo que el anterior. Sin embargo, en el enlace ascendente, desde el ordenador a un punto de acceso en el techo, se puede establecer, por ejemplo, el uso de un enlace infrarrojo LOS. Este sistema puede ofrecer una comunicación bidireccional con un amplio campo de visión en el enlace descendente y velocidades del rango de varios megabits por segundos o mucho más dependiendo de las condiciones de enlaces, LOS o Non-LOS. En el enlace ascendente, los sistemas infrarrojos alcanzarán una velocidad de pocos megabits por segundos, suponiendo que el transmisor y receptor están alineados [129].

Un campo de aplicación en entornos interiores es el intercambio de información de máquina a máquina, por ejemplo, mediante el intercambio de grandes volúmenes de información de manera inalámbrica dentro de células pequeñas y densas. También se supone que en los ambientes industriales puede haber severas condiciones electromagnéticas que van junto a las más altas demandas de seguridad y fiabilidad, por lo que es difícil o incluso imposible el uso de los sistemas de comunicación por radiofrecuencia. Por otro lado, los enlaces VLC LOS pueden proporcionar enlaces bidireccionales de alta velocidad. Un ejemplo de este tipo de comunicaciones son las pruebas de rendimiento de los productos sometidos al montaje mientras las unidades se mueven en una cinta transportadora y requiere el intercambio de información con un servicio central para evaluar al mismo tiempo [129].

6.2 Comunicaciones entre vehículos

En este apartado se van a desarrollar los sistemas VLC en espacios exteriores en una red de área de controlador (CAN, *Controller Area Network*) que generalmente se utiliza en coches, aviones, barcos, sistemas de control de línea de producto, dispositivos médicos y dispositivos industriales. Para comunicación entre vehículos (V2V, *Vehicle-to-Vehicle*) o para la comunicación en el interior del vehículo, estos sistemas son posibles gracias a las luces delanteras, traseras o las del interior [130].

Recientemente, gracias a las propiedades de las luces LED, que tienen una vida útil muy larga, son económicas y emiten luz visible con alta intensidad, estas han sido integradas en la iluminación de los coches, ya sea en los focos delanteros o traseros o en la iluminación interior. Gracias a la doble funcionalidad del LED, iluminación y comunicación, se podrían implementar sistemas V2V. Así que cuando se utilice el sistema de transporte inteligente, ITS (*Intelligent Transportation System*), se conseguirá más seguridad en las carreteras.

Los principales problemas de estos sistemas de comunicación por luz visible son el ruido procedente de la luz solar, la saturación del fotodetector, el método de la mejora de la distancia entre otros.

Para esta aplicación se utilizará la modulación OOK y la distancia máxima de comunicación serán aproximadamente 20 metros en horario de día y con condiciones exteriores favorables. Con condiciones meteorológicas malas, como lluvia o nieve, la cobertura que abarcará este sistema se reducirá considerablemente.

De acuerdo con el *Global Status report on road safety 2013: supporting a decade of action*, se produjeron alrededor de 1.24 millones accidentes de tráfico mortales en 2010 [131]. Como el número ha ido incrementando en estos años, se necesitan acciones inmediatas tanto para prevenir y reducir el número de accidentes de tráfico como para mejorar la seguridad de las carreteras. En un esfuerzo para mejorar la seguridad vial, el flujo del tráfico y las preocupaciones ambientales ha habido un interés creciente en el campo de los sistemas de transporte inteligentes. Los ITS conllevan las aplicaciones del procesado de información avanzado, tecnología de control, sensores y comunicaciones inalámbricas en un enfoque integrado para las mejoras en el funcionamiento de los sistemas de transporte por carretera [132].

6.2.1 Configuración del sistema

En la Figura 6-1 se muestra la configuración de los vehículos para un sistema V2V. Casi todas las señales de control se realizan mediante CAN, tales como las luces interiores y exteriores, el control del *airbag*, la velocidad del coche, etc.

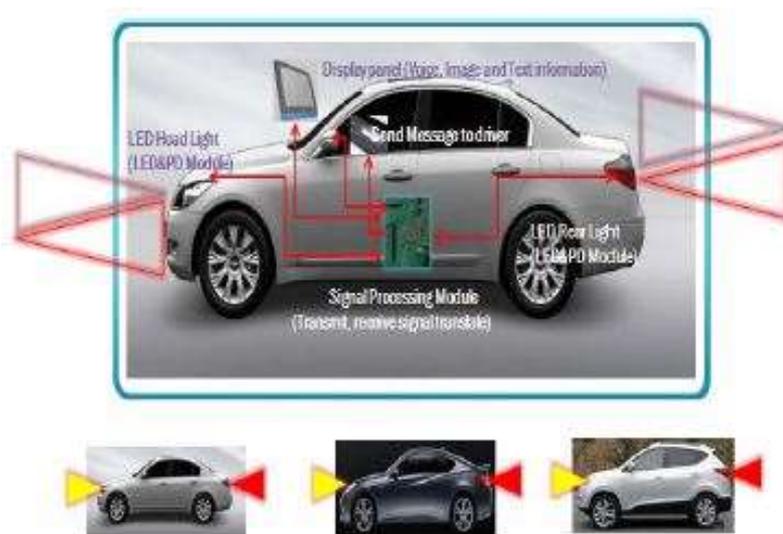


Figura 6-1. Configuración de los vehículos [133].

Las comunicaciones entre vehículos también se realizarán mediante redes de áreas controladoras. Por lo tanto, si el conductor recibe una señal CAN, obtendrá información de un vehículo cercano, como la dirección a la

querrá ir o incluso algún mensaje de texto del otro conductor. Así se consigue una conducción más cómoda y más segura. Como se muestra en la Figura 6-1, la luz delantera o trasera del coche transmisor emite una señal al módulo receptor de un coche cercano. Una vez recibida, la señal es procesada y enviada a la pantalla de panel del conductor [133].

La luz se emite en un único haz y la luz recibida es una combinación de la luz emitida en el trayecto directo y del reflejado, como se observa en la Figura 6-2. Estos dependen del material del pavimento, del ángulo de incidencia y de las condiciones meteorológicas. Debido al multitrayecto habrá interferencia que en las comunicaciones no son deseables [134].

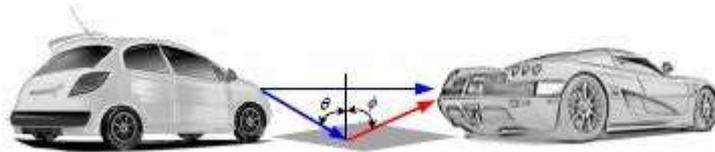


Figura 6-2. Rayo directo y reflejado [134].

En la Figura 6-3 se muestran los diagramas de bloques de un transmisor y receptor, respectivamente, para este tipo de aplicaciones. Para generar una señal digital se utiliza un dispositivo de generación CAN que genera señales de alta y baja intensidad. Estas señales son modificadas por el transceptor CAN. Los LEDs pueden modular señales digitales, cuando existe corriente se transmite un “1” y en caso contrario un “0”.

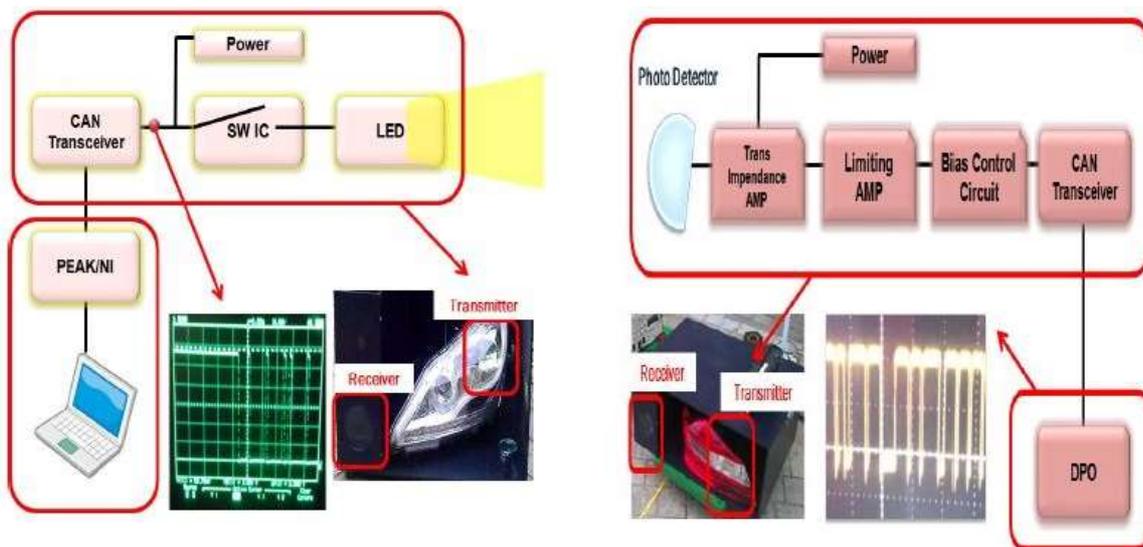


Figura 6-3. Diagrama de bloques transmisor y receptor [134].

En el receptor, el fotodetector detecta el cambio de luminancia y convierte los fotones en corriente, que llega a la transimpedancia TIA que es donde se transforma la intensidad en voltaje, ya que la mayoría de los circuitos integrados se basan en la conducción de tensión. Tras esto viene una etapa amplificadora, donde la señal eléctrica es convertida en potencia luminosa. El amplificador limitador tiene salida constante, si la señal eléctrica recibida tiene una potencia alta esta es decrementada por el amplificador limitador, y viceversa, si la señal recibida tiene una potencia baja, esta es aumentada, por eso en la salida del amplificador el valor siempre va a ser parecido. La salida del amplificador pasa por el controlador de sesgo que comprueba la componente DC que entrará al transceptor que dividirá la luz en luz de alcance o larga [135].

En los vehículos, tanto las luces de cruces como las largas son muy importantes para proporcionar una conducción segura y un ambiente confortable para los conductores y usuarios de carreteras tanto por la noche

como por el día. Las luces largas se utilizan para la visibilidad con distancias largas y sin coches alrededor, ya que deslumbrarían. Las luces de alcance proporcionan una iluminación delantera y lateral mientras minimizan el deslumbramiento de los coches de alrededor. Los faros de cruce proporcionan un patrón asimétrico diseñado para ofrecer la iluminación adecuada evitando el deslumbramiento [135].

La iluminancia E en la superficie de la carretera viene dada por la siguiente expresión:

$$E = \frac{d\phi}{dA} = \frac{d\phi}{d\omega} \frac{d\omega}{dA} = I(\alpha, \beta) \frac{d\omega}{dA} = I(\alpha, \beta) \frac{\cos\theta}{r^2}, \quad (6-1)$$

donde $d\phi$ es el flujo luminoso, dA es el área de la superficie de la carretera donde incide la luz, $d\omega$ es el ángulo sólido, $I(\alpha, \beta)$ es la intensidad luminosa, r es la distancia entre el transmisor y el área y θ es el ángulo que hay entre la superficie normal a la carretera y la dirección incidente.

6.2.2 Problemas

Los principales problemas causados son la luz solar, la saturación del fotodetector y la distancia de transmisión.

En los sistemas VLC V2V hay dos fuentes de ruido adicionales debido a la luz ambiental. La primera de ellas es la radiación de la luz solar y la otra es la luz artificial, como farolas, otros vehículos, letreros de neón, etc.

La luz solar se compone de la radiación directa y dispersa. La radiación directa compone la fuente de ruido dominante, pero hay que tener en cuenta que la intensidad de la radiación solar en la superficie terrestre depende de las condiciones atmosféricas, la hora del día y del periodo del año. La radiación por dispersión no es tan sencilla de modular de acuerdo con el ambiente circundante. La radiación solar se puede considerar como una corriente continua que se puede eliminar sencillamente mediante acoplamiento AC. Sin embargo, el ruido *shot* inducido por la radiación seguirá siendo la principal fuente de ruido para comunicaciones V2V en sistemas VLC durante el día [133].

La luz artificial induce interferencias de menor intensidad que la luz solar con el espectro de frecuencias en la región de baja frecuencia. Sin embargo, la interferencia provocada por luz artificial es el ruido dominante en estos sistemas durante la noche.

VLC generalmente utiliza modulación IM/DD, pero tiene el inconveniente de que en comunicaciones exteriores durante el día causa problemas de saturación en el fotodetector. Para superar este problema, se utiliza una pantalla de luz y un filtro. El ruido procedente de la luz solar tiene decenas de miles de lux mientras que la luz emitida por el LED tendrá sólo unas decenas de lux. Además el fotodetector está funcionando correctamente en el área del LED. Por lo tanto, el fotodetector quiere detectar la luz de la señal durante el día y para ello opera en la zona de saturación. Para superar el ruido de la luz solar y la saturación del PD, se transmite una señal con frecuencia portadora de 500 kHz, que será recibida y analizada por el dispositivo de espectro de radiofrecuencia [133].

A pesar de la importancia de los problemas anteriores, si la señal no llega al receptor, la señal no se podría reconocer y, por lo tanto, la comunicación sería imposible. Para resolver este problema de reconocimiento se diseña una lente óptica tanto para el transmisor como para el receptor. Para encontrar la distancia óptima que puede haber entre el transmisor y receptor hay que encontrar la posición adecuada de la lente del receptor y la distancia al fotodetector. Aplicando un diseño correcto a las lentes se mejora la distancia de comunicación llegando a alcanzar hasta 20 metros durante el día [135].

6.2.3 Reflexión en la superficie de la carretera

En un escenario V2V VLC, la potencia óptica recibida está generalmente compuesta por enlaces LOS y Non-LOS. Se considera que el patrón de reflexión de la superficie de la carretera es lambertiano. Se asume que $m=1$, por lo tanto la intensidad radiante reflejada, $R(\phi)$ se define como [134]:

$$R(\phi) = \rho \frac{\cos\phi}{\pi}, \quad (6-2)$$

donde ρ es la reflectividad difusa que depende del material del pavimento y ϕ es el ángulo polar de la dispersión de la luz. La Figura 6-4 muestra un enlace VLC para sistemas V2V, junto con el patrón de luz de cruce en la superficie de la carretera. Con el fin de tener una imagen más clara, sólo están dibujados los rayos emitidos por el foco delantero derecho. Hay que tener en cuenta que el fotodetector recibe la luz de ambos lados.

Como ambos lados tienen prácticamente la misma distribución de luz, se realizará el análisis matemático sólo para el lado derecho.

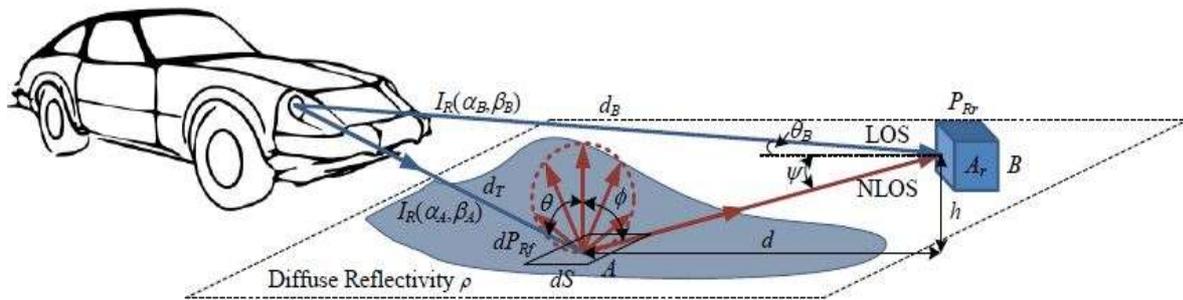


Figura 6-4. Superficie de la carretera [134].

De acuerdo con (6-2) la iluminancia vertical en la localización A con área dS , se expresa como:

$$E_{RA} = \frac{I_R(\alpha_A, \beta_A) \text{sen}\theta}{d_T^2}, \quad (6-3)$$

donde θ es el ángulo entre la dirección normal de la superficie de la carretera y la dirección incidente, $I(\alpha_A, \beta_A)$ es la intensidad luminosa del lado derecho desde la dirección (α_A, β_A) y d_T es la distancia que hay entre el foco y el punto A.

Teniendo en cuenta que la eficiencia luminosa de radiación, LER (*Luminaire Efficacy Rating*), se tiene que para el foco derecho, el flujo radiante vertical dP_{Rf} en el punto A viene dado por [134]:

$$dP_{Rf} = \frac{E_{RA} dS}{LER} = \frac{I_R(\alpha_A, \beta_A) \text{sen}\theta}{LER d_T^2} dS \quad (6-4)$$

Por lo tanto, la potencia óptica recibida desde un único camino reflejado en el fotodetector que está situado en el punto B, viene dada por:

$$dP_{Rr}^{NLOS} = \frac{dP_{Rf} R(\phi) A_r \cos\psi}{d^2 + h^2} = \frac{I_R(\alpha_A, \beta_A) \sin\theta \, dS \, A_r \, \rho \, \cos\phi \, \cos\psi}{LER \, d_T^2 \, \pi(d^2 + h^2)}, \quad (6-5)$$

donde A_r y h son el área y la altura del fotodetector, respectivamente, y d es la distancia del camino entre A y la proyección del fotodetector. Por lo tanto, para el foco derecho, la potencia óptica total recibida, P_{Rr}^{NLOS} , del camino reflejado, se expresa mediante [134]:

$$P_{Rr}^{NLOS} = \begin{cases} \iint_S dP_{Rr}^{NLOS} \, dS & 0 \leq \psi \leq \Psi \\ 0 & \psi > \Psi \end{cases}, \quad (6-6)$$

donde Ψ es la mitad del ángulo del campo de visión del fotodetector y S es el área total de la superficie de la carretera que está iluminada. La potencia óptica recibida desde el foco derecho para la ruta LOS se expresa:

$$P_{Rr}^{LOS} = \begin{cases} I_R(\alpha_B, \beta_B) A_r \cos(\theta_B) & 0 \leq \psi \leq \Psi \\ 0 & \psi > \Psi \end{cases}, \quad (6-7)$$

donde $I_R(\alpha_B, \beta_B)$ es la intensidad luminosa, θ_B es el ángulo entre la superficie normal del fotodetector y la dirección incidente. Por lo tanto, la potencia óptica total recibida, P_{Rr} , del foco derecho se expresa mediante:

$$P_{Rr} = P_{Rr}^{LOS} + P_{Rr}^{NLOS} \quad (6-8)$$

Consecuentemente, la potencia óptica recibida total se expresa por:

$$P_r = P_{Rr} + P_{Lr}, \quad (6-9)$$

donde P_{Lr} es la potencia óptica recibida del foco izquierdo. Tiene la misma fórmula matemática que P_{Rr} , lo único que les diferencia es el lado en el que se encuentran [134].

6.3 Posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento basados en VLC determinan la posición de un dispositivo móvil a través de señales recibidas desde estaciones base cercanas, en este caso, una fuente de luz. Esta señal visible puede contener el identificador y las coordenadas de la estación base u otro tipo de información que sea útil.

Como en VLC se puede utilizar como receptor un fotodiodo, o también un sensor de imagen. Las ventajas que un tipo de receptor tiene sobre el otro determina la técnica que se utilizará para posicionamiento. Según las

características de estos, se utilizarán en un método u otro [136].

- **Fotodiodo:** Tanto en sistemas VLC como en sistemas infrarrojos, los fotodiodos convierten cualquier flujo luminoso en una corriente y no pueden separar señales de diferentes fuentes de luz. Los fotodiodos tienen un tiempo de respuesta alto que hace posible medir tiempos pequeños de señal de llegada. Por lo tanto, los fotodiodos se suelen usar en técnicas de posicionamiento que muden tiempo.
- **Sensor de imagen:** Además de los fotodiodos, los sensores de imagen también se utilizan como receptores en VLC. La velocidad del fotograma es bastante lenta en comparación con el tiempo de respuesta del fotodiodo. Sin embargo, la capacidad del sensor de imagen para capturar imágenes del ángulo y la distancia de la fuente de luz y otra información puede ser derivada. También tiene la posibilidad de separar señales procedentes de diferentes fuentes de luz.

El posicionamiento con alta precisión y rendimiento fiable es una necesidad urgente que se ha convertido en los últimos años en una de las características más destacables en sistemas inalámbricos. Los sistemas de localización GPS no son precisos ni fiables en ciertas áreas como en ambientes interiores, debido a la fuerte absorción de la onda portadora por los materiales, y en entornos urbanos ya que los edificios altos provocan una obstrucción en el enlace. En estos escenarios, los sistemas de comunicación por luz visible pueden ayudar a obtener información de la posición en tiempo real a los usuarios móviles gracias a que las fuentes de la señal de las infraestructuras locales de luz no están afectadas por el entorno [136].

6.3.1 Sistemas de posicionamiento interior

Recientemente, el uso de LEDs VLC u otras fuentes de luz ha sido considerado como una de las soluciones más atractivas para los sistemas de posicionamiento en interiores debido a todas las ventajas que presentan [137]:

- **Mejor precisión de posicionamiento:** Hay propuestas muchas soluciones de posicionamiento en interiores basadas en técnicas de ondas de radio. Las tecnologías inalámbricas asociadas con estas soluciones incluyen WLAN, la identificación por radiofrecuencia (RFID, Radio Frequency Identification) , banda ultra-ancha celular (UWB, *Ultra Wideband*), Bluetooth, etc. Estos métodos proporcionan precisiones de posicionamiento de decenas de centímetros a varios metros [ref]. Se espera que los sistemas basados en VLC puedan proporcionar una mejor precisión de posicionamiento que las soluciones de ondas de radio, ya que sufren menos efectos multitrayecto e interferencia de otros dispositivos inalámbricos.
- **No genera ninguna interferencia de radiofrecuencia:** Aparte de la alta precisión que proporcionan los sistemas VLC comparándolos con los sistemas de RF, la radiofrecuencia electromagnética trae consigo interferencias para muchos ambientes interiores. Por un lado, la radiación electromagnética generada por estas técnicas ocupará la banda móvil limitada ya congestionada, degradando aún más el rendimiento de otros dispositivos inalámbricos. Por otro lado, ya que la interferencia de radiofrecuencia puede desactivar ciertos tipos de dispositivos médicos, la radiación de radiofrecuencia está limitada, o incluso prohibida en los hospitales, así como en muchos otros lugares que tienen preocupaciones de interferencia.

Por el contrario, los sistemas de VLC para fines de comunicación o posicionamiento no generan ninguna interferencia con los sistemas de RF y por lo tanto son más seguros para usar en el interior de los centros sanitarios. Los LEDs se pueden utilizar para llevar a cabo diferentes formas de información.

- **Reutilizar las infraestructuras actuales de iluminación:** Las técnicas de posicionamiento en base a ultrasonido y otras ondas acústicas ofrecen una precisión de hasta varios centímetros. Sin embargo, requieren de una red densa, que a veces puede aumentar drásticamente el coste del sistema. Por el contrario, los sistemas basados en VLC permiten la reutilización de las infraestructuras actuales de luz y por lo tanto se asegura una amplia cobertura. Al mismo tiempo, se necesita poca o ninguna actualización para proporcionar servicio, por lo tanto, los sistemas basados en VLC también ofrecen soluciones muy económicas para los requisitos de posicionamiento en interiores.

6.3.1.1 Navegación interior, luz visible y mapa digital

La luz visible se puede utilizar de forma independiente para interiores con finalidad de navegación en un

edificio. Si un usuario quiere ir a una sección específica de un edificio, como por ejemplo, de una biblioteca, un museo o un centro comercial, se puede hacer mediante comunicaciones por luz visible.

Las tecnologías actuales se están utilizando para este propósito. Sin embargo VLC tiene una ventaja sobre todas ellas, no hace falta infraestructura de hardware supletoria. Las luces instaladas anteriormente en los locales se pueden usar tanto para la iluminación como para fines de comunicación de datos.

Los principales requisitos en los sistemas de seguimiento fiable de personas u objetos son que la interferencia con otros dispositivos sea mínima, así se puede utilizar en lugares peligrosos o en entornos sensibles, y alta seguridad con respecto a la interceptación, que gracias a que la luz no puede atravesar paredes proporciona seguridad. La desventaja de estos es que la energía del rayo de luz se decrementa con la distancia.

Mapear un edificio significa recopilar información correspondiente de la disposición del edificio y la conversión de esta información en un formato que sea útil para otros procesos. Al utilizar el mapa de un edificio se extraen los datos correspondientes a la ubicación, al tamaño de las paredes, los pasillos, puertas, plantas, escaleras, ascensores, ventanas, etc. Se determina la posición en el mapa con respecto a otros lugares, como por ejemplo, número de piso o de planta. El proceso de navegación encuentra la ruta más corta desde la localización actual al destino deseado utilizando identificación en los sistemas VLC a lo largo del edificio [137].

En la Figura 6-5 se muestra el algoritmo que se utiliza para este proceso. Por ejemplo, en un museo, a los visitantes se les puede proporcionar la facilidad de navegar a la sección deseada utilizando sus teléfonos inteligentes. Cada célula de luz transmitirá su único identificador. El receptor fotodetector estará implementado en el *smartphone* para recibir la información del identificador. La aplicación instalada en el teléfono del visitante se utiliza para determinar la posición del visitante correspondiente a cada identificador. Esta aplicación utiliza un mapa digital del museo y recibe el identificador exacto de la luz y la ruta más corta al destino deseado. A medida que el usuario se mueve, la ubicación y la ruta correspondiente se irán actualizando.

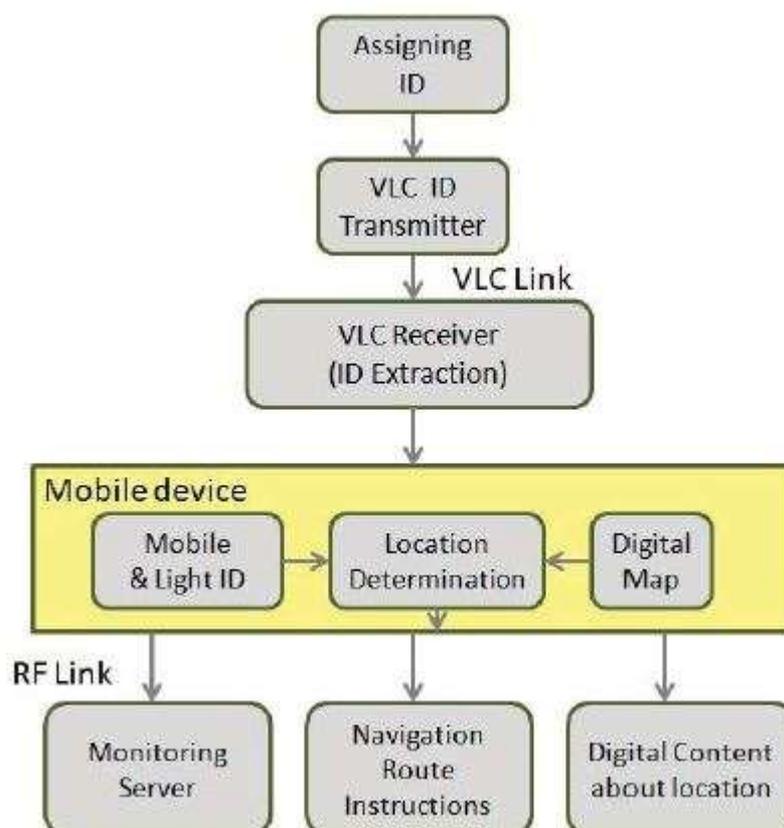


Figura 6-5. Algoritmo de localización [137].

6.3.1.2 Seguimiento interior, luz visible y WiFi

En los edificios donde WiFi está disponible, VLC se puede utilizar para seguimiento junto con la ruta de navegación y acceso y contenidos digitales de localización. La infraestructura adicional necesaria para este fin es un servidor de monitorización central y un enlace RF establecido entre el dispositivo móvil y el servidor. El servidor de monitorización central contiene la base de datos de cada persona y todas las localizaciones correspondiente a cada identificador de luz. Tan pronto como se detecta el identificador de la luz, se envía al servidor de monitorización junto con el identificador de la persona a través del enlace WiFi. El servidor procesa la información para conseguir la localización exacta y muestra la posición de la persona en el edificio.

Esto es útil en edificios públicos, por ejemplo, cuando un visitante entra en un edificio se registra en recepción y se le proporciona un fotodetector y una aplicación software de localización en su teléfono móvil. Mientras esté en movimiento su teléfono tomará el identificador de luz correspondiente y se transmitirá junto su identificador de usuario mediante un enlace de RF al servidor de monitorización y su localización se estará actualizando continuamente. Además de la información de la ubicación, mediante este sistema también se podrá conseguir información relacionada con la ubicación, por ejemplo en un museo de la obra de arte que se está viendo. Los puntos de luz integrados en el sistema VLC sobre objetos en el museo se pueden utilizar para transformar información a los visitantes y el receptor, en este caso el teléfono móvil, guía a los visitantes por medio de voz, video o texto de información. Estos puntos de luces envían datos tales como la información de un objeto del museo. El uso de dispositivos móviles es la manera más sencilla para implementar esta tecnología en museos, galerías, centros comerciales, etc [138].

6.3.1.3 Algoritmos de posicionamiento

Las investigaciones en este campo demuestran que los algoritmos de posicionamiento propuestos se organizan en tres tipos: triangulación, análisis de escena y proximidad [139].

6.3.1.3.1 Triangulación

La triangulación es el nombre general de algoritmos de posicionamiento que utiliza propiedades geométricas de los triángulos para la estimación de la localización. Tiene dos métodos, lateración y angulación. En los métodos de lateración, la ubicación del destino se estima mediante las medidas de distancias desde múltiples puntos de referencia. Para los sistemas de posicionamiento interior VLC, los puntos de referencia son fuentes de luz y el destino un receptor óptico. Las distancias son casi imposibles de calcular directamente pero hay otros métodos matemáticos que lo consiguen, como por ejemplo, la fuerza recibida de la señal o RSS (*Received Signal Strength*), el tiempo de llegada o TOA (*Time of Arrival*), o la diferencia de tiempo de llegada o TDOA (*Time Difference of Arrival*). Por otro lado, el método de angulación mide ángulos en relación con varios puntos de referencia, AOA (*Angle of Arrival*), después de esta estimación de localización se buscan los puntos de intersección de las líneas de dirección las cuales son puntos de referencia.

6.3.1.3.2 Triangulación, lateración circular

Los métodos de triangulación lateral principalmente utilizan dos tipos de medida: el TOA o RSS.

Gracias a que la velocidad de la luz es constante en el aire, la distancia entre la fuente de luz y el receptor es proporcional al tiempo de viaje de las señales ópticas. En los sistemas TOA, se requieren mediciones del tiempo de llegada con respecto a las tres fuentes de luz para localizar un objetivo, dando lugar a intersecciones de tres círculos en escenarios bidimensionales o de tres esferas si el escenario es tridimensional. Un ejemplo de los sistemas TOA es el GPS. En este sistema, los mensajes de navegación se envían desde satélites que contienen información de tiempo (en forma de un método de distancia) y de efemérides (información de órbita para todos los satélites). Después de recibir los mensajes de navegación desde más de tres satélites, la lateración circular se realiza para determinar la ubicación del receptor. Sin embargo, todos los relojes utilizados por los transmisores y por el receptor tienen que estar perfectamente sincronizados. Para aplicaciones interiores, la precisión de posicionamiento debe oscilar entre decímetros y centímetros [140].

Los sistemas basados en RSS calculan las pérdidas de propagación de la señal emitida mediante la fuerza de la señal recibida. La distancia estimada se calcula usando un modelo de pérdidas de propagación apropiado. Como en los sistemas TOA, la estimación de la posición destino se obtiene por una lateración circular. Debido a los canales disponibles con visibilidad directa en la mayoría de entornos interiores, se considera usar el método RSS en sistemas VLC ya que ofrecerán un buen rendimiento. Se considera que la precisión que se

puede alcanzar es de aproximadamente 2.5 cm suponiendo una velocidad típica del receptor.

Se va a introducir una expresión matemática para el espacio bidimensional, para espacios tridimensionales la expresión es similar. La posición del transmisor i se denotará mediante (X_i, Y_i) y la posición del receptor mediante (x, y) . Si la distancia entre el transmisor i y el receptor es R_i , se puede expresar como [140]:

$$R_i^2 = (X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2, \quad (6-10)$$

donde $i=1, 2, \dots, n$ y n es el número de transmisores o puntos de referencia. Si la medida del alcance está libre de ruido, la intersección de las circunferencias de la ecuación debe producir la posición del receptor como único punto, tal como se muestra en la Figura 6-6. Como en los sistemas reales siempre hay una componente de ruido, conduce a múltiples soluciones al sistema descrito por la ecuación. En este caso, la solución por mínimos cuadrados proporciona una solución bastante aproximada.

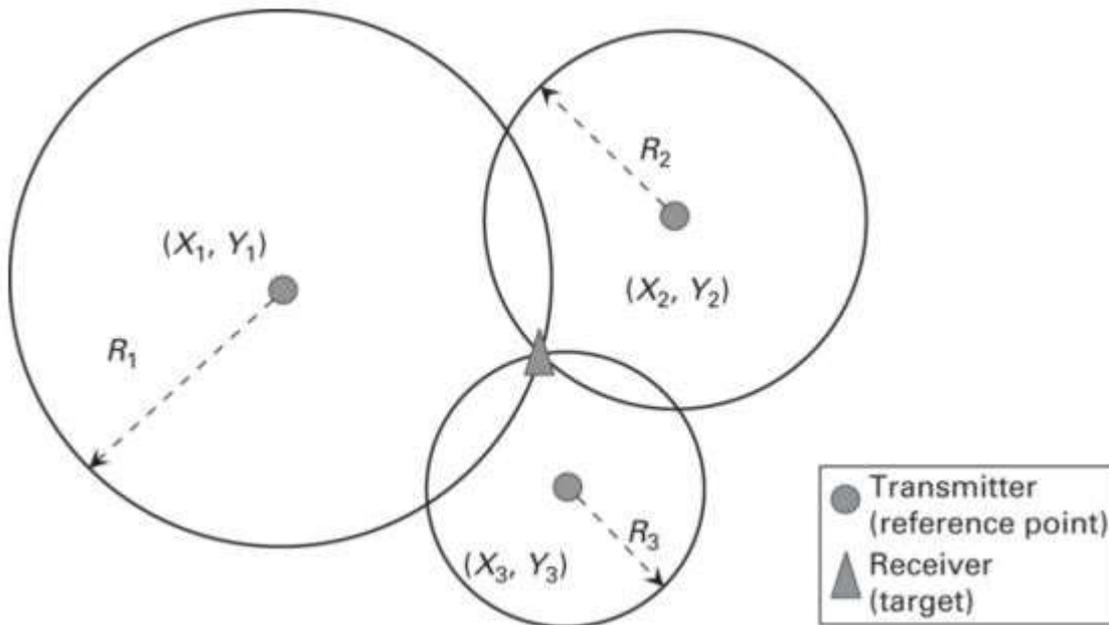


Figura 6-6. Esquema lateración circular [140].

Teniendo en cuenta que:

$$R_i^2 - R_1 = (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 - (x - X_1)^2 - (y - Y_1)^2 = X_i^2 + Y_i^2 - X_1^2 - Y_1^2 - 2x(X_i - X_1) - 2y(Y_i - Y_1), \quad (6-11)$$

donde $i=1,2,\dots, n$. Reescribiendo el sistema en forma matricial, se tiene:

$$AX = B, \quad (6-12)$$

donde

$$X = [x \ y]^T \quad (6-13)$$

$$A = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 \\ \vdots & \vdots \\ X_n - X_1 & Y_n - Y_1 \end{bmatrix} \quad (6-14)$$

$$B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (R_1^2 - R_2^2) + (X_2^2 - Y_2^2) - (X_1^2 - Y_1^2) \\ \vdots \\ (R_1^2 - R_n^2) + (X_n^2 - Y_n^2) - (X_1^2 - Y_1^2) \end{bmatrix} \quad (6-15)$$

La solución de mínimos cuadrados viene dada por:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (6-16)$$

6.3.1.3.3 Triangulación, lateración hiperbólica

Los métodos de lateración circular normalmente están asociados a mediciones TDOA. Estos sistemas se diseñan para que las señales de luz se transmitan desde distintos transmisores simultáneamente. Esto se puede conseguir muy fácilmente si todos los LEDs están próximos unos de otros, así pueden compartir el mismo reloj. El receptor mide la diferencia en el momento que llegan estas señales. Por otro lado el receptor no necesita estar sincronizado con los transmisores, ya que no trata de obtener el tiempo absoluto de información de llegada.

Tanto en los sistemas TOA como en RSS, se necesitan tres fuentes de luz para permitir el posicionamiento 2D o 3D. Debido a que una única medición con dos fuentes de luz implementadas proporciona una hipérbola en un plano bidimensional o un hiperboloide en un espacio tridimensional. Por lo tanto, se requieren dos mediciones para localizar el destino mediante el uso de lateración hiperbólica. En vez de realizar medidas TDOA directamente, se toman otras medidas y mediante ellas, se calcula la información TDOA. Las señales emitidas de dos LEDs generan interferencia en el receptor, ya que ambos utilizan la misma frecuencia. La información TDOA se obtiene mediante la detección de diferencias de fase entre tres señales con diferentes frecuencias. Las simulaciones por ordenador tienen una precisión de posicionamiento de 1.8 mm [140].

Para expresar matemáticamente la lateración hiperbólica en un espacio de dos dimensiones, se utiliza la notación utilizada en la lateración circular, cada hipérbola es un conjunto de posibles ubicaciones del receptor por una sola medición de diferencia de la distancia. Cada hipérbola se puede expresar por:

$$D_{ij} = R_i - R_j = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2}, \quad (6-17)$$

donde D_{ij} es la diferencia entre las distancias R_i y R_j correspondientes a los puntos de referencia i y j respectivamente siendo $i \neq j$. Teniendo en cuenta:

$$(R_1 - D_{i1})^2 = R_i^2 \quad (6-18)$$

$$X_i^2 + Y_i^2 - X_1^2 - Y_1^2 - 2x(X_i - X_1) - 2y(Y_i - Y_1) - D_{i1} - 2D_{i1}R_1 = 0, \quad (6-19)$$

donde $i=1,2,\dots,n$. Si se reescriben las ecuaciones en forma matricial:

$$AX = B, \tag{6-20}$$

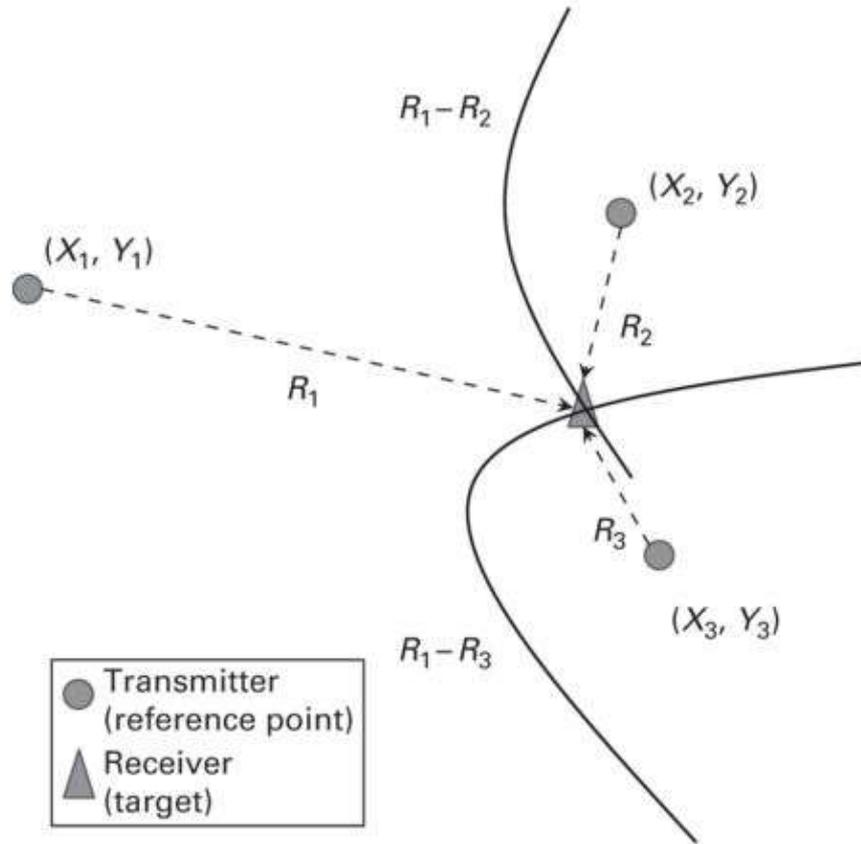


Figura 6-7. Lateración hiperbólica [140].

Donde

$$X = [x \ y \ R_1]^T \tag{6-21}$$

$$A = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & D_{2,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n - X_1 & Y_n - Y_1 & D_{n,1} \end{bmatrix} \tag{6-22}$$

$$B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (R_1^2 - R_2^2) + (X_2^2 - Y_2^2) - (X_1^2 - Y_1^2) - D_{2,1}^2 \\ \vdots \\ (R_1^2 - R_n^2) + (X_n^2 - Y_n^2) - (X_1^2 - Y_1^2) - D_{n,1}^2 \end{bmatrix} \tag{6-23}$$

La solución de mínimos cuadrados viene dada por:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (6-24)$$

6.3.1.3.4 Triangulación, angulación

En sistemas AOA, el receptor mide ángulos de las señales recibidas desde varios puntos de referencia. La ubicación del destino se determina como la intersección de las líneas de dirección. Se necesitan dos fuentes de iluminación para sistemas bidimensionales y tres para posicionamiento tridimensionales.

La gran ventaja de los sistemas AOA es que no necesitan tiempo de sincronización. Otra ventaja es que es relativamente más fácil de detectar la AOA de las señales recibidas en el dominio óptico con un receptor de formación de imágenes, en comparación con el empleo de redes de antenas complejas utilizadas con ondas de radio. Para alcanzar un buen rendimiento para sistemas reales, la infraestructura de la luz se debe ajustar ya que la mayoría de los receptores tienen un campo de visibilidad muy limitado. Más general, la precisión de posicionamiento de un sistema AOA se degradará cuando el destino esté más alejado de la fuente de luz debido a la limitada resolución espacial de los receptores de imágenes. Se conseguirá una precisión de posicionamiento de 5 cm cuando se utilice un receptor de imagen con una resolución de 1296 x 964 píxeles [140].

Para obtener la solución de mínimos cuadrados para un sistema AOA, se denota α_i como el ángulo de llegada medido con respecto al transmisor i , viene dado como:

$$\tan \alpha_i = \frac{y - Y_1}{x - X_1} \quad (6-25)$$

$$(y - Y_1) \cos \alpha_i = (x - X_1) \sin \alpha_i \quad (6-26)$$

Para tener un sistema matricial se reescriben las ecuaciones:

$$AX = B, \quad (6-27)$$

donde

$$X = [x \ y]^T \quad (6-28)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \\ \vdots & \vdots \\ -\sin \alpha_n & \cos \alpha_n \end{bmatrix} \quad (6-29)$$

$$B = \begin{bmatrix} Y_1 \cos \alpha_1 - X_1 \sin \alpha_1 \\ \vdots \\ Y_n \cos \alpha_n - X_n \sin \alpha_n \end{bmatrix} \quad (6-30)$$

La solución de mínimos cuadrados viene dada por:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (6-31)$$

6.3.1.4 Análisis de la escena

El análisis de la zona se refiere al algoritmo de posición que utiliza las huellas digitales asociadas con cada punto de anclaje del sistema. El destino está situado, haciendo coincidir en tiempo real, mediciones a estas huellas digitales. Los métodos de medición que se pueden utilizar incluyen los mencionados anteriormente, TOA, TDOA, AOA y RSS, siendo este último el que más se utiliza. El tiempo que se necesita para hacer coincidir las huellas digitales es más corto que la realización del algoritmo de triangulación, ahorrando una gran cantidad de tiempo y energía. Sin embargo, esta solución también tiene una importante desventaja, no se puede implementar sin antes utilizar un sistema preciso de calibración. Un sistema VLC con cuatro LEDs utilizando este método puede lograr una precisión de 4,38 cm [141].

6.3.1.5 Proximidad

Los sistemas basados en proximidad se basan en una densa retícula de luz, cada una teniendo una posición conocida y un identificador hardware único. Cuando el destino recibe la señal desde una única fuente de luz, se considera que está co-ubicada con la fuente. Sin embargo, cuando la señal se recibe desde múltiples fuentes, se lleva a cabo el promedio. Los sistemas de proximidad utilizando VLC proporcionan teóricamente una precisión que no es mayor a la resolución de la propia red de iluminación. Hay que tener en cuenta que cuando se emplean redes densas, se necesita un haz de luz estrecho desde las fuentes de luz para evitar interferencias en determinados puntos [142].

6.3.2 Sistemas de localización exterior

Los métodos de posicionamiento utilizando sistemas VLC tienen el potencial de convertirse en un método estándar para el posicionamiento en el futuro. Aunque se han propuesto recientemente muchos sistemas de posicionamiento en interiores, hay muy pocos en sistemas exteriores trabajando con comunicaciones por luz visible, ya que surgen problemas cuando se utiliza luz visible para el posicionamiento en entornos exteriores, como el ruido ambiental, los defectos ópticos en las lentes, entre otros [143].

Ruido de luz ambiental: VLC es susceptible al ruido de luz ambiental, especialmente cuando el receptor que se utiliza es un fotodiodo. Durante el día, la luz procedente del sol tiene miles de lux, mucho más alto que el LED típico de las comunicaciones en sistemas VLC en interiores y por lo tanto es muy complicado para el fotodetector percibir la señal de luz cuando compite con la luz solar.

Resolución del reloj, tiempo de respuesta del fotodiodo, velocidad del fotograma del sensor de imagen y sincronización: Cuando se utiliza el posicionamiento basado en la medición del tiempo como TDOA o TOA, la resolución del reloj necesita ser muy alta para que se pueda medir cantidades de tiempo muy pequeñas. Como regla general, un error de tiempo de 1 nanosegundo puede conducir a un error de estimación de 30 cm, que es la distancia de la luz que viaja durante 1 nanosegundo. Incluso con un reloj de alta resolución, la exactitud de la medición del tiempo depende de la velocidad de respuesta de los fotodiodos, así como de la velocidad de los fotogramas de los sensores de imagen. Cuanto mayor sea el tiempo de respuesta y la velocidad de fotogramas, el tiempo medido será más preciso.

Para un posicionamiento basado en el tiempo, la sincronización entre las estaciones base, y entre las estaciones base y dispositivos móviles son requisitos previos. La sincronización entre las estaciones bases, que están a una distancia cercana entre sí, se puede lograr con gran precisión a través de las conexiones de cable. La sincronización entre las estaciones base y los dispositivos móviles es mucho más difícil de lograr, especialmente en ambientes exteriores. Esto es debido a que todos los métodos de sincronización se basan en algún tipo de intercambio de mensajes entre los transmisores y receptores, y la medición de tiempo en ambos lados. Incluso si la medición del tiempo se puede adquirir con precisión con los fotodiodos, algunas de las dificultades en los sistemas VLC como ruido de la luz ambiental, hace que sea muy difícil lograr una buena sincronización entre las estaciones base y los dispositivos móviles en entornos exteriores [143].

Distorsión de la lente: La exactitud de los métodos que utilizan sensores de imagen se determina por la calidad óptica de las lentes unidas a ellos. El mayor problema de la lente para el posicionamiento es la distorsión del objetivo que se dobla, de escenas en línea recta a una imagen de líneas no rectas.

Todas las lentes tienen el problema de distorsión. Las lentes con un ángulo de visión más estrecho tendrán menor distorsión. Sin embargo, si el ángulo de visión es demasiado pequeño, el sensor de imagen necesita dirigir hacia la fuente de luz correcta para recibir señales. En aplicaciones exteriores, las estaciones base

pueden estar distantes entre sí, y el dispositivo móvil podría actuar con rapidez, por lo que es más difícil de usar lentes de ángulo estrecho.

6.3.2.1 Sistema de posicionamiento

En ambientes exteriores, se necesita la posición precisa de un vehículo para proporcionar un servicio de navegación fiable en algunos lugares urbanos donde el GPS tiene un bajo rendimiento debido a la obstrucción del enlace y al multirayecto. Se necesitan métodos eficaces para mejorar la seguridad del conductor. Para ello, se proponen métodos de navegación basados en visión y de cámaras con LED. Con la gran cantidad de semáforos con luces LED utilizándose en todo el mundo, se han propuesto para obtener información de la posición del vehículo. Todos estos métodos necesitan una cámara de alta velocidad y de procedimientos de procesado de imagen para generar la posición del vehículo [144].

En los sistemas LPS (*Local Positioning System*) en exteriores, la señal de luz emitida desde un semáforo llevara información de localización y la recibirán dos fotodiodos colocados en la parte frontal del coche para que sea posible un enlace VLC. Por lo tanto, la posición del vehículo se estimará mediante la información de posición enviada por el semáforo y la diferencia del tiempo de llegada de esa información al receptor (TDOA).

6.3.2.2 Sistema de posicionamiento de luz

Se considera un sistema LPS compuesto por uno o varios semáforos y dos fotodiodos. La señal de luz es emitida por el semáforo portando información de ubicación de la luz y recibida por los dos fotodiodos que están colocados en la parte delantera del vehículo. Con la diferencia de tiempo, Δt , entre que se emite la señal y llega al receptor, con el método TDOA, la distancia entre el semáforo y los dos fotodiodos se da como $S=c\Delta t$, donde c es la velocidad de la luz [145]. Ya que una hipérbola está formada por un conjunto de puntos que tienen la misma diferencia de distancia a dos puntos fijos, el semáforo está en una hipérbola determinada por las diferencias de camino y la separación de los dos fotodiodos que son los dos focos de la hipérbola. Considerando que el centro de los dos fotodiodos es la posición del vehículo, el sistema puede estar formado por dos hipérbolas determinadas por un semáforo y dos fotodiodos o por dos semáforos y dos fotodiodos se pueden derivar la posición relativa del semáforo con vehículo y por tanto la posición absoluta del vehículo. En ambos sistemas se asume una perfecta sincronización entre los semáforos emisores y los fotodiodos [146].

6.3.2.2.1 LPS con un semáforo

Como se muestra en la Figura 6-8, cuando la señal luminosa procede de un solo semáforo T_1 es capturada por los dos fotodiodos, y se puede generar la primera hipérbola determinada por los Δt_1 del método TDOA y por la distancia de los dos fotodiodos, F_1 y F_2 , en el instante t_1 . Cuando el vehículo se mueve hacia el semáforo la segunda se obtiene gracias a Δt_2 , y la distancia de los fotodiodos, F'_1 y F'_2 , en el instante t_2 . La posición relativa del semáforo al vehículo se puede calcular por los puntos de intersección T_1, T_2, T_3, T_4 de las dos hipérbolas y algunas restricciones [146].

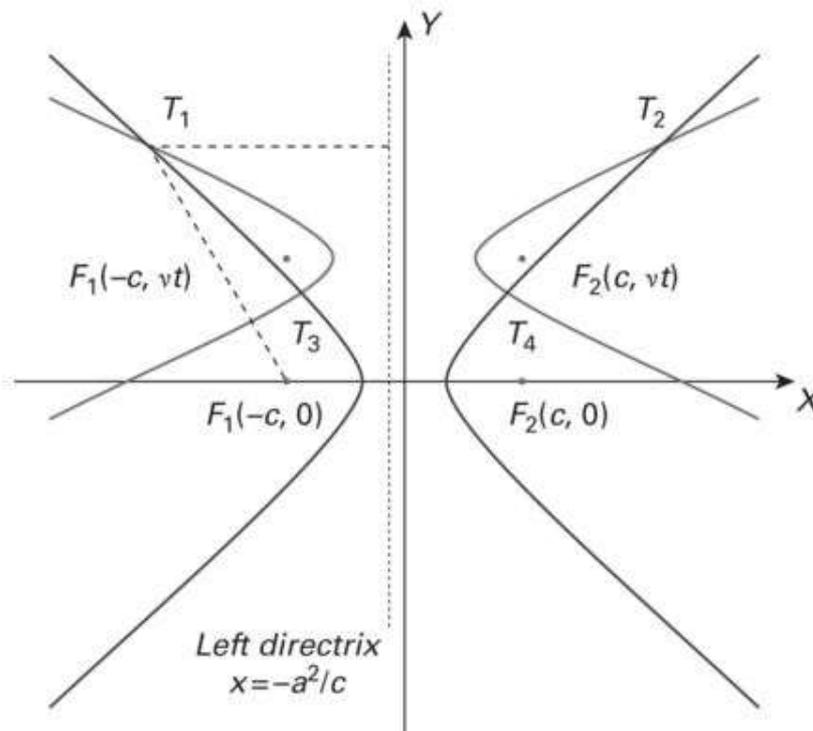


Figura 6-8. LPS con un semáforo [146].

Hay que tener en cuenta que hay diferentes representaciones de una hipérbola. Una representación general es que para cualquier punto de la hipérbola la diferencia de la distancia de los dos focos es fija, dada por $\| (x, y) - (c, 0) \| - \| (x, y) - (-c, 0) \| = 2a$. La segunda forma matemática es:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \tag{6-32}$$

donde $c^2 = a^2 + b^2$. El parámetro a determina el punto de cruce de la hipérbola con el eje x . Sin embargo, la nomenclatura que se va a utilizar, se va a basar en el radio fijo de la distancia de un foco a una línea para obtener un estimador más sencillo.

Una hipérbola también se puede definir como el lugar geométrico de puntos cuya distancia desde el foco es proporcional a la distancia horizontal desde una línea vertical conocido como directriz de sección cónica y el radio es la excentricidad, donde c es el punto medio de los dos fotodiodos y $a = \frac{\Delta s}{2}$ es una media de la diferencia de camino desde el semáforo a los dos fotodiodos [146].

$$\| (x, y) - (-c, 0) \| = e_1 \left[x - \left(-\frac{a_1}{e_1} \right) \right] \tag{6-33}$$

$$\| (x, y) - (-c, \Delta y) \| = e_2 \left[x - \left(-\frac{a_2}{e_2} \right) \right], \tag{6-34}$$

donde (x, y) es la posición del semáforo en el sistema de coordenadas cuyo origen es el centro de los dos fotodiodos, $\Delta y = v_v(t_2 - t_1)$ es la distancia que se mueve el vehículo durante el tiempo de duración y v_v es la

velocidad del vehículo, $e_i=c/a_i$ ($i=1, 2$) es la excentricidad. Como se muestra en la Figura 6-8 los cuatro puntos de intersección T_1, T_2, T_3 y T_4 se obtienen de las ecuaciones (6-33) y (6-34).

Para especificar de forma exclusiva el semáforo T_1 , se utiliza alguna información previa. Se supone que los dos fotodiodos están orientados en la parte delantera sin un campo omnidireccional de visión (FOV), y que el semáforo se encuentra en frente del vehículo, es decir $y > \Delta y$. Esto elimina la posibilidad de T_3 y T_4 . Por otra parte, se define TDOA como el tiempo de llegada (TOA) de la señal de luz desde el semáforo al fotodiodo de la derecha, F_2 , menos el TOA del fotodiodo de la izquierda, F_1 , esto es, $t_{T, F_1} - t_{T, F_2}$. La coordenada x de la posición del semáforo es negativa ($x < 0$) cuando la diferencia de tiempo de llegada es positiva y $x > 0$ cuando es negativa. Suponiendo que TDOA es positiva, el punto de cruce T_1 está determinado como la única ubicación del semáforo. Finalmente la posición absoluta del vehículo está determinada como $(X_0 - x, Y_0 - y)$, donde (X_0, Y_0) es la posición absoluta del semáforo que se obtiene por VLC desde el semáforo a los fotodiodos [146].

6.3.2.2.2 LPS con dos semáforos

Con esta disposición, como se muestra en la Figura 6-9, los semáforos T_1 y T_2 , por ejemplo un semáforo para vehículos y el otro para peatones son capturados por dos fotodiodos, F_1 y F_2 . Se pueden generar dos hipérbolas para obtener los tiempos de diferencia de llegada, Δt_1 y Δt_2 , y el espacio entre los fotodiodos. Con las propiedades de la hipérbola y la distancia absoluta y la dirección de los dos semáforos, se obtienen las siguientes ecuaciones [146]:

$$\|(x_1, y_1) - (-c, 0)\| = e_1 \left[x_1 - \left(-\frac{a_1}{e_1} \right) \right] \quad (6-35)$$

$$\|(x_2, y_2) - (-c, 0)\| = e_2 \left[x_2 - \left(-\frac{a_2}{e_2} \right) \right] \quad (6-36)$$

$$\|(x_1, y_1) - (x_2, y_2)\| = \|(X_1, Y_1) - (X_2, Y_2)\| \quad (6-37)$$

$$\frac{x_1 - x_2}{X_1 - X_2} = \frac{y_1 - y_2}{Y_1 - Y_2} \quad (6-38)$$

donde (x_1, y_1) y (x_2, y_2) son las posiciones de los dos semáforos en el sistema de coordenadas donde el origen es el punto medio entre los dos fotodiodos, (X_1, Y_1) y (X_2, Y_2) son las posiciones absolutas de los dos semáforos. Al igual que el caso de un solo semáforo, algunas soluciones no deseadas pueden excluirse. Las restricciones a tener en cuenta son $y_1 > 0, y_2 > 0$, y $x_1 < 0, x_2 < 0$ cuando los TDOAs Δt_1 y Δt_2 son positivos y $x_1 > 0, x_2 > 0$ cuando son negativos. Finalmente la única solución absoluta de la posición del vehículo es $(X_1 - x_1, Y_1 - y_1)$ o $(X_2 - x_2, Y_2 - y_2)$ [146].

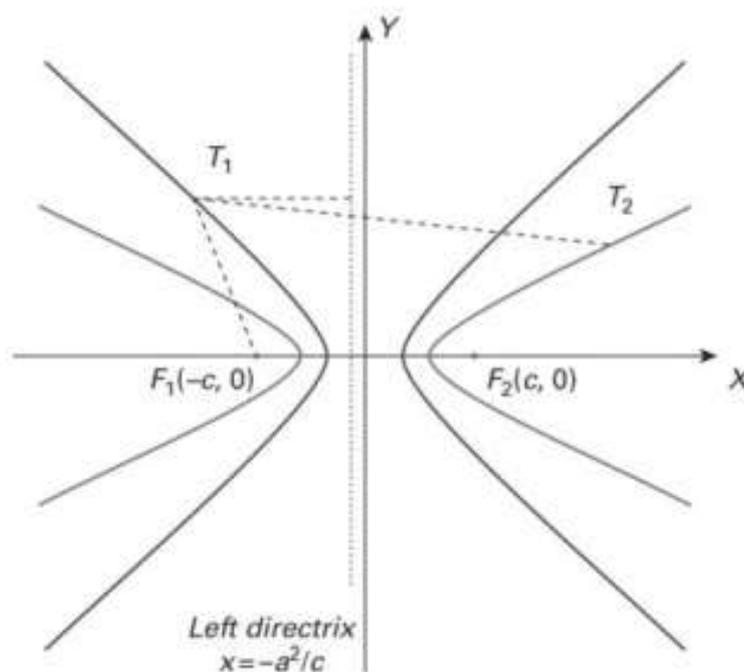


Figura 6-9. LPS con dos semáforos [146].

Hay que tener en cuenta que para el caso de dos semáforos, una toma del TDOA se utiliza para estimar la ubicación del vehículo, mientras que para el caso de un solo semáforo, se necesitan dos tomas de tiempo. Esto es debido al hecho de que TDOA sólo especifica una hipérbola y la localización de la luz puede ser incorrecta, y se necesitan por lo menos dos hipérbolas para definir un punto exacto.

6.4 Entornos restringidos

Los entornos restringidos son aquellos donde hay instrumentación o personas sensibles a las ondas radio, como aviones u hospitales. En estos lugares no se deben utilizar ondas radio, ya que pueden causar interferencias o daños nocivos a la salud. La tecnología VLC tiene muchas ventajas como se explicaron en el capítulo 2. Entre ellas destacan que no interfieren en los dispositivos radio ya que operan en otra frecuencia, no causan daños en la salud debido a que no emiten radiación electromagnética y son fiables, ya que la luz no atraviesa las paredes y la información transmitida no se puede interceptar desde otro lugar. Gracias a estas ventajas, es aconsejable utilizar VLC en lugares restringidos.

6.4.1 Aviones

Cada vez es más frecuente que se ofrezca un servicio de comunicación de datos durante los vuelos. Muchas de las empresas que ofrecen este servicio ofrecen soluciones basadas en WiFi para ofrecer acceso a internet durante el viaje en el avión. Sin embargo, la banda del espectro WiFi puede interferir con los sistemas coexistentes del vuelo, ya que, al ser un lugar restringido se pueden causar interferencias en los dispositivos que manejan el avión. Por eso, se propusieron métodos cognitivos de asignación del espectro electromagnético para reducir la interferencia entre sistemas basados en comunicaciones por radiofrecuencia. Sin embargo, la promoción de los sistemas de vuelo primarios en la asignación del espectro puede degradar la calidad de los servicios percibidos, especialmente, las aplicaciones multimedia de entretenimiento durante el vuelo. La conectividad inalámbrica por medio de luz visible ofrece muchas ventajas para este tipo de aplicaciones, ya que utiliza longitudes de ondas del espectro visible que no causan interferencias a aquellos dispositivos que estén utilizando sistemas por radiofrecuencia, y así evitar la interferencia en la radionavegación.

Varios grupos de investigación están abordando el uso de la tecnología VLC para implementar una infraestructura de red durante el vuelo. Una de las propuestas que destacan es el uso de un cierto número de LEDs blancos para proporcionar un brillo suficiente tanto para la iluminación como para la comunicación de alta velocidad. Además del uso de múltiples LEDs blancos, se puede hacer mediante un LEDs azules

recubiertos con fosforo amarillo. Estos proporcionan una mayor velocidad de transmisión de datos con una BER y SNR aceptable [147].

Otro de los esquemas que se proponen es el de acceso múltiple por división de longitud de onda y por división de código combinado para las células y los usuarios de la diferenciación. Para este fin, se proponen dos tipos de códigos ortogonales. El código de Walsh-Hadamard (WD) se utiliza para diferenciar los usuarios dentro de la misma célula, mientras que las secuencias PN (*Pseudo Noise*) de longitud máxima de fase desplazada se asignan a las células vecinas que utilizan el mismo canal de longitud de onda con el fin de mitigar la interferencia entre células. Además, los autores de [ref] consideran un ambiente interior que consiste en una oficina con una geometría rectangular [147].

6.4.1.1 Arquitectura

La arquitectura que se utiliza para los sistemas VLC para redes de entretenimiento en los vuelos se muestra en la Figura 6-10. Abarca tres subsistemas de comunicación [148]:

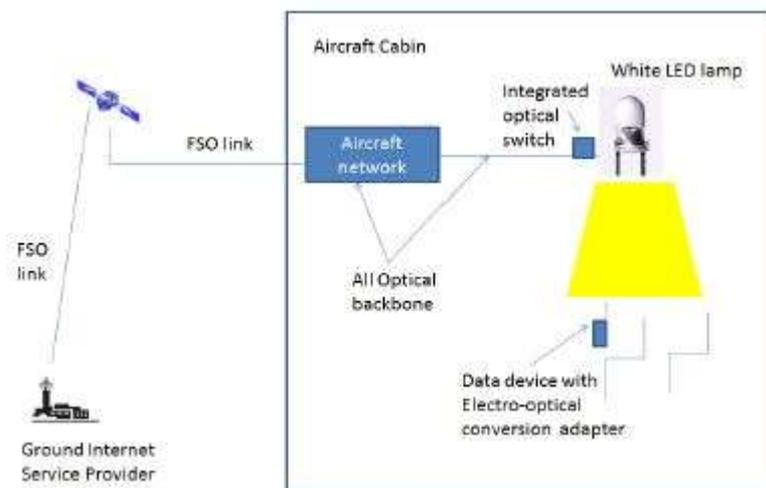


Figura 6-10. Esquema sistema VLC en aviones [148].

- **El enlace Tierra-avión:** Este enlace proporciona una conexión entre el avión y el proveedor de los servicios de internet relacionados. Este puede ser un enlace óptico de espacio libre a través de un satélite trabajando como un nodo intermedio.
- **La red troncal:** La red de datos del avión es totalmente óptica, donde los enlaces que conectan los LEDs en el techo de la cabina son enlaces basados en FSO. La tecnología FSO se determina para asegurar unas tasas de comunicación de datos altas. Además, se supone que cada LED tiene un conmutador óptico integrado que permite el envío de paquetes de célula a célula. Esto puede abordar la movilidad de pasajeros dentro del avión.
- **El enlace de red de acceso:** Es el enlace de usuario dentro de una célula, que es un enlace VLC con visibilidad directa desde una lámpara con luz LED hacia el terminal del usuario. Sin embargo, en la dirección del enlace ascendente, el enlace se puede realizar mediante comunicaciones FSO con un haz directo desde el terminal del usuario hacia el techo. El terminal de usuario puede ser un ordenador o un teléfono inteligente equipado con un adaptador que sea capaz de realizar una conversión electro-óptica.

Un problema principal que debe abordarse es el despliegue del LED en el techo de una cabina de avión. Se estudian dos métodos. El primero utiliza LEDs blancos con 4 longitudes de onda que son de color rojo, verde, azul y cian. Cada LED forma una célula de VLC, donde se selecciona una única longitud de onda para la comunicación y los otros colores se utilizan sólo para la iluminación. En el segundo método, todas las longitudes de onda se utilizan tanto para la comunicación como para la iluminación. Un código

OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) de dos dimensiones se utiliza para permitir el control de acceso de los usuarios a los recursos ópticos.

Un problema que puede surgir en estos entornos públicos es que el pasajero de al lado del usuario del sistema que está utilizando la comunicación por luz visible no quiera que el sistema de iluminación esté encendido. Para evitar este problema se pueden utilizar dos soluciones. La primera de ellas es el despliegue de la funcionalidad de comunicación en las lámparas de lectura implementadas encima de los asientos de cada pasajero [148].

Sin embargo, este enfoque incrementará el número de LEDs necesario para la comunicación. La segunda solución será cambiar al modo de infrarrojos en el enlace descendente en lugar de modo VLC si a uno de los pasajeros vecinos le gustaría dormir. Por lo tanto, la luz visible podría estar desactivada para garantizar la comodidad de los vecinos. Sin embargo, la luz infrarroja debe ser en este caso fuertemente directiva al terminal del usuario objetivo para garantizar una conectividad en vuelo aceptable.

6.4.1.2 Control de acceso de usuario y comunicación intracelular

Se describen dos métodos para establecer el acceso múltiple en los sistemas VLC. Hay dos métodos basados en el uso de códigos ópticos ortogonales (OOC, *Optical Orthogonal Code*) para diferenciar a los usuarios. Es de destacar que estos códigos se utilizan para usuarios dentro de la misma célula para reducir la interferencia intracelular.

6.4.1.3 Control de acceso de usuario basado en WDM y OCDMA

En la primera asignación de canal, se propone utilizar LED blanco combinado con LEDs rojos, verdes, azules y amarillos. En este tipo de LEDs, las longitudes de onda se utilizan para la iluminación. Sin embargo, sólo una longitud de onda se utiliza para la comunicación en cada célula óptica para permitir la reutilización de la longitud de onda dentro de la cabina. Con el fin de reducir la interferencia intracelular se propone asignar longitudes de ondas monocromáticas a las diferentes células usando el concepto de color gráfico, como se representa en la Figura 6-11 [148].

Cada LED blanco cubre cinco asientos y una longitud de onda monocromática se selecciona para comunicar datos en el enlace descendente. A cada usuario se le asignará una palabra de código óptico utilizando el dominio de tiempo, codificando la longitud de onda seleccionada para la comunicación.

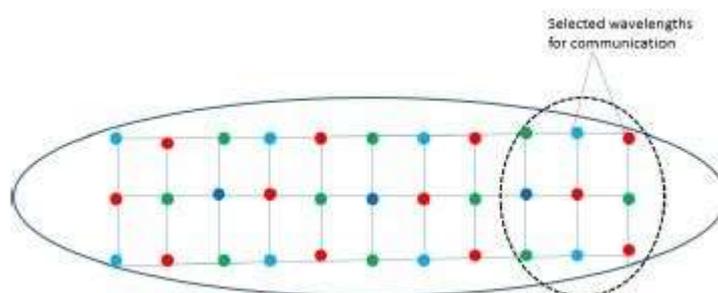


Figura 6-11, Longitud de onda para cada pasajero [148].

6.4.1.4 Control de acceso de usuario usando palabra de código en dos dimensiones

La segunda opción se basa en un esquema de codificación óptico en dos dimensiones para generar palabras de códigos en OOC. El esquema de codificación 2D utiliza tres colores, y por tanto, tres longitudes de onda (roja, azul, verde) para construir una palabra de código para cada usuario independiente de su posición en la cabina. Especialmente, cada paquete de datos se conmuta al usuario destino que tiene el código de la palabra apropiada de forma independiente a la célula óptica a la que esté conectada. En este caso, se supone que una unidad central incrustada determinará y distribuirá las palabras de código ortogonales para los usuarios [148].

6.4.1.5 Comunicación intercelular utilizando palabra de código basada en conmutación

Además de las palabras de código de usuario, se propone el uso de la misma función de generación de código para asignar códigos ópticos ortogonales a diferentes células. Así, cada palabra de código identifica de forma única a la celda considerada. Cada vez que un usuario tiene información para comunicar a un usuario de destino que pertenece a una célula distante, o si un usuario de móvil pasa de una célula a otra, cada celda de origen puede cambiar un tráfico de multidifusión a la celda de destino usando esas palabras de código óptico. Los tráficos de multidifusión se conmutan para utilizar una estructura básica basada en la FSO que une los diferentes LEDs [148].

En esta conmutación multidifusión, cada célula considera cuatro palabras de código que indican sus vecinos directos: la celda contigua a la izquierda, la célula vecina derecha, la célula vecina delantera y la célula vecina hacia atrás. Por otra parte, un camino más corto se define en términos de número de saltos por la promoción de la célula más cercana con el tráfico de carga más ligero y que no presente la interferencia entre células con la célula origen [149].

6.4.2 Hospitales

Los hospitales actuales están empezando a adoptar la eSalud como complementos eficaces a los servicios de asistencia sanitaria tradicional. Para apoyar los servicios de salud electrónica, en los hospitales se necesita un sistema de comunicación localizable, de alta capacidad y libre de radiaciones.

Hoy en día, las personas prestan cada vez más atención a la salud. Para proporcionar un diagnóstico más eficiente y una mejor experiencia a los pacientes, recientemente, se ha propuesto como un complemento a los servicios tradicionales del cuidado de la salud. Además considerando la seguridad de los pacientes y la precisión de los instrumentos, la radiación electromagnética de los sistemas de comunicación debería ser lo menor posible. Estos estrictos requisitos han llevado al abandono de las soluciones de comunicaciones desplegadas mediante sistemas radio, como WiFi o 3G en hospitales.

Con el desarrollo de los LEDs en el ámbito de las telecomunicaciones surgieron las comunicaciones por luz visible. Esta tecnología tiene características muy atractivas. Las más importantes son que su banda de frecuencia no causa interferencias con los equipos radio y no emiten radiación electromagnética. Estas ventajas han favorecido a las investigaciones de los sistemas VLC.

Por otro lado, PLC se ha utilizado extensamente en la red de energía como una solución efectiva de comunicación, ya que aporta una línea de comunicación adicional y cubre casi todas las áreas. Los equipos y los accesorios electrónicos pueden acceder a internet mediante una red PLC, ya que este tipo de comunicaciones se consideran el pilar de los sistemas VLC interiores, haciendo las integraciones más atractivas [150].

La primera integración de VLC con PLC fue propuesta en 2003 por un grupo de investigadores japoneses adoptando la modulación OOK pero se conseguía una tasa de transmisión baja. Tras el desarrollo de la modulación OFDM, esta técnica de modulación se implementó tanto en VLC como en PLC, gracias a ello lograron combatir el desvanecimiento de señal, y consiguieron una eficiencia espectral más alta, además de una tasa de velocidad considerable [150].

6.4.2.1 Modelo del sistema

En la Figura 6-12 se muestra un diagrama de bloques para este sistema de comunicación con modulación OFDM. En primer lugar, el dato es modulado con PLC y se convierte en una señal analógica. Las señales son transmitidas desde la línea de potencia al acoplador. El sistema utiliza un módulo de conversión PLC a VLC en el dispositivo de iluminación LED para recibir la señal de datos de la red eléctrica. Después de utilizar la pre-compensación y la amplificación de la señal, el módulo añade el dato de la señal al sesgo del LED que actúa como transmisor óptico para cubrir el área interior. Desde el punto de vista de la comunicación e integración este módulo puede ser fácilmente instalado en el LED y modificar la funcionalidad inmediatamente a comunicación. La luz procedente del LED es recibida por el diodo de avalancha en el receptor. Tras esto, la señal OFDM es amplificada y demodulada de acuerdo con el nivel

de señal recibido. Considerando la estructura total del sistema, VLC se utiliza en el enlace descendente mientras que el enlace ascendente se puede configurar mediante canales infrarrojos o PLC [150].

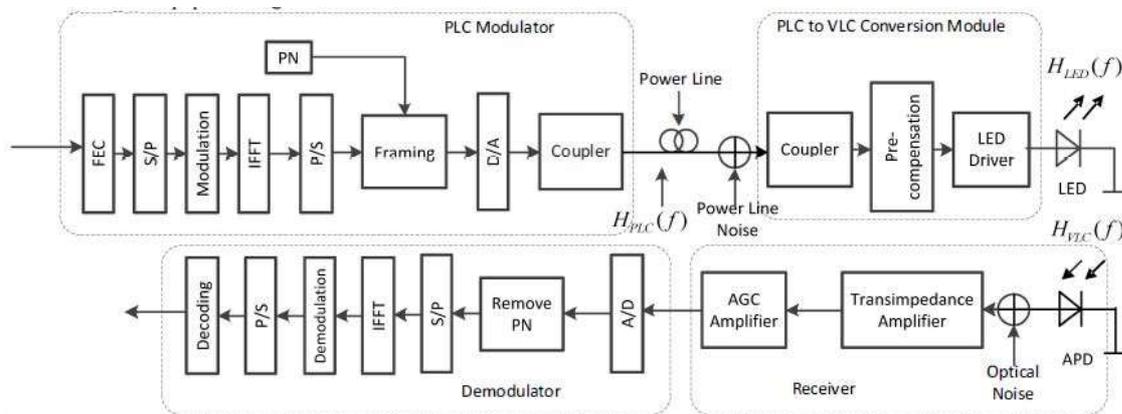


Figura 6-12. Diagrama de bloques OFDM con PLC [150].

6.4.2.2 Características del sistema

Este sistema hereda las ventajas tanto de VLC como de PLC, y mientras tanto supera algunas de sus deficiencias, tales como la dificultad para la cobertura móvil en PLC. Las características del sistema integrado en el escenario de un hospital se pueden resumir en las siguientes [150]:

- **Localización:** El sistema se puede utilizar como posicionamiento interior debido al excelente direccionamiento de la luz y a la ubicuidad de los LEDs con los monitores existentes o los sensores para el seguimiento pueden utilizar también la red PLC para suministrar potencia y comunicación. Basados en las últimas técnicas de VLC, este sistema puede también proporcionar muchos servicios.
- **Libre de radiación:** Considerando la interferencia de radiación a los instrumentos como los de imagen de resonancia magnética y el daño que produce al paciente, el 3G o WiFi no son adecuados para el ambiente de un hospital. El sistema VLC no tiene el problema de radiación y por tanto de interferencia. Además la luz del LED no es dañina para el ser humano.
- **Alta capacidad:** A diferencia de las ondas radio utilizadas en WiFi y 3G, los fotones de luz ofrecen un ancho de banda más amplio, por lo tanto, pueden soportar muchos usuarios simultáneamente y una tasa de datos alta. Las técnicas de PLC recientes superan tasas de datos de 1 Gbps.
- **Fácil de instalar y bajo coste:** el sistema integrado propuesto puede reutilizar la línea eléctrica y la infraestructura de LED, y es fácil de instalar sin mucha modificación. Además, no sólo supone un ahorro de coste sino también de tiempo.
- **Seguridad de datos:** gracias a que la luz no puede sobrepasar las paredes, no se pone en riesgo la privacidad del paciente.
- **Tratamientos médicos:** Algunas interesantes aplicaciones médicas del sistema propuesto pueden incluir tratamientos que necesiten luz, como por ejemplo, terapia de luz para el tratamiento emocional, supervisión en las constantes vitales, etc.

6.4.2.3 Monitorización de pacientes utilizando VLC

La tecnología para monitorizar la salud de los pacientes presenta un gran potencial en las aplicaciones para el cuidado de la salud y las comunicaciones por radiofrecuencia es el medio más popular para su implementación.

Hoy en día, las tecnologías móviles penetran en casi todos los aspectos de la vida humana. Los últimos dispositivos tecnológicos se han convertido en una parte integral de la vida. El interés específico en la asistencia sanitaria y calidad de vida han llevado a la creación de numerosos dispositivos. Los futuros sistemas de salud deben proporcionar una gestión de bienestar, concentrarse en la detección temprana de problema de salud y prevenir enfermedades.

Tanto Bluetooth como ZigBee, y más recientemente Bluetooth de baja energía (BLE, *Bluetooth Low Energy*), están compitiendo en el mercado en aparatos y dispositivos sanitarios inalámbricos debido al bajo consumo de potencia y la posibilidad de movilidad. Estas tecnologías inalámbricas para la monitorización del cuidado de la salud se necesitan desde que hay escasez de personal sanitario en los hospitales, mientras que la salud de un paciente puede cambiar en cualquier momento del día. Los sensores están colocados en el cuerpo del paciente. Un sensor de electrocardiograma se coloca en el pecho del paciente y un sensor de SpO2 (oxímetro de pulso) está colocado en el dedo índice del paciente para medir la saturación de oxígeno en sangre [151].

Una aplicación utilizada para el control de la salud se muestra en la Figura 6-13. En el lado del paciente, el sensor mide datos y después son procesados por un microcontrolador y tras esto, se transmite por una red inalámbrica. En el lado del servidor, el transceptor inalámbrico recibe el dato inalámbrico, se procesa y llega al servidor [151].

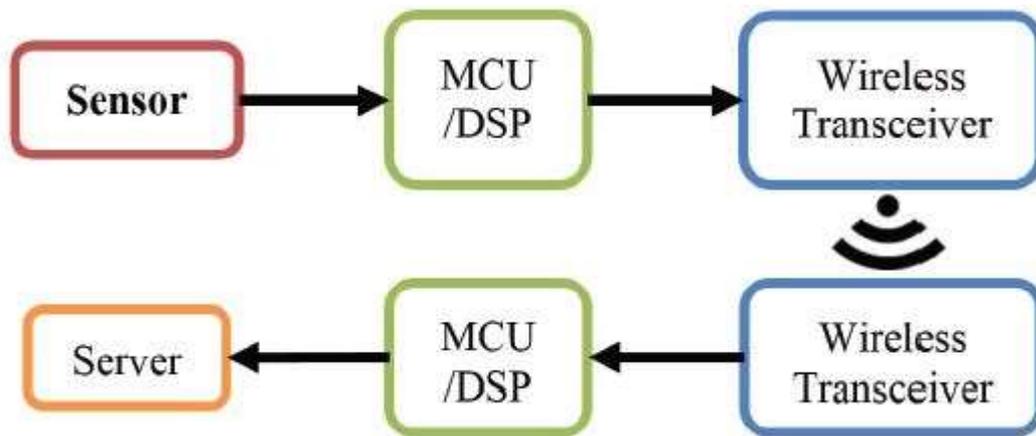


Figura 6-13. Diagrama de bloques para monitorizar al paciente [151].

La seguridad y la fiabilidad de la transmisión de datos se están convirtiendo en un requisito importante para la monitorización de pacientes. Sin embargo, todas las tecnologías relacionadas operan en el espectro de frecuencias de radio que debido a todas sus aplicaciones se congestiona con prontitud. Además, son perjudiciales para la salud y también muy susceptibles a la piratería. Como alternativa a estas tecnologías congestionadas y perjudiciales de comunicación por radiofrecuencia de corto alcance, se introduce VLC como una opción más segura, con espectro más libre.

Con los beneficios de VLC, los servicios de cuidado de la salud inalámbricos se pueden implementar utilizando VLC, ya que se adaptaría a instituciones sanitarias restringidas. Se pueden utilizar los sistemas VLC para los enlaces descendentes en la asistencia sanitaria para la descarga de datos biomédicos y la información sanitaria en dispositivos portátiles.

Sin embargo, un sistema de control integral del paciente también debe ser capaz de soportar tanto la transmisión de datos en el enlace ascendente, como en el enlace descendente. La transmisión de datos de enlace ascendente se considera más importante para la monitorización remota eficiente de los pacientes en el futuro [151].

Otra opción alternativa a los sistemas por radiofrecuencia es mediante comunicaciones por infrarrojos. Tanto VLC como IR necesitan visibilidad directa entre el transmisor y receptor, y consumo de potencia bajo.

En muchos ambientes interiores hay un intenso ruido ambiental, originado a partir de la luz solar, la iluminación incandescente y la iluminación fluorescente. Este ruido afecta al rendimiento de un receptor de infrarrojos. Por otra parte, muchos enlaces infrarrojos utilizan una potencia de transmisión relativamente alta y operan en un rango de frecuencias relativamente limitado para manejar las interferencias. Aunque el nivel de potencia del transmisor puede ser aumentado para una mejor calidad de transmisión, la potencia puede ser limitada por preocupaciones de consumo de energía y la seguridad del ojo.

Del mismo modo, VLC también puede sufrir de ruidos ambientales de otras fuentes de iluminación expuestas al fotodetector. Sin embargo, la relación señal ruido puede seguir siendo razonable si se emplea el filtrado de color apropiado. La transmisión de potencia baja puede ser mantenida en VLC para el uso en interiores ya que las fuentes de ruido no influyen tanto como en las comunicaciones IR. Además VLC puede utilizar múltiples colores en múltiples usuarios en un escenario de transmisión.

6.4.2.4 Sistema de monitorización del paciente

Una de las opciones para este tipo de sistemas es la comunicación por luz visible en sistemas de transmisión de enlace ascendente de datos. La monitorización del paciente se puede hacer mediante la utilización de LEDs blancos, que pueden ser utilizados para la transmisión de datos del sensor de un paciente estático en una cama. Este modelo se basa en el hecho de que para el enlace descendente casi todas las instalaciones en los centros de salud y hospitales pueden controlarse fácilmente mediante el uso de luz LED de iluminación. Se elige un modelo estático porque el paciente bajo monitorización estará estático la mayor parte del tiempo.

La Figura 6-14 muestra el escenario de transmisión propuesta, donde se usa un LED para la transmisión instalado en cada sensor utilizando un módulo específico de transmisión, que apunta hacia arriba en el techo donde están instalados los fotodetectores. El módulo de transmisión colocado en el paciente se supone que tiene LOS con la conexión a los fotodetectores en el techo. El efecto de diversidad se consigue mediante el uso de múltiples fotodetectores. Se requiere un espacio apropiado entre los fotodetectores para la robustez en la recepción de datos [151].

El sistema propuesto utiliza tres datos precargados biomédicos para cuidado de la salud, es decir, ECG, la temperatura corporal y *Photoplethysmogram* (PPG), que se transmiten a través del LED utilizando la modulación OOK. Los datos recibidos son demodulados y multiplexados.

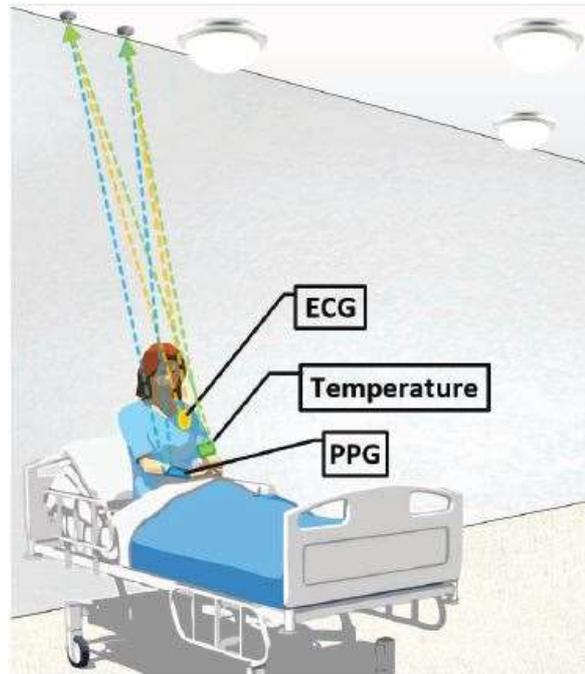


Figura 6-14. Sistema VLC en hospitales [151].

Los datos relacionados con el paciente son entregados periódicamente para monitorización objetiva, por lo tanto, la precisión y la fiabilidad son cada vez más importantes. El sistema de seguimiento propuesto es implementado para lograr una tasa de error muy baja [151]. Las aplicaciones de VLC basadas en la iluminación de los LEDs son más atractivas en ambientes donde la luz siempre está encendida. La implementación es bastante fácil ya que los datos se pueden proporcionar desde un punto de agregación a las luces mediante infraestructura existente como cables eléctricos.

7 RETOS Y RESTRICCIONES TÉCNICAS

Como se vió en el Capítulo 2, los sistemas VLC tienen unas características propias, como una longitud de onda más corta en la portadora o la doble funcionalidad comunicación-iluminación. Gracias a estas características, estos sistemas tienen ventajas en una gran variedad de escenarios. Ya que la instalación de la infraestructura está desplegada parcialmente en la mayoría de los casos, e incluso totalmente, esto significa un ahorro significativo en la instalación; además tampoco hay que preocuparse por la compatibilidad electromagnética ni de las interferencias con los sistemas radio. Pero estas particularidades y el hecho de ser una tecnología reciente traen consigo una serie de retos y problemas que resolver.

- **Uplink:** Proporcionar un esquema eficiente de enlace ascendente es un problema, debido a que las comunicaciones por luz visible tienen la característica de difusión, es decir, se caracteriza por un enlace descendente. Un enlace ascendente con sistemas VLC sería ineficiente para dispositivos portátiles que funcionan con baja potencia. Además la incorporación de un modulador en el sistema de iluminación es suficiente para emitir en todo el rango de cobertura de la luz, y cualquier receptor dotado de un fotosensor podría recibir la información y demodularla. Para que esta comunicación sea bidireccional es necesario crear un segundo canal, punto móvil-infraestructura o punto fijo-infraestructura [152].

Actualmente, existen varias maneras de resolver este problema, estos esquemas incluyen radiofrecuencia, infrarrojo cercano a UV y transceptores retroreflectantes, evitando problemas de interferencia entre el *uplink* y el *downlink* [153].

El uso de comunicaciones de RF tiene la ventaja de que es una tecnología madura y conocida y evita el problema de las interferencias, pero podría resultar ineficiente energéticamente ya que tiene que integrar un conjunto diferente de transmisores y receptores junto con los transceptores ópticos y además resultaría costoso. Además no sería aceptable en algunos escenarios en los que VLC se utiliza para minimizar EMI como en los hospitales [153].

La solución del transceptor retroreflectante modula la luz incidente y la refleja de vuelta como el enlace ascendente, pero la velocidad de modulación es baja por lo que da lugar a velocidades de datos menores y además su coste es alto [153].

Por último, integrando luz infrarroja cercana a la banda ultravioleta en el canal ascendente. La porción infrarroja cercana a la banda UV del espectro tiene poca interferencia, con poca luz solar en esta banda se alcanza la superficie terrestre, la mayoría de estos enlaces están diseñados como enlaces Non-LOS de larga distancia. Por estas razones IR parece ser una solución viable para el enlace ascendente. Un montaje en el techo PD IR podría ser desplegado [154].

- **Comunicación sin luz:** VLC en entornos interiores tiene como objetivo combinar la comunicación y la iluminación, el problema es cuando se quiere transmitir datos cuando las luces están apagadas. En el caso de que VLC se utilice como un suplemento a RF e IR en un esquema híbrido, la transmisión podría simplemente cambiar a ondas de radio o IR. Esto aumentaría la complejidad y el coste del sistema y no sería válido en todos los escenarios. Mediante el uso de un sensor con amplio rango

espectral, se podría minimizar los riesgos del uso de IR emitiendo la potencia mínima necesaria para complementar la luz visible y mantener la robustez del canal; los fotodiodos de avalancha son la mejor opción para detectar niveles muy bajos de luz por su ganancia interna.

Pero en una configuración exclusiva VLC, la transmisión de datos con las luces apagadas es muy difícil. En algunos casos, la transmisión de datos se puede lograr haciendo que la luz emitida sea lo suficientemente débil como para que el ojo de las personas no la pueda percibir. Esto es posible mediante técnicas de modulación eficientes [155].

En general, si esta en uso todo el ancho de banda disponible con la luminaria regulada al 100%, bajar los niveles de iluminación supondría bajar la tasa de transmisión proporcionalmente; disponiendo de más ancho de banda, se puede mantener la robustez y la velocidad de transmisión con el control de atenuación.

Se ha demostrado que utilizando técnicas de modulación digital de pulsos es factible alcanzar tasas máximas de transmisión del orden de 625 kbit/s de día, usando un 1% de la potencia máxima de la luminaria, que supone un 0.36% de la luz total; y una tasa máxima de 320 kbps usando 0.001% de la potencia máxima de la luminaria, que supone un 7.5% de la luz que hay durante la noche, suficiente para aplicaciones de información y señalización con sensores y actuadores [155].

- **Desvanecimiento:** Generalmente, los sistemas VLC en interiores son diseñados para enlaces LOS. Por lo tanto, se espera que los receptores tengan una clara visibilidad directa al sistema de iluminación en la mayoría del tiempo. El efecto se puede minimizar distribuyendo las fuentes de luz de modo que la SNR se mantenga alta [156].
- **Efecto de la temperatura de unión del LED y estabilidad a largo plazo:** La gestión térmica es un tema importante en el diseño de los LED de alta potencia [157]. La temperatura alta de la unión afecta a la longitud de onda dominante, a la eficiencia interna y a la anchura espectral. La variación en la corriente de excitación, la temperatura ambiente y el calentamiento que se puede producir por el hecho de estar encendido causan cambios en temperatura de la unión. En caso de que se integren LEDs de alto brillo para la iluminación y VLC funcione a altas corrientes de excitación, las temperaturas altas pueden causar la degradación de la potencia de la señal a través del tiempo, lo que reduce la SNR. El efecto podría ser mayor en los dispositivos de iluminación donde cientos de LEDs están conectados juntos formando matrices. La salida de luz a largo plazo y la vida útil de un LED se reducen drásticamente cuando está sometidos a un calor excesivo. Para que VLC se pueda aplicar de manera efectiva, la temperatura de unión LED debe mantenerse al mínimo [158].
- **Interferencia:** Otras fuentes de luz artificial (luz fluorescente o incandescente) y natural (luz solar) crean interferencias y actúan efectivamente como fuentes no moduladas en el receptor, e interferencias, debido a que estas fuentes de luz comparten la misma banda de longitud de onda que la señal emitida por el transmisor [159]. Si el ruido *shot* aumenta lo suficiente puede saturar al receptor.

Factores tales como la dispersión por multitrayecto y la interferencia de luz fluorescente también deben ser considerados. Cuando VLC se combina con la iluminación exclusivamente en un escenario de iluminación interior, el efecto de iluminación incandescente y fluorescente puede ser ignorado. Pero hay situaciones inevitables que pueden surgir como, por ejemplo, cuando la iluminación del LED utilizado para VLC tiene que combinarse en conjunción con otros sistemas de iluminación artificial. El ruido *shot* de la luz solar es estacionario, varía poco con el tiempo y produce una corriente de ruido constante pero fuerte. La luz artificial puede variar rápidamente en el tiempo debido a los armónicos de la frecuencia de la red, que a su vez varía la potencia óptica incidente sobre el fotodetector, variando así la cantidad de ruido de disparo inducida en el fotodetector. Una parte significativa del ruido *shot* se puede eliminar mediante filtrado [160].

Es imperativo que esta interferencia en banda se elimine para mejorar la calidad de la señal en el receptor. Para ello se puede utilizar la codificación Manchester en las señales para mitigar el ruido óptico ambiental. El símbolo Manchester codificado y recibido, y una versión retardada en medio bit

del mismo símbolo, se restan entre sí y la decisión se toma en el intervalo correcto para demodular el bit recibido. El sistema es robusto frente a las lámparas fluorescentes de frecuencia más baja. Pero a mayor frecuencia el rendimiento de la codificación se utiliza para atenuar el ruido de fondo [160].

- **Mejora del ancho de banda:** los LEDs de alto brillo comerciales tienen muy poco ancho de banda de modulación. Por ejemplo, el LED azul de chip tiene un ancho de banda de 3 dB de alrededor de 20 Mb/s [161] y el recubrimiento de fósforo usado para convertir la luz azul a blanco disminuye el ancho de banda a aproximadamente 2 Mb/s [162]. Hay una gran cantidad de métodos que se pueden utilizar para contrarrestar la limitación de ancho de banda de los LED en el sistema de VLC [159].
 - **Filtrado azul:** Este método aumenta el ancho de banda del LED en 3 dB. Cuando las frecuencias son más altas, debido a su baja constante de tiempo, el fósforo amarillo no responderá a la señal modulada, generando por lo tanto una luz fija que podría saturar el receptor y aumentar el ruido *shot*, degradando el rendimiento del sistema. La técnica del filtrado azul aumenta el ancho de banda de la modulación hasta 20 MHz. En el caso de VLC, el ancho de banda del sistema se limita por lo general por el LED [159].
 - **El transmisor de ecualización:** Un simple sistema de pre-ecualización en el transmisor puede aumentar el ancho de banda útil de un solo LED. Los datos modulados se ecualizan por tres controladores paralelos para frecuencias bajas, medias y altas. El sistema de igualado puede aumentar el ancho de banda de hasta 45 MHz, además de un aumento de la velocidad de datos de 40 a 80 Mb/s [163].
 - **Receptor de ecualización:** Usar un simple ecualizador de primer orden después de la amplificación de la señal del fotodetector ha dado como resultado un ancho de banda de 50 MHz y una velocidad de datos de 100 Mb/s. La combinación de pre-ecualización en el transmisor con post-ecualizador en el receptor consigue un aumento en el ancho de banda de hasta 65 MHz [164].
 - **Ecualización de la subportadora:** Para los sistemas de múltiples portadoras en DMT / OFDM (Discrete Multi Tone / Orthogonal Frequency Discrete Multiplexing), la velocidad de datos alcanzable se puede maximizar mediante la optimización del rendimiento de cada subportadora basándose en las características eléctricas-óptica-eléctrica del canal. La idea es ampliar las subportadoras individuales para mantener la calidad de transmisión. Es mejor pre-ecualizar la señal en el transmisor en lugar de en el receptor, debido a que la amplificación de la señal en el receptor implicaría amplificar el ruido también. Estas características del canal se pueden estimar mediante la formación de secuencias, generalmente enviadas al comienzo de cada bloque de transmisión. Un algoritmo de carga puede determinar la potencia de las subportadoras individuales, así como el orden de la constelación utilizada. Esto se conoce como la carga de potencia y carga de bits, respectivamente. El algoritmo utilizado deberá cumplir la BER máxima aceptable por la subportadora, así como la potencia total de la señal OFDM [165].
- **La no linealidad de compensación y saturación de la señal:** Hay que tener en cuenta la no linealidad de los LEDs cuando se modula la señal ya que puede producir distorsión de amplitud en TOV y en la corriente de saturación en los picos altos debido a la característica I-V de los LEDs, lo que causa un impacto alto y produce un incremento en la BER y en la interferencia entre portadoras (ICI). Por eso es importante elegir un LED con un rango dinámico grande, característica tensión-corriente de baja pendiente y encontrar un punto de funcionamiento óptimo, mientras se emplean métodos de reducción de potencia o saturación de señal. Tanto la predistorsión como la postdistorsión se emplean en OFDM para contrarrestar el efecto de no linealidad de los LEDs [159]. La saturación de la señal es el método más simple para combatir un alto PAPR en OFDM. Haciendo

que la amplitud de la señal de entrada caiga dentro del rango dinámico del LED, esto causaría que la potencia de la señal sea muy baja. Además, la probabilidad de que se produzca un pico alto es estadísticamente baja. La relación de saturación es adecuada si se realiza en etapas donde disminuye el umbral de saturación de la señal y se incrementa la potencia de señal, para encontrar un punto con una BER aceptable y una tasa de transmisión de datos alta.

7.1 Retos en la comercialización

Hay ciertos retos empresariales que impiden la adopción generalizada de VLC en el mercado de consumo. Para la integración de enlace descendente VLC, dos industrias diferentes tienen que trabajar juntas. Por un lado, los fabricantes de equipos originales (OEM, *Original Equipment Manufacturer*) de iluminación necesitan hacer ciertas modificaciones a su lámpara y / o diseños de accesorios, y por otra parte, los fabricantes de dispositivos móviles necesitan instalar receptores de fotodiodos de alta velocidad en sus dispositivos. Hay razones de peso en ambas partes. Desde la perspectiva de los LEDs, la larga vida de estos, aproximadamente 50.000 horas, produciría inicialmente una subida considerable de las ventas, pero después se produciría un estancamiento de las ventas. VLC podría proporcionar a los OEMs de iluminación con una nueva fuente de ingresos al incitar a sus clientes a actualizar las lámparas y accesorios compatibles con VLC después de haber realizado la actualización de la infraestructura de iluminación inicial. Incluso antes de que ocurra el estancamiento en las ventas, VLC podría desempeñar un papel importante en el suministro de productos de iluminación, lo que será cada vez más importante en un mercado del LED. Por parte de los fabricantes de los dispositivos móviles, la integración de un nuevo hardware en sus dispositivos existentes puede conducir a un aumento innecesario en el coste y cambiar la robustez del diseño. En los dispositivos móviles, las OEMs también se beneficiarían de equipar sus dispositivos con receptores de VLC, ya que esto les daría una ventaja competitiva en el mercado y podrían justificar el incremento de los precios [166].

En los sistemas MIMO, a pesar de que en los últimos tiempos se ha avanzado, todavía no se han resuelto varios problemas [159]:

- **Canal cross-talk:** Una situación ideal en las comunicaciones por luz visible sería que la luz de un solo receptor afectase a un único receptor, esto requeriría un alineamiento preciso y estático. En una situación real, esto no es posible, ya que la imagen de una única fuente la detectan varios receptores. Una especie de superposición sería inevitable, especialmente para un número relativamente grande de transmisores. La diafonía se produce cuando otros canales de comunicación crean interferencias en el canal de la señal recibida.
- **Movilidad del terminal:** Si el transmisor o el receptor es móvil, la imagen incidente en la matriz de detectores va a cambiar. Se requiere un control inteligente para extraer los datos incluso cuando la detección de luz se entrega de un fotodetector a otro. La matriz de canal tendrá que actualizarse en cada instante utilizando un algoritmo de aprendizaje inteligente.
- **La separación de la señal de transmisor:** En ciertos casos, la luz de varias fuentes podría caer en un solo detector, haciendo que la matriz del canal no tenga un rango completo y provocando que la extracción de la señal de todos los canales sea imposible. Esto podría ser el resultado de la alineación inapropiada en lugares específicos en una habitación.
- **Cobertura:** Para un funcionamiento óptimo, el receptor debe ser capaz de detectar señales de la mayoría de las fuentes de luz en cualquier lugar en la habitación, lo que requeriría un ángulo de haz ancho para el transmisor y un amplio campo de visión para el receptor. Hacer esto reduciría la intensidad de la señal detectada. Si se aumenta el campo de visión del fotodetector, las reflexiones Lambertianas de las paredes podrían crear imágenes secundarias de fuentes en la matriz de los fotodetectores que podría causar la diafonía y la interferencia. Por otra parte, también podría afectar al ancho de banda y la velocidad de datos que ambos disminuirían.

La comercialización de los sistemas VLC es probable que se vaya integrando a través de una estrategia progresiva que primero trae al mercado ciertos casos de uso de VLC y no tenga que confrontar ciertos retos como, por ejemplo, el caso del uso del enlace descendente de alta velocidad. Estos casos se pueden agrupar en dos categorías: los que no requieren hardware adicional en el dispositivo móvil y los que los fabricantes de dispositivos móviles puedan aportar de manera unilateral al mercado. Los sistemas de posicionamiento de alta precisión en interiores son un ejemplo de un caso que no requiere hardware adicional en el dispositivo móvil. Con lo que este tipo de casos de uso para el consumidor primero puede crear un efecto de retroalimentación

positiva en la demanda general de VLC, que dará lugar a la adopción acelerada de otros casos de uso, incluyendo eventualmente el caso de uso del enlace descendente.

En cuanto a los casos de uso en los que los fabricantes de dispositivos móviles pueden aportar de manera unilateral en el mercado, la vinculación de dispositivo a dispositivo, la transferencia de archivos y el acoplamiento inalámbrico son los más prometedores. En acoplamiento inalámbrico un dispositivo móvil transmite la salida de su pantalla a otro dispositivo tal como una pantalla. De dispositivo a dispositivo, la transferencia de archivos y aplicaciones de acoplamiento inalámbrico usarían la misma tecnología VLC de alta velocidad de datos que puede utilizarse para el caso de uso del enlace descendente (es decir, receptores de alta velocidad basados en fotodiodos además de transmisores LED). Si los fabricantes de dispositivos comienzan a instalar este hardware en dispositivos móviles, los fabricantes de equipos de iluminación tendrían un incentivo inmediato para crear accesorios y lámparas LED de alta velocidad de datos compatibles con VLC [166].

7.2 El problema del nodo oculto

El estándar de redes de área personal de VLC (VPAN) IEEE 802.15.7 define las capas físicas y de control de acceso al medio para comunicaciones ópticas inalámbricas de corta distancia utilizando luz visible. El estándar define dos tipos de nodos en una VPAN: un coordinador que actúa como controlador y un dispositivo que se comunica bajo el control del coordinador. El estándar propone tres topologías para los sistemas VLC, punto a punto, estrella y *broadcast*. En la topología en estrella, la comunicación se establece entre el dispositivo y el coordinador. Cuando se usa MAC *beacon-enabled*, la contención de enlace ascendente se resuelve a través del procedimiento de acceso aleatorio ranurado CSMA / CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [167].

CSMA/CA se utiliza en la mayoría de las redes inalámbricas como WLAN o redes de sensores. El problema del nodo oculto se causa debido a las limitaciones de la cobertura de la señal, obteniendo como resultado que los nodos de la red no sean capaces de detectar las transmisiones de otros nodos. Por lo tanto, un nodo de detección de portadores, para comprobar el estado del canal de comunicación puede detectar la inactividad de canal y seguir transmitiendo, dando lugar a posibles colisiones. La mayoría de las investigaciones se ha llevado a cabo para evaluar los efectos de este problema en las redes basadas en radiofrecuencia. En las redes VLC, el problema del nodo oculto se produce de una manera similar que en las redes inalámbricas radio, pero en este caso, el problema es mayor por la característica directiva del transmisor y receptor. En la Figura 7-1 se muestra un ejemplo de un escenario de una red VLC donde se presenta el problema del nodo oculto. En este ejemplo, dos terminales de usuario intentan transmitir mediante un enlace ascendente a la infraestructura de iluminación que se encuentra en el techo. Todos los nodos de la red emplean el procedimiento de control de acceso al medio mediante el método CSMA/CA. Considere que el terminal 2 lleva a cabo un procedimiento de detección de portadora mientras que el terminal 1 transmite a la infraestructura, debido a la direccionalidad del transmisor óptico del terminal 1 ($\theta_{1/2}$) y al receptor óptico del terminal 2 y su campo de visión. Consecuentemente, el terminal 2 considerará que el medio está libre y transmitirá aunque el terminal 1 esté transmitiendo en ese mismo instante. Por lo tanto, se produce una colisión en la infraestructura [168].

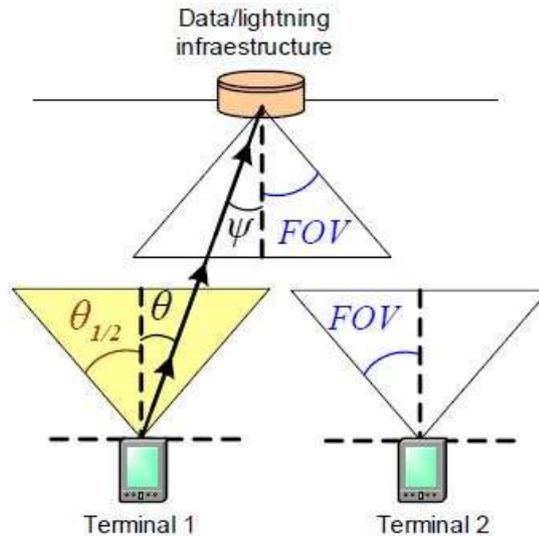


Figura 7-1. Problema del nodo escondido [168].

Como la capa MAC transmite de acuerdo con el método CSMA/CA, las transmisiones de enlaces ascendentes se verán afectadas por el problema del nodo oculto. Esta situación se reveló en algunos trabajos publicados durante el desarrollo de la norma y en algunos documentos con propuestas a tener en cuenta por el grupo responsable del desarrollo de la norma. Sin embargo, en la versión actual de la norma, no hay mecanismos específicos diseñados para resolver este problema [168].

7.3 El problema de la atenuación

Los LED son dispositivos semiconductores que emiten un estrecho espectro de luz incoherente cuando se controla por corriente, un fenómeno conocido como electroluminiscencia. Además de la alta eficiencia energética, los LEDs suelen tener un gran ancho de banda de modulación, lo que principalmente los convirtió en la más adecuada fuente de luz para los sistemas VLC. Dado que los LEDs emiten luz incoherente, para que se transmitan los datos necesarios generalmente se modula la potencia óptica instantánea del LED, que también es conocida como modulación de intensidad (IM). La detección directa (DD) es método de conversión más práctico para enlaces VLC. La detección directa utiliza un fotodiodo para convertir la señal óptica incidente en corriente proporcional a la potencia óptica recibida .

Un diagrama de bloques de la configuración de un enlace VLC regulable mediante IM/DD se presenta en la Figura 7-2. El usuario transmite los datos y establece el nivel de atenuación basado en la preferencia personal. El circuito de excitación tiene un conjunto de transistores que combina la señal de regulación con la señal de modulación sesgada e interruptores de los LEDs. La intensidad de la luz modulada viaja a través de un canal inalámbrico y es recibida por el fotodiodo. Se aplica amplificación y demodulación para recuperar los datos codificados. Los bits recibidos pueden ser comparados con los bits transmitidos para analizar los parámetros de rendimiento de la comunicación tales como la SNR, la BER, el rendimiento, etc. El usuario puede recuperar información sobre los parámetros fotométricos tales como intensidad luminosa, temperatura de color correlacionada (CCT), y el índice de rendimiento de color (CRI) utilizando un espectrofotómetro para controlar la precisión del control de regulación, así como la calidad de la luz [169].

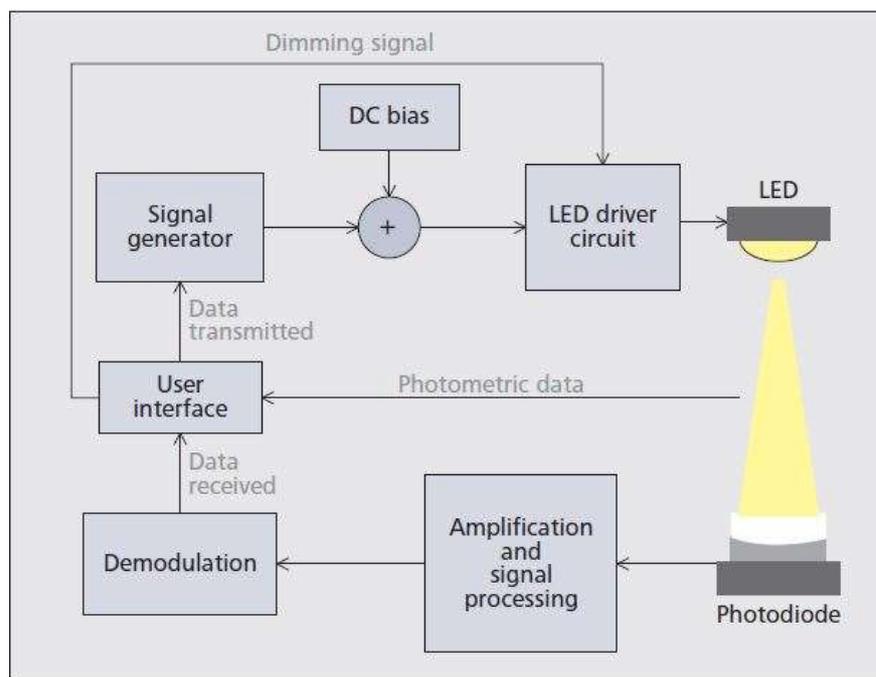


Figura 7-2. Diagrama de bloques de sistema VLC regulable [169].

7.3.1 Necesidad de regulación

Hasta la fecha, la mayoría de la investigación en relación con VLC estaba dirigida a la consecución de altas velocidades de datos. Sin embargo, la calidad de la iluminación y el consumo de energía no se han tenido muy en cuenta. La especificación de iluminación para las unidades interiores es generalmente específica por la aplicación. Las salas de conferencias y los restaurantes pueden requerir niveles de luz tan baja como un uno por ciento de la iluminación máxima con fines estéticos y de confort. Espacios como pasillos, escaleras o cuartos de servicio tienen un requisito de atenuación flexible en el que el ahorro de energía es el objetivo principal y no se requiere un rendimiento crítico, lo que permite una atenuación de la intensidad para limitar la salida al 20 por ciento del valor máximo. Una lámpara tenue produce menos calor, lo que extiende su vida útil y reduce las cargas de enfriamiento [169].

Sin embargo, lograr el control de atenuación eficiente en un enlace de transmisión de VLC es difícil ya que tiene un efecto adverso en la comunicación. Se fija la intensidad media de acuerdo con los requisitos del usuario, lo que disminuye la velocidad de datos alcanzables de un enlace de VLC. Una de las principales ventajas de VLC es la comunicación de interior de alta velocidad, y debido a esta atenuación puede verse frustrada. Como resultado, las técnicas y protocolos adecuados para las técnicas de atenuación apropiados deben desarrollarse para crear simetría entre la iluminación y la comunicación [169].

Las técnicas de adaptación también tienen que ser introducidos en los sistemas de atenuación existentes para mejorar la capacidad de comunicación de los sistemas de VLC regulables. Estos esquemas se asegurarían de que la velocidad de datos se mantiene constante cuando el usuario final de manera arbitraria atenúa la fuente de luz del sistema de VLC [169].

7.3.2 Técnicas de atenuación

El brillo de un LED se ajusta variando la corriente directa a través del LED, que puede ser disminuida para proporcionar atenuación. Este ajuste se puede realizar generalmente mediante dos técnicas: atenuación analógica y la regulación digital. La primera técnica, conocida comúnmente como reducción de corriente continua (CCR, *Constant Current Reduction*), es el enfoque más simple en el control de la atenuación. El flujo óptico radiado se reduce directamente por el ajuste de la amplitud de la corriente. Es relativamente fácil de implementar y la intensidad luminosa se reduce proporcionalmente a la corriente. Sin embargo, cambiar

directamente la corriente directa a través del LED va a alterar la longitud de onda de la luz emitida, causando cambios de cromaticidad.

La segunda técnica generalmente utiliza la modulación de ancho de pulso (PWM), en la que un tren de pulsos modulado digitalmente acciona el LED en un nivel constante de corriente. El *duty cycle* representa el nivel de atenuación analógica equivalente y se varía la proporción para adquirir el porcentaje de atenuación deseada. PWM reduce la intensidad de la luz linealmente más que CCR y por lo tanto reduce las posibilidades de cambios de cromaticidad, favoreciendo su uso en soluciones de la industria.

El apoyo a la atenuación se identifica como uno de los principales retos en VLC. Se han propuesto varios métodos de atenuación que utilizan tanto la atenuación digital como la analógica y se puede clasificar en dos grupos: esquemas de modulación basados en esquemas de atenuación y codificación basada en esquemas de atenuación [169].

7.3.3 Modulación basada en esquemas de atenuación

En VLC, los esquemas de modulación se utilizan para incorporar la intensidad de la fuente de luz actuando como transmisor. Como se dijo en capítulos anteriores, uno de los esquemas más utilizados en VLC es la modulación OOK, donde el bit binario "1" representa ON y "0" OFF. La atenuación OOK se puede alcanzar tanto alterando los niveles de los símbolos "ON" y "OFF" para tener menor intensidad como cambiando el ciclo de trabajo de la forma de onda con los niveles que mantienen constante mediante la inserción de compensación de tiempo en la forma de onda de la modulación, por medio de un esquema de multiplexación de tiempo. El primer método podría causar cambios en la cromaticidad debido a que los LEDs están bajo control, pero como resultado se consigue una tasa de bits constante. Por otro lado, la inserción de tiempos de compensación disminuye la tasa de bits alcanzable y la atenuación de la luz. También se propuso el esquema variable OOK, VOOK, donde OOK se combina con una señal PWM rellenando la parte inactiva del ciclo de trabajo, ya sean con unos o ceros dependiendo del objetivo de atenuación [169].

La modulación por posición de pulso, PPM, donde los bits binarios están representados por la posición del pulso en un intercalo de tiempo, fue propuesta para aumentar la eficiencia energética. Para implementar la atenuación en PPM, se diseñó la modulación PPM variable o VPPM, que combina PPM con PWM. VPPM es fácil de implementar y es capaz de proporcionar un rango de atenuación completo para enlaces VLC. Sin embargo, la distancia de comunicación se puede reducir debido a la baja energía por bit en los niveles bajos de intensidad.

El control de atenuación de la luz puede llevarse a cabo directamente por la modulación de impulsos de doble pendiente (PDSM, *Pulse Dual Slope Modulation*) sin la necesidad de ningún algoritmo de control adicional. En PDSM, los bordes de los impulsos representan "1" o "0" binario. La atenuación se consigue mediante el control de la pendiente de los bordes del pulso transmitido. En otras palabras, el tiempo de subida y caída de los impulsos de tiempo determina el nivel de brillo de la fuente de luz.

Recientemente, la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) se está convirtiendo cada vez más popular para los sistemas VLC ya que puede llegar a mayores velocidades de con una SNR alta y una buena eficiencia espectral.

En OFDM, bits de datos y la redundancia de bits se multiplexan en flujos paralelos, cada uno de los cuales se transmite en subportadoras separadas. OFDM puede ser transmitido en la atenuación PWM; sin embargo, el rendimiento de los datos disminuye debido a la velocidad de línea de PWM relativamente baja de los alimentadores comerciales de LED.

La investigación ha demostrado que la alta velocidad se puede lograr si la señal PWM de regulación tiene el doble de la frecuencia de la mayor frecuencia de la subportadora de la señal OFDM. En el caso de modulación ACO-OFDM, los resultados de simulación muestran que la técnica CCR logra mayor eficacia luminosa en comparación con la técnica de PWM de regulación. Con el fin de combinar el O-OFDM con la señal PWM de regulación relativamente lento, se propuso O-OFDM de polaridad inversa (RPO-OFDM, *Reverse Polarity Optical OFDM*) en donde la velocidad de datos no se limita por la frecuencia PWM y el rango dinámico LED se utiliza totalmente [169].

La polaridad del símbolo se invierte durante la duración "ON" de la señal PWM mediante la utilización de un factor de escalado, que ayuda a que la potencia de señal óptica global sea controlada simultáneamente por la

señal de atenuación PWM y la señal ACO-OFDM utilizada para la transmisión de datos.

7.3.4 Codificación basada en esquemas de atenuación

Se han estudiado diversas técnicas de codificación para reducir al mínimo la degradación del rendimiento en los sistemas VLC provocado por atenuación. En la mayoría de estas técnicas se repiten los conceptos utilizados para optimizar la corriente de excitación media en láser para la comunicación óptica inalámbrica IR. Se implementa un concepto de teoría de la información básica conocido como codificación inversa fuente (ISC) para reducir el deterioro de la eficiencia de la comunicación causadas por la atenuación PWM en VLC usando modulación OOK. Para un objetivo de atenuación P_d , la composición del dato cambia a "1" con probabilidad P_d y a "0" con probabilidad $1-P_d$. Esto incrementa el número de bits de datos que es la operación inversa de codificación de fuente, compresión utilizada para minimizar el número de bits transmitidos [169].

El código Reed Muller (RM) es una forma de corrección de errores lineal utilizada en sistemas de comunicación. Los códigos de corrección de errores hacia delante en modulación OOK basados en sistemas VLC utilizan los códigos Reed Muller para alcanzar el control de atenuación. Se propuso el código para garantizar que el número de ceros y unos en una palabra de código es el mismo, y la atenuación se consiguió mediante la inserción de un símbolo de compensación (CS). CS toma el valor de uno o cero en función del objetivo de atenuación de luz. Aunque esta técnica puede proporcionar un brillo estable, sólo puede soportar niveles específicos de atenuación estructural debido a las limitaciones estructurales. Los códigos *Rate-Compatible Punctured Convolutional* (RCPC) son una subclase de los códigos de convolución utilizados en las telecomunicaciones. *Puncturing* implica la supresión de algunos bits en el codificador basado en un modelo de perforación.

7.3.5 Técnicas adaptativas

Con el fin de mantener el rendimiento de la comunicación bajo el control por atenuación, se han desarrollado varias técnicas adaptativas que aplican una ligera modificación al esquema de transmisión existente para asegurarse que el deterioro del número de bits se evita. Estas técnicas adaptativas se pueden clasificar en tres categorías [169].:

- Adaptación de velocidad.
- Adaptación de modulación.
- Utilización de la ranura.

La adaptación de velocidad implica el ajuste de la tasa de datos instantánea basado en el nivel de atenuación en un sistema en VLC con atenuación digital. Cuando se aplica la atenuación mediante la reducción del ciclo de trabajo, la tasa de datos de la señal modulada se incrementa para mantener el número de bits transmitidos constantes. En el caso de los esquemas OOK, la velocidad de datos de adaptación alcanza valores en torno a los 500 Mbit/s en ciclos de trabajo bajos, que es mucho mayor que la tasa de datos original. Sin embargo en el caso de M-QAM OFDM, donde el índice de modulación es una variable adicional para determinar la tasa de datos adaptativa, la transmisión es posible en una velocidad de símbolos mucho menor en ciclos de trabajo más bajas.

La utilización de intervalos implica la transmisión de datos independientemente del estado de la señal de atenuación PWM. Incluso cuando la señal de atenuación es "OFF", los bits de datos se superponen sobre el mismo, lo que asegura que el número de bits transmitidos sean constantes.

Sin embargo, la implementación de estas técnicas adaptativas requieren la consideración de algunos criterios clave de rendimiento. En el caso de la adaptación de velocidad, las distancias reducidas entre símbolos causarían interferencia; en el caso de utilización de intervalo, la precisión de la atenuación de luz se ve obstaculizada. La adaptación de modulación aumenta la complejidad del sistema y el coste. Por lo tanto, el desarrollo de un esquema regulador adaptable que combina estas técnicas para lograr el equilibrio adecuado en la comunicación y la iluminación es un área clave que requiere atención.

7.4 Interferencia en la iluminación.

El ahorro de energía, y en particular, el elevado consumo de los sistemas de iluminación tradicionales, están provocando una reducción progresiva de la utilización de las fuentes incandescentes y un crecimiento de las iluminaciones de estado sólido. En los últimos años, se ha producido un rápido desarrollo de este tipo de fuentes, y se estima que van a ser la principal fuente de iluminación durante los próximos años. Sin embargo, estos dispositivos ofrecen nuevos beneficios, tales como la capacidad de transmisión media / alta de datos. Esto es lo que se conoce como VLC, que es una de las áreas de trabajo más interesantes en las comunicaciones ópticas inalámbricas.

Normalmente, los sistemas de comunicación ópticos inalámbricos convencionales utilizan emisores y receptores ópticos que trabajan en longitudes de onda infrarrojas. Fue debido a que había muchos de LEDs que trabajan en esta banda. Por otra parte, la fuente de interferencia principal de estos sistemas, la luz visible, se evita. Incluso en estas situaciones, como los receptores recogen la energía óptica en un amplio margen de longitudes de onda, los sistemas de iluminación introducen altos niveles de interferencia.

Las interferencias producidas por las fuentes de iluminación introducen componentes de banda estrecha en frecuencias diferentes, que dependen del tipo utilizado de lámparas. Por ejemplo, las lámparas incandescentes generan armónicos de 100 Hz a 800 Hz aproximadamente. Este fenómeno es debido a la frecuencia de 50 Hz de la fuente de alimentación. En lámparas fluorescentes, como los elementos utilizados y las propiedades físicas son diferentes a las incandescentes (arco voltaico, ionización del gas argón y átomos de mercurio, la luz visible generada por átomos de fósforo), se generan señales con características diferentes. En concreto, estas interferencias tienen armónicos de 50 Hz a cerca de 2 kHz [170].

Para reducir estos efectos de las interferencias, se utilizan filtros ópticos en el sistema de recepción, que eliminan las emisiones visibles. También se utilizan técnicas de filtrado y modulación de la señal eléctrica para reducir la interrupción que no haya sido eliminada por el filtrado [170].

En las comunicaciones de VLC no es posible introducir una etapa de filtro óptico debido a que las comunicaciones se llevan a cabo en esta banda, por lo que será necesario introducir sistemas más eficaces de reducción de la interferencia en la etapa de proceso eléctrico de la señal recibida. Una opción de los sistemas de reducción de la interferencia es el de filtrado adaptativo.

Uno de los procesos de reducción de la interferencia propuestos aplicado a un sistema básico de comunicación VLC consiste en un enlace analógico para la transmisión de señales de audio de banda base. Este sistema permite estudiar la solución propuesta de una manera simple, sin el uso de circuitos electrónicos complejos. Las señales que se transmiten por el enlace de VLC son generados por medio de una tarjeta de sonido del ordenador. La misma tarjeta de sonido se utiliza para la adquisición y la digitalización de las señales recibidas. Finalmente, los algoritmos de procesamiento se implementan en el equipo mediante herramientas de software. De esta manera, es fácil realizar reconfiguraciones en el sistema y el cambio parámetros en el software para la obtención del mejor esquema para la aplicación. El diagrama de bloques del sistema se presenta en Figura 7-3 [171].

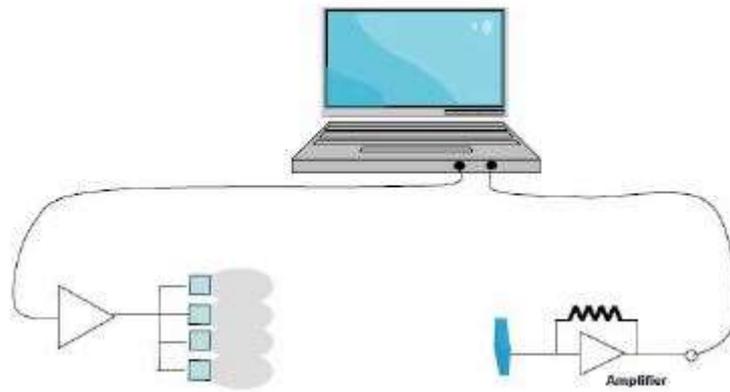


Figura 7-3. Diagrama de bloques [171].

El dispositivo emisor óptico es una lámpara con un LED blanco. Este tipo de dispositivos presentan un peor rendimiento respecto al ancho de banda que otras alternativas que generan luz blanca, como por ejemplo el LED RGB, debido al efecto de persistencia óptica de la cubierta del fósforo del LED blanco. Este efecto reduce la frecuencia de variación de la señal óptica generada, ya que la iluminación no se apaga bruscamente cuando la corriente de excitación del LED está apagada [171].

La lámpara que se utiliza consiste en una matriz de 20 LEDs blancos en conexión en paralelo. Este LED se alimenta por un circuito de excitación basada en el controlador TDA2030. El esquema básico se muestra en la Figura 7-4.

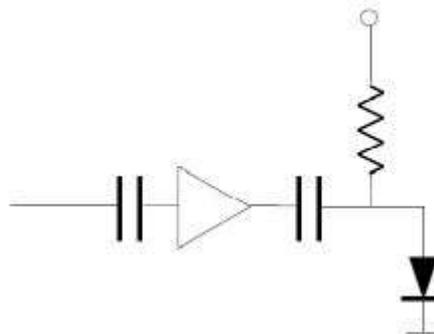


Figura 7-4. Esquema básico del LED [171].

La resistencia de polarización controla la intensidad de la iluminación de los LEDs cuando no hay señal a transmitir. El valor de la resistencia adecuada permite reducir a niveles insignificantes (no detectados por el ojo humano) las fluctuaciones de la luz de la señal transmitida. Por lo tanto, se mantiene el correcto funcionamiento de la lámpara como dispositivo de iluminación en ambas situaciones, cuando hay señal de emisión y cuando no la hay.

La etapa de recepción, cuyo esquema se presenta en la Figura 7-5, hace uso de un fotodiodo HAMAMATSU S5107 como dispositivo de recepción óptico, y un amplificador de transimpedancia HAMAMATSU C9052-01. La señal se procesa, gracias a este sistema se pueden realizar enlaces ópticos inalámbricos de alta fidelidad y con una cobertura superior de 3 metros [171].

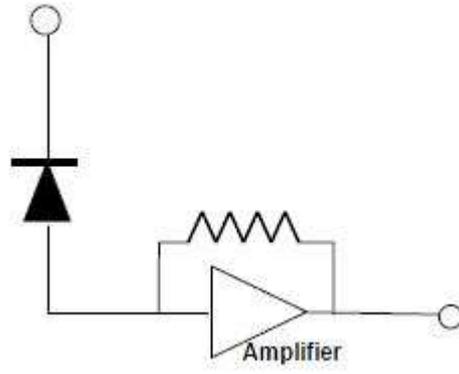


Figura 7-5. Esquema básico receptor [171].

8 ESTADO DEL ARTE DE SOLUCIONES BASADAS EN VLC

En este capítulo se van a desarrollar algunas de las soluciones reales implementadas de sistemas de comunicación por luz visible. Como se vio en el Capítulo 6 existen muchas posibles aplicaciones de esta tecnología emergente pero en el mundo real se han implementado una minoría. Se espera que de aquí a unos años, las aplicaciones reales se hayan implementado en muchos ámbitos de nuestra vida cotidiana. Actualmente empresas como pureLiFi, América LiFi, LightBee e incluso Disney han desarrollado aplicaciones reales.

8.1 pureLiFi

pureLiFi es la empresa co-fundada por el Prof. Haas, el "padre de LiFi", quien es reconocido como el líder en el campo. pureLiFi ofrece acceso inalámbrico de alta velocidad omnipresente que ofrece altas densidades de datos, mayor seguridad de datos que la tecnología WiFi, junto con las propiedades inherentes que eliminan la intrusión no deseada de la red externa. Además, la integración de los servicios de iluminación y de datos genera una reducción medible tanto en complejidad de la infraestructura como en el consumo de energía [172].

pureLiFi está trabajando con una serie de socios para desarrollar y entregar soluciones de comunicación de datos a alta velocidad innovadoras y rentables que se pueden integrar dentro de las infraestructuras de iluminación LED existentes.

- Los socios tecnológicos: En los sectores de la comunicación o de iluminación que se están integrando los servicios de datos y de iluminación para reducir el consumo de energía y la complejidad de la infraestructura al tiempo que aumenta la manejabilidad, la eficiencia y la rentabilidad de la prestación de servicios públicos.
- Los proveedores de soluciones: Especialistas en infraestructura que incluyen constructores, empresas contratistas, empresas de ingeniería mecánica y eléctrica, informática y / o especialistas en infraestructura de iluminación.
- OEM: Los fabricantes de hardware que están interesados en la integración de tecnología de receptor VLC dentro de ordenadores portátiles, teléfonos inteligentes o tabletas.

8.1.1 Soluciones

A medida que el verdadero pionero de los productos LiFi, pureLiFi tiene una comprensión profunda y extensa de la tecnología está en una posición única para acelerar el desarrollo de productos y la adopción LiFi más que cualquier otro participante. Su estrategia de productización única muestra una verdadera comprensión de los retos de la adopción en el mercado de la tecnología emergente LiFi [172] i.

8.1.1.1 Li-1st

El Li-1st proporciona la primera oportunidad importante que permite a los clientes desarrollar y probar aplicaciones VLC para las soluciones de comunicación de datos de alta velocidad que utiliza infraestructuras LED.

El producto ofrece comunicación *full* dúplex con una capacidad de 11,5 Mbps, tanto en el enlace descendente

como en el enlace ascendente en una distancia de hasta tres metros, mientras que simultáneamente proporciona luz. La distancia conseguida por el sistema depende sólo de la potencia de la fuente de luz. Li-1st ofrece una solución *plug-and-play* para el acceso a Internet punto a punto inalámbrico seguro con una amplia gama de luminarias LED.

El Li – 1st se ha creado para proporcionar una plataforma para proyectos piloto con socios pureLiFi, y establecer el compromiso en el camino de la tecnología de alta velocidad de pureLiFi, sobre la que este producto es el paso inicial.

8.1.1.2 Li-Flame

El Li-Flame es la primera solución de red inalámbrica, de alta velocidad y ubicua del mundo utilizando VLC. La tecnología Li-Flame proporciona densidades de datos sustancialmente mayor que las soluciones Wi-Fi y sus propiedades inherentes de seguridad eliminan la intrusión no deseada de la red externa. Además, la fusión de la iluminación con las comunicaciones inalámbricas proporciona una reducción medible tanto en la complejidad de la infraestructura como en el consumo de energía.

Li-Flame proporciona:

- Comunicación *half* dúplex con un enlace de 10 Mbps, tanto descendente como ascendente en un rango de hasta tres metros con las lámparas estándar; esto se traduce en una densidad de velocidad de datos de 2 Mbps por metro cuadrado.
- Movilidad total con una alta velocidad de datos debido a la densa instalación de puntos de acceso Li-Fi.
- Múltiples usuarios por cada punto de acceso Li-Fi, a través de acceso múltiple, mientras que conserva gran ancho de banda para cada usuario.
- Comunicaciones inalámbricas seguras limitadas por las paredes, lo que elimina el riesgo de interceptación de la señal por usuarios externos.
- Comunicación inalámbrica segura en ambientes donde las frecuencias de radio no son deseables o no está disponible.
- Construcción de entornos más flexibles gracias a la eliminación del cableado.
- Una extensa gama de aplicaciones de comunicación inalámbrica que incluye y amplía las redes Wi-Fi.
- Un suministro rentable de luz y datos a través de una única infraestructura.

Para implementar el sistema Li-Flame sólo hacen falta dos accesorios, la unidad de techo y la unidad de escritorio como se muestra en la Figura 8-1, donde múltiples puntos de acceso a lo largo de un espacio interior permiten a los usuarios moverse de un punto de acceso a otro sin ninguna interrupción en su flujo de datos de alta velocidad.

Unidad de techo Li-Flame

- Transmite los datos y energía a través del puerto Ethernet estándar.
- Instalación sencilla.
- Acceso múltiple.
- Control de traspasos que posibilita la conmutación sin fisuras entre los puntos de acceso.

Unidad de escritorio Li-Flame

- Este dispositivo se conecta al cliente mediante USB, y llega a transmitir mediante enlace ascendente infrarrojo una velocidad de hasta 10 Mbps a la unidad Li-Flame del techo.
- El traspaso capaz, que permite al usuario pasar de un punto de acceso a otro sin perder la conexión de datos de alta velocidad.
- Transceptor giratorio, se puede ajustar por el usuario para optimizar la conexión.
- Alimentado por batería y portátil



Figura 8-1. Accesorios necesarios para LiFlame [172].

8.1.1.3 LiFi-X

El LiFi-X es la evolución del primer sistema LiFi del mundo, el Li-Flame. El sistema ofrece a los socios la posibilidad de implementar una solución LiFi totalmente en red. A diferencia de los productos existentes VLC, el LiFi-X soporta acceso múltiple, itinerancia, movilidad completa y facilidad de uso, todo es proporcionando un nivel de experiencia de usuario que es comparable y más seguro que las tecnologías inalámbricas existentes, tales como WiFi.

El LiFi-X ofrece densidades altas de datos y elimina la intrusión no deseada de la red externa. Además, la fusión de la iluminación con las comunicaciones inalámbricas proporciona una reducción medible tanto en complejidad de la infraestructura y el consumo de energía.

LiFi-X ofrece:

- Comunicación dúplex completo con un enlace de 40 Mbps tanto descendente como ascendente.
- Movilidad total ya que la estación portátil está alimentada por USB.
- Múltiples usuarios por punto de acceso LiFi.
- Comunicaciones inalámbricas seguras limitadas por las paredes, lo que elimina el riesgo de interceptación de señal a los intrusos externos.
- Comunicación inalámbrica segura en ambientes donde las frecuencias de radio no son adecuados
- Implementaciones flexibles
- Amplia gama de aplicaciones de comunicación inalámbrica que superan a las aplicaciones WiFi.
- Un suministro rentable de luz y datos a través de una única infraestructura

En la Figura 8-2 se muestran los accesorios necesarios para implementar este sistema, para ello se requiere un punto de acceso LiFi-X, y una estación LiFi-X.



Figura 8-2. Accesorios para implementar LiFi-X [172].

Punto de Acceso LiFi-X (AP)

- Soporte para alimentación a través de Ethernet (PoE) o *Power Line Communications* (PLC).
- Instalación sencilla.
- Conectarse a una amplia gama de lámparas LED.
- Acceso múltiple.
- Control de traspasos que permite la conmutación sin fisuras entre los puntos de acceso.

LiFi X-estación (STA)

- USB 2.0 con alimentación.
- Soporta traspaso, que permite al usuario moverse manteniendo su sesión inalámbrica.

Para ver las novedades y las aplicaciones más novedosas de esta empresa, se puede visitar su página web

8.2 América LiFi

Es una empresa chilena creada en 2014. Esta empresa nació con el espíritu de ser un referente en tecnología a nivel nacional e internacional [173].

Actualmente, América LiFi ve alcanzada esa visión al ser el representante exclusivo de los productos y servicios OLEDCOMM LiFi para toda Latinoamérica, poniendo a disposición de la industria una amplia gama de soluciones que combinan la iluminación LED y la tecnología LiFi.

Esta empresa se dedica a las comunicaciones inalámbricas de alta seguridad, con control de acceso a la información de la empresa según la ubicación de manera segura.

8.2.1 Soluciones

Como se ha visto en capítulos anteriores, la tecnología LiFi tiene infinidad de aplicaciones y permite su uso en innumerables servicios y diferentes objetivos, por lo que su uso comercial es cada vez más amplio, entregando al cliente muchos beneficios.

En esta empresa, diseñan la aplicación que más se acomode a las necesidades del cliente, ya que cada usuario tiene necesidades diferentes y distintos objetivos [173].

8.2.1.1 GEOLiFi

Gracias a GEOLiFi, con los accesorios adecuados, además de la iluminación proporcionada por los LEDs, lo transforma en un sistema de geolocalización de alta precisión.

Mientras se encuentra encendida una lámpara LED, esta recibe y envía a través de la red LiFi la dirección IP del equipo vigilado y dependiendo de la disposición y asignación de cada celda LED. Puede conseguir una exactitud de hasta 10 cm.

Como se vio en capítulos anteriores, la localización es una de las aplicaciones más desarrolladas en la tecnología VLC, esta solución presenta aplicaciones reales que ya han sido implementadas, como por ejemplo:

- Geolocalización dentro de los estacionamientos: Este sistema permite visualizar tanto los lugares disponibles en un parking, como encontrar el vehículo estacionado. Para encontrar un sitio libre donde poder estacionar, se hace mediante la búsqueda de identificadores libres, mientras que para buscar el vehículo aparcado, las células LED le asignaron al lugar de estacionamiento un identificador y con ese ID se puede acceder al lugar donde está el vehículo, con una precisión bastante alta.
- GEOLiFi para almacenes: Con este sistema, gracias y únicamente a la iluminación LED, las luces emiten etiquetas GPS que permiten posicionar a los empleados, maquinaria y a los productos almacenados.

8.2.1.2 Equipos LiFiDuplex

LiFiDuplex es la solución más moderna y avanzada que nos ofrece América LiFi para establecer comunicación punto a punto, completamente bidireccional, dentro de una red Ethernet.

Cada lámpara LED está equipada con un receptor LiFi y alimentada por una línea de comunicación (PLC) o a través de un enrutador Ethernet (PoE), que entrega información desde una PAN o Internet a cada lámpara.

Gracias a los equipos LiFiDuplex se puede tener internet móvil, cualquier aplicación que pueda usarse a través de comunicación inalámbrica, redes inalámbricas, entre muchas otras.

8.2.1.3 LiFiONEWAY

Con los productos LiFiONEWAY la red de iluminación se transforma en una red unidireccional inalámbrica compuesta por dos o más equipos interconectados como parte de una Red de Área Personal.

Cada LED es equipado con un transmisor LiFi, así que cuando se encienden las luces, cada dispositivo puede recibir información a través de la luz.

Se puede utilizar para el control del desplazamiento en tiempo real, o la publicidad en tiempo real, entre otros.

Algunas de las aplicaciones implementadas son:

- GEOLiFi y LiFiONEWAY para la iluminación pública: Con este servicio se puede ir por la ciudad recibiendo información útil, como por ejemplo, información cultural o comercial a los turistas o ciudadanos.
- Guía para museos: Esta aplicación utiliza la red de iluminación del museo para proporcionar a los visitantes información sobre los monumentos.

Las tabletas o teléfonos inteligentes sirven como receptor para la Guía Inteligente, la información aparece automáticamente en el dispositivo del visitante de acuerdo a su posición en el interior del museo.

- Soluciones para centro comerciales: Este sistema permite ofrecer más servicios a sus clientes gracias a la alta precisión de la localización bajo techo, o sistema GPS-LiFi. Por lo tanto se generan nuevos ingresos por alquiler de espacio publicitario por parte de las tiendas del centro comercial.

8.2.1.4 Comunicaciones inalámbricas de alta seguridad

Para empresas de la industria de defensa que proveen sistemas electrónicos y de comunicaciones, LiFi ofrece un sistema de comunicaciones de alto estándar y alta seguridad para operaciones en

medioambientes hostiles. Es fácil controlar la apertura de foco de la solución de iluminación LED. Eligiendo la apertura focal apropiada frente al LED, se puede elegir con precisión dónde se desea enviar los datos. Más aún, como la luz no atraviesa las paredes, la información es más segura que las tecnologías basadas en radiofrecuencia.

8.2.1.5 Soluciones LiFi para empresas

Para mejorar el control del acceso a la información de una empresa para que los recursos posean diferentes niveles de confidencialidad –confidencial, sólo para uso Interno, Privado, Público, etc.; América LiFi proporciona una solución LiFi que entrega acceso a los datos de la compañía en forma específica, dependiendo del tipo de usuario y su ubicación.

8.2.1.6 Plataforma LiFi para Entrenamiento y Organismos de Enseñanza

Para enseñar a los alumnos de un aula usando esta tecnología innovadora se emplea esta solución: el kit LiFi para estudiantes. Este kit entrega a los estudiantes la oportunidad de familiarizarse con el fascinante campo de las comunicaciones LiFi. Los estudiantes aprenderán las competencias básicas, tales como establecer comunicación inalámbrica entre su lámpara de escritorio y su *tablet*, comprendiendo cómo esta tecnología puede cambiar su visión de la luz. Los estudiantes también efectuarán análisis de casos de los límites de esta nueva tecnología de comunicaciones inalámbrica.

8.2.1.7 Accesorios

Como VLC es una tecnología reciente, apenas se ha implementado la tecnología necesaria para su uso y además los equipos que se encuentran actualmente en el mercado todavía no cuentan con la capacidad de utilizar LiFi. América LiFi ha desarrollado un accesorio que permite recibir la señal luminosa LiFi y así poder transformar cada teléfono móvil o tableta, en un equipo receptor VLC.



Figura 8-3. Llave GeoLiFi [173].

Esta “llave”, mostrada en la Figura 8-3, transforma los equipos electrónicos en equipos compatibles con la tecnología LiFi. Para utilizarlo se inserta en la entrada Jack de los equipos y permite recibir la señal LiFi.

Este accesorio es el primer receptor para entrar en el mundo de la LiFi, es este conector específicamente diseñado para *smartphone* y tabletas EDGE o 3G, para su uso GEOLiFi.

Otro de los posibles accesorios que se muestra en la Figura 8-4 es el conector USB portátil ONEWAYLiFi para intercambiar información digital usando su sistema de iluminación a una velocidad de 1 Mbits/s



Figura 8-4. Conector ONEWAYLiFi [173].

Para ver las novedades y las aplicaciones más novedosas de esta empresa, se puede visitar su página web <http://www.americaliFi.com/wp/>

8.3 LightBee

LightBee es una empresa joven integrada por un equipo con una sólida experiencia en Comunicaciones por Luz Visible (VLC). Cada vez hay más sectores en los que se puede aplicar esta tecnología, como hogares, semáforos, hospitales, hoteles, etc., en los que ya se están utilizando dispositivos de iluminación LED [174].

LightBee integra la tecnología VLC en tres áreas principales:

- Ofreciendo un uso más sostenible y eficiente de la tecnología LED: aplicaciones de iluminación y señalización, ciudades inteligentes, comunicaciones *Machine to Machine* (M2M).
- Aplicaciones VLC para la utilización de dispositivos móviles como control de accesos, validación, llave maestra o soluciones de pago seguras.
- Interfaces ópticos inalámbricos (comunicaciones en el sector de automoción, salud o aviónica).

8.3.1.1 LightDim

LightDim será la próxima revolución en el mercado de iluminación LED, ofreciendo una solución más eficiente, fiable e inteligente y creando nuevas interfaces de comunicación entre ciudadanos y máquinas [174].

Lightdim es un pequeño dispositivo para alumbrado LED que puede controlarse de forma remota o autónoma. Su misión es optimizar la función de las lámparas ofreciendo una mayor durabilidad y una regulación completa (de 0 a 100%) del flujo lumínico.

Lightdim desarrolla códigos específicos que permiten que las bombillas LED se refresquen a través del encendido y apagado a muy alta velocidad, de manera que se refrescan sin ninguna molestia para el ojo humano; por lo tanto, aunque el calor disipado es el mismo, se reduce la temperatura máxima a la que está sometida la LED.

En consecuencia, se puede controlar la intensidad lumínica de las bombillas LED mediante la modificación del ciclo de trabajo de la señal de excitación de todo el rango (de 0 a 100%) para cada lámpara, lo que permite intensificar exclusivamente aquellas luminarias públicas ubicadas en lugares críticos, como cruces e intersecciones, mientras que el resto del circuito de alumbrado puede tener una intensidad lumínica en niveles de seguridad.

Además del ahorro energético derivado del funcionamiento de las luminarias que cuenten con este dispositivo, la aplicación tiene el valor añadido de que el haz de luz puede crear redes ópticas inalámbricas de información a través de infraestructuras urbanas de alumbrado público y semáforos, que permitirán la interacción con ciudadanos, personas de visibilidad reducida o turistas sin ningún tipo de interferencia o ruidos asociados a campos electromagnéticos y dando un nuevo significado a las *smart cities* o ciudades inteligentes.

Lightdim permite convertir el alumbrado público y los semáforos en grandes redes inteligentes para peatones, turistas o invidentes. Esta aplicación, premiada por Vodafone en el año 2010, ofrece un sistema de navegación para personas invidentes a través del haz de la luz LED.

- Permite a las personas con discapacidad visual percibir el estado de los semáforos (o cualquier otro tipo de elemento de señalética urbana).
- Evita indeterminaciones y contaminación acústica.
- Proporciona ayudas a la orientación para situarse dentro de la ciudad.
- El mensaje de audio recibido desde el receptor se puede adaptar a cualquier idioma.
- SINAI puede usar otras fuentes de iluminación exterior (lámparas, anuncios luminosos) o interior (iluminación en vestíbulos o pasillos de edificios).
- Crea una red óptica inteligente como un “GPS” virtual (incluso en aquellos lugares donde falla el GPS).

8.3.1.2 LightNosis

LightNosis es una solución de comunicaciones M2M para el mantenimiento no intrusivo de cualquier vehículo, gracias a una conexión automática de la unidad de control del vehículo con la compañía responsable de su mantenimiento [174].

Los nuevos sistemas de diagnóstico de vehículos incluyen todo tipo de información sobre el estado de sus componentes, y se almacenan en la unidad de control electrónico del vehículo. Dado que se dispone de estos datos sólo en el taller, es posible que en los intervalos de revisión del vehículo no se detecten anomalías a tiempo y se produzcan daños graves que se podrían haber evitado con revisiones más frecuentes. Sin embargo, no es práctico ni económico incrementar estas revisiones de forma generalizada.

Esta aplicación permite transmitir de forma segura la información relacionada con el estado de cualquier vehículo por medio de un sistema VLC que permite que los faros LED transmitan a través del haz de luz información relativa al código de acceso al garaje y a la vez informar de cualquier alarma o incidencia en el vehículo. El receptor óptico ubicado junto al acceso decodifica la información y automáticamente la transmite a la empresa responsable del mantenimiento, ofreciendo una completa evaluación de la fiabilidad del vehículo y el control de la garantía de cada componente, así como notificar al propietario de la necesidad de llevar al vehículo a revisión cuando realmente se requiera.

8.3.1.3 Interfaces Ópticos Inalámbricos

Existen espacios físicos e infraestructuras en los que el uso de sistemas inalámbricos convencionales por radiofrecuencia puede ser arriesgado debido a los altos niveles de interferencias electromagnéticas, que pueden afectar a equipos electrónicos sensibles ubicados cerca de esa fuente de energía RF. Dos buenos ejemplos de infraestructuras donde los niveles de EMI están fuertemente restringidos son los hospitales y los aviones, en los que el fallo de algún sistema crítico debido a interferencias electromagnéticas puede causar graves daños e incluso la pérdida de vidas humanas. Para ello los sistemas LighBee proponen dos opciones: interfaz óptico inalámbrico para ARINC 479 e interfaz óptico inalámbrico para emisión de datos [174].

8.3.1.3.1 Interfaz óptico inalámbrico para ARINC 479

La industria aérea puede beneficiarse de la incorporación de sistemas aviónicos inalámbricos, principalmente por la gran reducción de cableado eléctrico, lo que ayuda a la reducción de costes operativos. La instalación de un interfaz óptico inalámbrico en redes de datos aviónicos proporciona conexiones inalámbricas sin generar interferencias electromagnéticas que afecten a otros sistemas que se encuentren en el avión. Este interfaz actúa de modo totalmente transparente con la topología del bus de datos aviónico existente sin necesidad de modificación alguna de ningún equipo compatible con el bus de datos instalado previamente.

8.3.1.3.2 Interfaz óptico inalámbrico para emisión de datos

El canal de iluminación es perfecto para la transmisión de imagen o sonido o para el direccionamiento de comunicaciones a baja velocidad de sensores. La emisión de información puede ser útil aplicada a diversos escenarios interiores, como la transmisión de vídeo o audio en aplicaciones domésticas o donde se requiera un canal sin restricciones electromagnéticas (hospitales, industria nuclear, plantas industriales, aviones). También puede ser usado en exteriores como canal de transmisión de imágenes o sonido a través de farolas, semáforos, etc. Además, se puede utilizar en aquellos casos en los que se permite el uso de RF, pero en los que las bandas de frecuencias comerciales se saturan con rapidez.

8.3.1.4 Aplicaciones móviles

Siempre se ha dicho que en el futuro las personas sólo necesitarán una cosa al salir de sus casas, sus móviles. Con las aplicaciones móviles, esta empresa pretende ofrecer la solución que todos buscan mediante la tecnología VLC.

Las aplicaciones móviles con VLC permiten utilizar cualquier dispositivo móvil para distintas finalidades, como control de accesos, publicidad o solución de pago seguro, mediante el uso del flash de la cámara del móvil o tableta o a través del parpadeo de la pantalla. La técnica de comunicación utilizada se encuentra dentro de los paradigmas de las llamadas VLC. Consiste en modular la señal de luz mediante la transmisión de códigos binarios a una velocidad suficientemente alta para que resulte imposible de detectar por ninguna videocámara o por el ojo humano (se percibirá como una simple luz de flash, no pudiendo distinguirse los valores individuales transmitidos). Nuestras aplicaciones para móviles sólo necesitan un dispositivo móvil y un pequeño receptor óptico que puede ser integrado en la cerradura de una puerta, un coche o en un TPV para pagos mediante móviles.

Todas las soluciones existentes están basadas en radiofrecuencias que se irradian entorno a los usuarios, de manera que las señales pueden ser capturadas y/o interferidas por inhibidores de frecuencia u otros dispositivos. Con las aplicaciones móviles VLC, la información es enviada a través del haz de luz visible a corta distancia del receptor, con lo que la información enviada no puede ser interceptada o capturada por ningún dispositivo de grabación de imagen debido a la alta velocidad a la que es enviada. La segunda ventaja radica en que los usuarios de los móviles no necesitan implementar ningún dispositivo adicional para poder utilizarlos como sistema de acceso o dispositivo de pago seguro, ya que se puede modular tanto el flash de la cámara como la luz de la pantalla del móvil.

Para ver las novedades y las aplicaciones más novedosas de esta empresa, se puede visitar su página web <http://lightbeecorp.com/>

8.4 DISNEY

Otra de las soluciones basadas en las comunicaciones por luz visible son los juguetes fabricados por Disney.

Una de las contribuciones en las investigaciones de los sistemas VLC ha sido gracias a Disney Research. Los sistemas por luz visible crean oportunidades a bajo coste, seguras, y amigables con el medio ambiente. Disney Research se centra en redes entre juguetes y lámparas. Sus estudios se dirigen a un diseño del sistema completo que abarca desde prototipos de hardware para los protocolos de comunicación y aplicaciones [175].

- Protocolo Software LED-a-LED: Las comunicaciones por luz visible LED-a-LED permiten la interacción entre juguetes utilizando solamente LEDs, estos se utilizan para transmitir y recibir mensajes de datos. Cuando múltiples dispositivos están conectados unos con otros, organizan la comunicación mediante sus protocolos software.
- Vestidos de princesas mágicos: Una varita mágica con un LED mágicamente desencadena efectos de luz en un vestido de princesa. Muchos LEDs están integrados en los vestidos que se comunican con la varita, cuando la varita mágica apunta hacia el vestido, se establece una comunicación entre ambas y se encienden los LEDs del vestido.
- Juguetes y *smartphones*: La comunicación entre *smartphones* y juguetes utilizando sistemas VLC,

usando los LEDs del juguete y el flash de la cámara del Smartphone.

- Comunicación V2V: Los coches de juguete de bajo coste utilizan LEDs para crear efectos de iluminación. Utilizando estos LEDs, los coches se pueden comunicar unos con otros, basándose en el software del microcontrolador.

9 CONCLUSIÓN

Los objetivos marcados al principio de este TFG era conocer más la tecnología emergente de las comunicaciones por luz visible. En los capítulos anteriores se han completado todos los objetivos propuestos.

9.1 Conclusión

Gracias a que este Trabajo Fin de Grado es sobre la investigación de Estado del Arte de la comunicación por luz visible, se han adquirido conocimientos cimentados sobre los sistemas de comunicación inalámbricos por luz visible, como sus características destacando su doble funcionalidad de iluminación y comunicación simultáneamente, además de la seguridad tanto de los datos transmitidos como para las personas, ya que no es perjudicial para la salud y las altas velocidades que puede alcanzar; sus ventajas (fácil implementación, económico y seguridad entre otras) y desventajas (corto alcance, necesidad de visibilidad directa, actualmente pocos dispositivos están adaptados para que esta comunicación sea visible) y las comparaciones con otros sistemas de comunicación utilizados en la actualidad.

También hay que destacar que VLC no reemplazará a las tecnologías inalámbricas actuales como WiFi, sino que se complementarán, ya que los sistemas VLC necesitan visibilidad directa y es posible que la transmisión no llegue a todos los lugares deseados, además complementando ambas tecnologías, Li-Fi y WiFi, se podrán solucionar las desventajas de dichas tecnologías.

Los sistemas VLC, es una solución alternativa que va ligada a la protección del medio ambiente y sobre todo al del ser humano, que se encuentra expuestos a infinidad de aplicaciones y accesorios que son imprescindible para el uso cotidiano y la gran mayoría de ellos funcionando en las frecuencias del espectro electromagnético que son perjudiciales para la salud.

También destacar que hay multitud de posibles aplicaciones de esta tecnología que nos pueden ayudar a vivir de una manera más cómodo, por ejemplo, gracias a los sistemas de localización cuando se visite un museo, el sistema VLC, nos podrá ofrecer información adicional sobre la obra de arte que se está observando, o incluso pueden suponer una gran ayuda para las personas invidentes en cualquier situación de su día a día.

9.2 Líneas futuras

Este Trabajo Fin de Grado al ser teórico puede ser antecesor de una gran variedad de trabajo. Además al ser una tecnología todavía en desarrollo pueden surgir gran cantidad de aplicaciones. Para futuros TFG, en concreto, propongo un sistema VLC con modulación OFDM mediante Matlab, ya que sería un trabajo muy completo y enfocaría aspectos fundamentales del Grado de Ingeniería de las Tecnologías de las Telecomunicaciones.

Por un lado, del ámbito de la parte de señales y sistemas de comunicación sería la aplicación de la modulación, del área de electrónica sería la configuración del transmisor y receptor, y por último del área de telemática tendría la programación mediante Matlab.

Referencias

- [1] «Li-Fi,» [En línea]. Available: <http://www.areatecnologia.com/nuevas-tecnologias/li-fi.html>.
- [2] [En línea]. Available: <http://visiblelightcomm.com/what-is-visible-light-communication-vlc/>.
- [3] M. H. D. G. Nicolas Sklavos, de *System-Level Design Methodologies for Telecommunications*, 2014, pp. Capítulo 2, Introduction..
- [4] M. H. D. G. Nicolas Sklavos, de *System-Level Design Methodologies for Telecommunications* , 2014, pp. Capítulo 2, History of Visible Communications.
- [5] «Wikipedia fotófono,» [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photophone>.
- [6] «Wikipedia Flash-Matic Tuning,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Zenith_Flash-matic.
- [7] «Wikipedia VLC,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_light_communication.
- [8] «Wikipedia RONJA,» [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/RONJA>.
- [9] C. Pohlmann, «Visible Light Communications,» p. History.
- [10] T. G. Kang, «IEEE 802.15.7. Regulation Document Configuration,» p. Spectrum Frecuency, 2009.
- [11] «CFF,» [En línea]. Available: <http://www.yorku.ca/eye/cff.html>.
- [12] Tae Gyu Kang, «IEEE 802.15.7. Regulation Document Configuration,» p. Product Safety, 2009.
- [13] [En línea]. Available: https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb?language=es.
- [14] J. E. d. I. Á. Bariga, de *Estudio y simulación de un sistema ACO-OFDM para comunicaciones ópticas inalámbricas*, Universidad de Sevilla, p. Capítulo 3.
- [15] [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_visible.
- [16] N. G. R. K. S. S. Nishant Bharti, de *Visible Light Communication*, pp. Capítulo 1, Visible Light Communication.
- [17] N. G. R. K. S. S. “.] Nishant Bharti, de *Visible Light Communication*, pp. Capítulo 1, Merits and Demerits of VLC.
- [18] M. H. D. G. Nicolas Sklavos, «System-Level Design Methodologies for Telecommunications,» 2014, pp. Capítulo 2, VLC: Advantages and Disadvantages.

- [19] V. Morozhenko, de *Infrared Radiation*, 2012.
- [20] [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>.
- [21] J. E. d. I. Á. Bariga, de *Estudio y simulación de un sistema ACO-OFDM para comunicaciones ópticas inalámbricas*, Universidad de Sevilla, pp. Capítulo 3, Comparación IR.
- [22] [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_frequency.
- [23] J. E. d. I. Á. Bariga, de *Estudio y simulación de un sistema ACO-OFDM para comunicaciones ópticas inalámbricas*, Universidad de Sevilla, pp. Capítulo 3, Comparación RF.
- [24] P. C. R. T. Jyoti Rani, «Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology In Wireless communication,» p. Introduction, 2012.
- [25] [En línea]. Available: <http://www.lifi-centre.com/>.
- [26] [En línea]. Available: technopits.blogspot.com/technology/cgap.org/2012/01/.
- [27] P. C. R. T. Jyoti Rani, «Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology In Wireless communication,» p. Working Tecnology, 2012.
- [28] P. C. R. T. Jyoti Rani, «Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology In Wireless communication,» p. Application on LiFi.
- [29] [En línea]. Available: <http://www.vlcc.net/modules/xpage1/>.
- [30] [En línea]. Available:] <http://vlca.net/about-vlca/>.
- [31] [En línea]. Available: www.xakatahome.com.
- [32] [En línea]. Available: <http://comunicationreserch.blogspot.com.es/>.
- [33] M. Ali, Seminar on Visible Light Communications.
- [34] N. G. R. K. S. S. Nishant Bharti, «Visible Light Communication,» pp. Capítulo 1, VLC Link.
- [35] [En línea]. Available:] <http://www.elandroidelibre.com/2015/11/lifi-asi-es-la-tecnologia-100-veces-mas-rapida-que-el-wifi.html>.
- [36] C. R. M. Nieto, «Diseño y simulación de las etapas de ecualización para transmisión y recepción del sistema de comunicación por luz visible (VLC) con modulación OOK utilizando filtros digitales,» Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2013, pp. Capítulo 2, Principales componentes de una comunicación óptica.
- [37] C. R. M. Nieto, «“Diseño y simulación de las etapas de ecualización para transmisión y recepción del sistema de comunicación por luz visible (VLC) con modulación OOK utilizando filtros digitales,» Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2013, pp. Capítulo 2, Modelo básico de un sistema VLC..
- [38] J. E. d. I. Á. Bariga, «Estudio y simulación de un sistema ACO-OFDM para comunicaciones ópticas inalámbricas,» Universidad de Sevilla, pp. Capítulo 3, La configuración del enlace OWC.

- [39] S. Z. S. M. I. P. A. H. M. I. a. Z. G. S. M. I. Petr Chvojka, «Channel Characteristics of Visible Light Communications Within Dynamic Indoor Environment,» 2015.
- [40] C. G. Lee, «Visible Light Communication,» Chosun University, South Korea, pp. Capítulo 2, System description.
- [41] B. L. Flores, de *Visible Light Communication*, Universitat Politècnica de Catalunya, pp. Capítulo 3, Modos de transmisión.
- [42] M. I. R. Ramirez, «Optical Wireless Communications - IR for Wireless Wireless Connectivity,» 2008.
- [43] B. Sklar, de *Rayleigh fading channels in Mobile Digital Communications Systems*, 1997.
- [44] [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading.
- [45] T. Eltoft, «The Rician Inverse Gaussian Distribution: A New Model for Non-Rayleigh Signal Amplitude Statistics,» 2005.
- [46] [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Rician_fading.
- [47] C. G. Lee, «Visible Light Communication,» Chosun University, South Korea , pp. Capítulo 2 , VLC Transmitter.
- [48] [En línea]. Available: <http://blog.ledbox.es/ahorro-eficiencia-energetica/tabla-de-equivalencias-de-las-bombillas-led>.
- [49] N. G. R. K. S. S. Nishant Bharti, «Visible Light Communication,» Capítulo 2, Transmitter.
- [50] N. R. Canada, «Phase-Out of Inefficient Light Bulbs».
- [51] C. R. M. Nieto, de *Diseño y simulación de las etapas de ecualización para transmisión y recepción del sistema de comunicación por luz visible (VLC) con modulación OOK utilizando filtros digitales*, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2013, pp. Capítulo 2, Luz Visible.
- [52] B. L. Flores, de *Visible Light Communication*, Universitat Politècnica de Catalunya, pp. Capítulo 3, Fuentes de luz.
- [53] C. G. Lee, de *Visible Light Communication*, Chosun University, South Korea, pp. Capítulo 3, LED Characteristics.
- [54] [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Illuminance>.
- [55] C. G. Lee, de *Visible Light Communication*, Chosun University, South Korea, pp. Capítulo 2, Channel configuration.
- [56] S.-i. Choi, de *Analysis of VLC channel Based on the Shapes of White-Light LED Lighting*, Chonnam National University, School of Electronics and Computer Engineering.
- [57] B. L. Flores, de *Visible Light Communication*, Universitat Politècnica de Catalunya, pp. Capítulo 3, Receptor.

- [58] [En línea]. Available: <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/Funcionamiento-del-diodo.php>.
- [59] [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_\(electronics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_(electronics)).
- [60] C. G. Lee, de *Visible Light Communication*, Chosun University, South Korea, pp. Capítulo 3, VLC receiver.
- [61] [En línea]. Available: http://itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2_archivos/UNIDAD2TEMA3.PDF.
- [62] C. J. Jiménez, de *Dispositivos activos y componentes pasivos para sistemas DWDM*, Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, Departamento de ingeniería electrónica, 2009, p. Capítulo 10.
- [63] [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Fotometr%C3%ADa_\(%C3%B3ptica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Fotometr%C3%ADa_(%C3%B3ptica)).
- [64] [En línea]. Available: <http://silver.udg.edu/sip/ARXIUS/fotodiodos.pdf>.
- [65] «Diapositivas asignatura electrónica de potencia de la Universidad de Sevilla, "Rectificadores"».
- [66] C. J. Jiménez, de *Dispositivos activos y componentes pasivos para sistemas DWDM*, Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, Departamento de ingeniería electrónica, 2009, pp. Capítulo 10, El fotodiodo PIN.
- [67] C. J. Jiménez, de *Dispositivos activos y componentes pasivos para sistemas DWDM*, Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, Departamento de ingeniería electrónica, 2008, p. 176.
- [68] J. M. L. Higuera, de *Tecnologías Fotónicas y Comunicaciones Ópticas*, Universidad de Cantabria, ETS. Ing. Industriales y de Telecomunicación, pp. Capítulo 5, Diodos fotodetectores PIN.
- [69] M. R. y. A. Blesa, de *Tecnologías Fotónicas y Comunicaciones Ópticas*, p. 121.
- [70] J. M. L. Higuera, de *Tecnologías Fotónicas y Comunicaciones Ópticas*, Universidad de Cantabria, ETS. Ing. Industriales y de Telecomunicación, pp. Capítulo 5, Diodos APD..
- [71] J. M. L. Higuera, de *Tecnologías Fotónicas y Comunicaciones Ópticas*, Universidad de Cantabria, ETS. Ing. Industriales y de Telecomunicación, pp. Capítulo 5, Ruidos en fotodetectores.
- [72] E. M. R. y. A. Blesa, de *“Tecnologías Fotónicas y Comunicaciones Ópticas*, p. 126.
- [73] N. Massa, *Fiber Optic Telecommunication*.
- [74] I. S. Alliance, *Human Factor and Bio-photo Interaction*.
- [75] D. S. G. I. L. B. R. D. C. T. W. R. Samuel M. Berman, *Human electroretinogram responses to video displays, fluorescent lighting, and other high frequency sources*.
- [76] [En línea]. Available: http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema3/tema3_5_1.htm.
- [77] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capitulo 2, Modulation techniques with lighting constraints.

- [78] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 7, OKK BER.
- [79] N. A. T. A. W. A. C. Y.-H. C. Angga Pradana, de *VLC Physical Layer Design based on Pulse Position Modulation (PPM) for Stable Illumination*, School of Electrical and Informatics Engineer, Department of Electrical Engineering Bandung Institute of Technology.
- [80] [En línea]. Available: http://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH7ST_Web.pdf.
- [81] B. L. Flores, de *Visible Light Communication*, Universitat Politècnica de Catalunya, pp. Capítulo 3, Modulación.
- [82] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 7, PPM BER.
- [83] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 7, Vlc modulation methods in time domain.
- [84] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, vol. 2, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 7, IPPM BER.
- [85] S. Arnol, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 7, VPPM BER.
- [86] [En línea]. Available: http://es.slideshare.net/fabys_86/que-es-la-ofdm..
- [87] M. Cervetto, de *Desarrollo de sistema OFDM sobre FPGA*, Argentina, 2010.
- [88] [En línea]. Available: <http://aholab.ehu.es/users/inma/psc/tema3.pdf>.
- [89] [En línea]. Available: <http://www.analfatecnicos.net/archivos/15.SistemasModulacionWikipedia.pdf>.
- [90] [En línea]. Available: <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php>.
- [91] D. García, de *Análisis y simulación de un modem utilizando la técnica digital QPSK*, 2013.
- [92] S. G. H. H. Raed Mesleh, «IMPACT OF CHANNEL IMPERFECTIONS ON SPATIAL MODULATION OFDM», The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications,» 2007.
- [93] J. E. P. Peñafiel, de *Análisis de la tecnología LiFi: comunicaciones por luz visible como punto de acceso a internet, una alturnative de la transmisión de datos*, Cuenca, México, 2015, pp. Capítulo 2, OFDM.
- [94] S. D. S. S. H. H. Xiao Zhang, de *Optimal Power Allocation in Spatial Modulation OFDM for Visible Light Communications*, Edinburgh, 2012.
- [95] S. M. I. a. J. A. S. M. I. Sarangi Devasmitha Dissanayake, «Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems».
- [96] J. .. K. a. J. R. Barry, de *Wireless infrared communications*,.

- [97] B. L. Flores, «Visible Light Communications,» Universitat Politècnica de Catalunya, 2014, pp. Capítulo 2, Estandarización.
- [98] F. Z. V. K. M. I. a. R. P. M. I. Dilukshan Karunatilaka, de *LED bases Indoor Visible Light Communications: State of the Art*.
- [99] [En línea]. Available: <https://www.yumpu.com/it/document/view/18630125/cp-1223-jeita>.
- [100] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 6, Scope of VLC standard.
- [101] I. E. C. T. S.-c. 34C, de *Auxiliaries for lamps*, 2014.
- [102] K. Ruling, de *PLASA Standards, Control Protocol Working Group*, 2014.
- [103] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, pp. Capítulo 6, VLC Illumination Compability.
- [104] Z. Consortium, de *LED light sources interchangeable*, 2014.
- [105] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 6, VLC data transmission standard.
- [106] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 6, VLC Illumination Standard.
- [107] [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.
- [108] F. Paez, de *IEEE 802.15*.
- [109] [En línea]. Available: <http://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/bluetooth>.
- [110] [En línea]. Available: <http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/wpans/index.html>.
- [111] F. M. A. Papacetzzi, de *Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking*, 2003, p. Capítulo 5.
- [112] F. M. A. Papacetzzi, de *Wireless Personal Area Network (WPAN) & Home Networking*, Universidad de Américas de Pueblo, 2003, p. Capítulo 3.
- [113] T. M. E. S. & C. G. Dr. José A. Gutiérrez, de *IEEE Std 802.15.4, Enabling Pervasive Wireless Sensor Network*, 2005.
- [114] [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4f.html>.
- [115] [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4g.html>.
- [116] S. M. C. Z. Myung Lee, de *IEEE 802.15.5 WPAN Mesh A Tutorial*, 2005.
- [117] https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.6.

- [118] [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>.
- [119] I. S.-K. L. Richard D. Roberts, «IEEE 802.15.7: Visible Light Communications: Modulation Schemes and Dimming Support,» *IEEE Communications Magazine*, 2012.
- [120] E. A. a. T. H. M. Miki, de *Intelligent lighting system using visible-light communication technology*, Bangkok, Thailand, 2006.
- [121] [En línea]. Available: <http://www.meethue.com/en-US>.
- [122] P. Polishuk, de *Plastic optical fibers branch out*, 2006.
- [123] F. B. D. C. S. R. a. A. K. S. Lee, de *Real-time gigabit DMT transmission over plastic optical fibre*.
- [124] A. J. H. V. J. Y. a. B. H. N. Pavlidou, «Power line communications: State of the art and future trends».
- [125] M. K. a. F. Amirshahi, de *Hybrid MV-LV power lines and white light emitting diodes for triple-play broadband access communications*, Chicago, USA.
- [126] I. R. a. H. Asada, de *A dual-use visible light approach to integrated communication and localization of underwater robots with application to non-destructive nuclear reactor inspection*, Minnesota, USA, 2012.
- [127] [En línea]. Available: <http://www.penguinasi.com>.
- [128] H. G. S. T. A. T. a. N. V. Alexander Vavoulas, «Coverage Aspects of Indoor VLC Networks».
- [129] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 8, Indoor application scenarios.
- [130] B. C. L. C. S. T. Y. A. a. J.-M. B. A. Cailean, «Visible light communications: application to cooperation between vehicles and road infrastructures».
- [131] W. H. Organization, «WHO global status report on road safety 2013: supporting a decade of action: World Health Organization, 2013.».
- [132] D. F. J. K. G. L. V. M. J. B. K. Rumar, «Intelligent transportation systems and road safety,» Brussels, Belgium.
- [133] S.-H. Y. H.-S. K. Y.-H. S. a. S.-K. H. Deok-Rae Kim, de *Outdoor Visible Light Communication For Inter-Vehicle Communication Using Controller Area Network*, Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University, Seoul, South Korea.
- [134] X. Tang, de *Fundamental Analysis of a Car to Car Visible Light Communication System*, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China.
- [135] B. C. L. C. S. T. Y. A. a. J.-M. B. A. Cailean, «Visible light communications: application to cooperation between vehicles and road infrastructures».
- [136] M. Y. Trong-Hop Do, de *Potentialities and challenges of VLC based outdoor positioning*, School of Electrical Engineering, Soongsil University, South Korea.

- [137] S. K. M. H. B. H. S. o. C. a. C. Shahid Ayub, de *Visible Light ID System for Indoor localization*, Lancaster University, Lancaster, UK.
- [138] V. C. a. J. Y. “ S. Haruyama, de *Japan’s visible light communications consortium and its standardisation activities*, 2008.
- [139] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 4, Positioning algoritms.
- [140] S. Arnold, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 4, Triangulation.
- [141] S. H. S. P. a. C. S. P. S. Y. Jung, de *Optical wireless indoor positioning system using light emitting diode ceiling lights*.
- [142] Y. U. L. a. M. Kavehrad, de *wo hybrid positioning system design techniques with lighting LEDs and ad-hoc wireless network*.
- [143] Y. A. S. A. N. J. A. T. Q. Wang, «Position Accuracy of Time-of arrival Based Ranging Using Visible Light With Application in Indoor Localization Systems».
- [144] D. T. N. K. M. o. I. L. N. A. M. o. I. R. L. A. S. M. o. I. Nuno Lourenço, de *Visible Light Communication System for Outdoor Applications* , Universidade de Aveiro/Departamento de Eletrónica Telecomunicações e Informática, Aveiro, Portugal.
- [145] X. M. H. K. S. & M. Y. Liu, de *Research of practical indoor guidance platform using fluorescent light communication*, 2008.
- [146] S. Arnon, de *Visible Light Communication*, Cambridge University Press, 2015, pp. Capítulo 5, Light Positioning System.
- [147] J. R. C. Q. J. R. a. F. L.-H. R. Perez-Jimenez, de *Visible Light Communication Systems for Passenger In-Flight Data Networking*.
- [148] M. S. W. A. a. N. B. Dhouha Krichene, de *An Aeronautical Visible Light Communication System to Enable In-Flight Connectivity*.
- [149] J. R. C. Q. J. R. a. F. L.-H. R. Perez-Jimenez.
- [150] W. D. F. Y. H. Y. J. W. X. W. a. X. Z. Jian Song, de *Indoor Hospital Communication Systems: An Integrated Solution Based on Power Line and Visible Light Communication*.
- [151] T.-I. J. Y.-H. K. Y.-H. C. T. A. Willy Anugrah Cahyadi, de *Patient Monitoring Using Visible Light Uplink Data Transmission* .
- [152] D. O’Briens, de *Visible light communications: Challenges and possibilitie*.
- [153] S. H. a. M. N. T. Komine, de *Bi-directional visible-light communication using corner cube modulator*.
- [154] Z. X. a. B. Sadler, de *Ultraviolet communications: Potential and state-of-the-art*.

- [155] M. B. R. M. T. a. T. D. C. L. T. Borogovac, de *Lights-off visible light communications*.
- [156] T. K. a. M. Nakagawa, de *A study of shadowing on indoor visible light wireless communication utilizing plural white LED lightings*.
- [157] F. Z. V. K. M. I. a. R. P. M. I. Dilukshan Karunatilaka, «LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art,» p. Limitations.
- [158] Y. X. Y. L. T. G. a. E. S. S. Chhajed, de *Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes*.
- [159] F. Z. V. K. M. I. a. R. P. M. I. Dilukshan Karunatilaka, de *Characterisation and modelling of artificial light interference in optical wireless communication systems*, p. Challenges.
- [160] R. V. a. A. d. O. D. A. J. C. Moreira, de *Characterisation and modelling of artificial light interference in optical wireless communication systems*.
- [161] S. R. K. D. L. a. J. W. W. J. Grubor, de *Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting*.
- [162] T. B. a. T. L. M. Biagi, de *Adaptive receiver for indoor visible light communications*.
- [163] H. L. M. e. al, de *High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization*.
- [164] D. O. H. L. M. K. L. D. J. a. Y. O. L. Zheng, de *Improvement of data rate by using equalization in an indoor visible light communication system*.
- [165] J. H. L. S. H. a. M. N. T. Komine, de *Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment*.
- [166] J. L. a. T. R. Q. R. Aleksandar Jovicic, de *Visible Light Communication: Opportunities, Challenges and the Path to Market*.
- [167] I. A.-G. D. S.-R. M. A. Q.-S. Carlos Ley-Bosch, de *Analysis of the Effects of the Hidden Node Problem in IEEE 802.15.7 Uplink Performance*, z Institute for Technological Development and Innovation in Communications (IDeTIC), Department of Telematic Engineering, University of Las Palmas de Gran Canarias, Las Palmas de Gran Canarias, España.
- [168] I. A.-G. D. S.-R. a. C. R.-C. Carlos Ley-Bosch, de *Evaluation of the Effects of Hidden Node Problems in IEEE 802.15.7 Uplink Performance*.
- [169] D. K. A. R. P. FAHAD ZAFAR, de *DIMMING SCHEMES FOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION: THE STATE OF RESEARCH*.
- [170] I. P. A. H. (. M. I. Z. G. (. M. I. a. W. P. (. I. Sujan Rajbhandari (Member, de *Wavelet-Neural Network VLC Receiver in the Presence of Artificial Light Interference*.
- [171] J. R. T. J. B. A. J. A. R. B. C. Q. S. C. T. G. R. P. J. F. D. R. Víctor Guerra Yáñez, de *Illumination Interference Reduction System for VLC Communications*, Centro Tecnológico para la Innovación en Comunicaciones (CeTIC), Universidad de Las Palmas de Gran Canarias.

[172] [En línea]. Available: <http://purelifi.com/>.

[173] [En línea]. Available: <http://www.americalifi.com/wp/>.

[174] [En línea]. Available: <http://lightbeecorp.com/>.

[175] [En línea]. Available: <https://www.disneyresearch.com/project/visible-light-communication/>.