



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
MADRID



Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

Diseño de protocolos de la capa PHY y capa MAC para comunicación Lifi

Victor Manuel Maroto Ortega

Director: José Antonio López Orozco

Curso 2016-2017



Entidades participantes y/o colaborativas

Diseño de protocolos de la capa PHY y capa MAC para comunicación Lifi



Victor Manuel Maroto Ortega

Director: José Antonio López Orozco

Curso 2016-2017

Master en Ingeniería de Sistemas y Control

Diseño de protocolos de la capa PHY y capa
MAC para comunicación Lifi

Proyecto tipo B

Victor Manuel Maroto Ortega

Director: José Antonio López Orozco

Curso 2016-2017

Autorización

No autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado:

Victor Manuel Maroto Ortega

Firma del alumno

Resumen

A lo largo de este trabajo de fin de máster se ha realizado un estudio de un sistema de comunicaciones inalámbrico que esta en pleno auge, lifi. Además del estudio, se han diseñado las capas del modelos TCP/IP que hacen posible este proceso. Estas capas se denomina MAC y PHY y son las capas más bajas del modelo. El objetivo de este trabajo es realizar una plataforma que integre esta dos capas y se posible realizar comunicación lifi a través de un hardware adicional como son las luminarias o la etapa de potencia que las alimenta. La plataforma que integra esta dos capas se denomina *System of Chip* (SoC), formada por una FPGA la cual integrara la capa PHY del sistema y un ARM en el que se encontrara el código de la capa MAC.

Este trabajo de fin de master esta en marcado dentro del proyecto denominado “lifi Last mile” en el que participa la Universidad complutense y la empresa de telecomunicaciones Optiva Media con financiación nacional del centro para el desarrollo tecnológico industrial.

Abstract

Along this project it has been done a study about a wireless system of communications wich is in full swing, LIFI, also it has been disigned two fundametal layers from TCP/IP model that make it possible the process. This layers are MAC and PHY and in the model TCP/IP are in the lower positions. The objetive of this project is build a platform that unite this two layers in one device and be able to possible make LIFI communication through a aditional hardware how can be a luminary devices or power stage necessary for the luminarys. This platform, that has the MAC and the PHY layer's, it's denominated System of Chip (SoC) and it has two fundametal elemnts, a FPGA wichone can modelate a hardware design how is PHY layer, and ARM where is the MAC code.

This project is within into the project “LIFI last mile”,the members of this project are the University Complutenese of Madrid (UCM) and Optiva Media, enterprise of telecomunicatios, the financiong come from spanish government from Center for Industrial Technological Development(CDTI).

Índice de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivo y contenido del trabajo fin de máster.....	1
1.2	Motivación de una nueva tecnología.....	1
1.3	Introducción histórica: Comunicaciones ópticas.....	3
1.4	Comunicaciones ópticas inalámbricas.....	4
1.5	Comunicaciones por luz visible: VLC.....	5
1.5.1	Iluminación LED.....	5
1.5.2	Clasificación VLC.....	7
1.5.3	Ventajas y desventajas de VLC.....	9
1.5.4	Consortios y estándares.....	11
1.5.5	Canal de comunicación por luz visible.....	14
1.5.6	Elección de la intensidad luminosa en un sistema VLC.....	15
1.5.7	Elección del color para un sistema VLC.....	15
1.5.8	Iluminación ambiente y ruido en un canal VLC.....	16
2	Lifi (Light Fidelity).....	18
2.1	Origen.....	18
2.2	Lifi Vs VLC.....	19
2.3	Sistema lifi.....	20
2.3.1	Enlace de subida (uplink).....	21
2.4	Consortios y estándares.....	22
2.4.1	LiFi Consortium.....	22
2.4.2	Estándar IEEE 802.15.7.....	23
2.4.3	Topologías de la red.....	23
2.4.3.1	Topología punto a punto.....	24
2.4.3.2	Topología estrella.....	24
2.4.3.3	Topología broadcast.....	24
2.4.4	Arquitectura de comunicación.....	25
2.4.5	Capa física PHY.....	26
2.4.5.1	Estructura de la trama PHY.....	30
2.4.5.2	Interoperabilidad y coexistencia entre los tipos de PHY.....	30
2.4.6	Capa de control de acceso MAC.....	31
2.5	Técnicas de modulación para lifi.....	33
2.5.1	Modulación con portadora única (SCM).....	33
2.5.2	Modulación con multiportadora.....	34
2.5.3	Modulación específica de LiFi.....	36
2.6	Requisitos generales de PHY.....	37
2.6.1	Plan de bandas de longitud de onda.....	37
2.6.2	Asignación óptica.....	39
2.6.3	Máxima tolerancia del error para múltiples fuentes ópticas.....	39
2.6.4	Periodos mínimos de LIFS, SIFS y RIFS.....	40
2.6.5	Tiempo de respuesta Emisor-Receptor, Receptor-Emisor.....	41
2.6.6	Tolerancia de la frecuencia de datos de transmisión.....	42
2.6.7	Indicador de la calidad de la longitud de onda (WQI).....	42
2.6.7.1	Soporte WQI para OOK y VPPM.....	42
2.6.7.2	Soporte a WQI CSK.....	42
2.6.8	Valoración del canal limpio (CCA, Clear Channel Assessment).....	42
2.7	Acceso multiusuario en lifi.....	42
2.8	Arquitectura Utilizada.....	43

2.8.1	Definición System on Chip (SoC).....	43
2.8.2	Diseño del sistema.....	44
2.8.3	ARM.....	44
2.8.4	FPGA.....	44
3	Diseño de los códigos de comunicaciones.....	47
3.1	Aplicaciones delifi.....	49
3.1.1	Redes de comunicaciones en interior.....	49
3.1.2	Salud.....	50
3.1.3	Transporte público.....	51
3.1.4	Vías de circulación y vehículos.....	52
3.1.5	Entornos sensibles a la radiofrecuencia.....	55
3.1.6	Gestión de desastres.....	55
3.1.7	Seguridad.....	56
3.1.8	Posicionamiento interior.....	57
3.1.9	Lifi solar.....	58
4	Implementación de los protocolos MAC y PHY.....	62
4.1	Introducción.....	62
4.2	Arquitectura.....	62
4.3	Topología de la red.....	64
4.3.1	Modelo de transferencia de datos.....	65
4.4	Capa MAC.....	66
4.4.1	Modos de transmisión de datos.....	66
4.4.2	Formato de trama MAC.....	67
4.4.4	Cuerpo de la trama MAC (MSDU).....	70
4.4.5	Pie de la trama MAC (MFR).....	71
4.4.6	Ejemplo de la trama MAC.....	72
4.4.7	Implementación en ARM.....	73
4.4.7.1	Optimización realizada y resultados obtenidos.....	74
4.5	Capa PHY.....	76
4.5.1	Modos de operación.....	77
4.5.2	Requisitos generales.....	79
4.5.2.1	Plan de bandas de longitud de onda.....	79
4.5.2.2	Periodos mínimos de espaciado entre tramas.....	79
4.5.2.3	Gestión de oscurecimiento y mitigación de parpadeo.....	80
4.5.2.5	Gestión de oscurecimiento en periodos de reposo.....	81
4.5.2.6	Formato de trama PHY (PPDU).....	81
4.5.2.7	Preambulo (SHR).....	82
4.5.2.8	Cabecera PHY (PHR).....	83
4.5.2.9	Secuencia de comprobación de cabecera (HCS).....	84
4.6	Campos adicionales.....	85
4.6.1.1	Cuerpo de trama (PSDU).....	86
4.7	Trama final.....	86
4.8	Diagrama de bloques capa PHY.....	90
4.8.1	Memoria.....	90
4.8.2	Zynq7 Processing system y AXI interconnect.....	91
4.8.3	Clock Wizard.....	91
4.8.4	Resultados.....	91
5	Conclusiones y trabajo futuro.....	92
6	Referencias.....	93

Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de la comunicación por RF, IR y VLC.....	15
Tabla 2: Comparación entre la comunicación óptica y por radiofrecuencia.....	16
Tabla 3: Principales miembros del consorcio VLCC. Fuente: VLCC (Feb de 2012).....	17
Tabla 4: Tabla con ejemplos de iluminancia.....	20
Tabla 5: Clasificación de dispositivos.....	29
Tabla 6: Modos de operación para lifi PHY-I.....	32
Tabla 7: Modos de operación para lifi PHY-II.....	33
Tabla 8: Modos de operación para lifi PHY-III.....	33
Tabla 9: Trama PHY para lifi (estructura PPDU).....	37
Tabla 10: Trama MAC para LiFi (estructura MSDU).....	38
Tabla 11: Bandas de longitud espectral y su anchura.....	54
Tabla 12: Periodos mínimos LIFS, SIFS, RIFS.....	57
Tabla 13: Constantes PHY.....	57
Tabla 14: Descripción del campo Tipo de trama.....	72
Tabla 15: Descripción del campo Modos de direccionamiento.....	73
Tabla 16: Ejemplo de trama MAC de datos para el sistema propuesto en "Lifi last mile".....	77
Tabla 17: Modos de operación para PHY I.....	78
Tabla 18: Modos de operación para PHY II.....	79
Tabla 19: Modos de operación para PHY III.....	79
Tabla 20: Plan de bandas de longitud de ondas y codificación.....	80
Tabla 21: Periodos LIFS, SIFS y RIFS mínimos.....	81
Tabla 22: Mitigación de parpadeo según el modo de modulación.....	81
Tabla 23: Periodos de visibilidad para la codificación 8b10b.....	82
Tabla 24: Asignación de TDPs por topologías.....	84
Tabla 25: Descripción de campos de la cabecera (PHR) de la trama PHY.....	84
Tabla 26: Descripción del campo MCS ID para el modo PHY II (Tabla completa en [35]).....	85
Tabla 27: Campos adicionales para modulación OOK con gestión de oscurecimiento.....	86
Tabla 28: Ejemplo de trama final de datos (MAC+PHY) para el sistema propuesto en "Lifi last mile".....	89

Índice de ilustraciones

Figura 1: Espectro de radiofrecuencia.....	1
Figura 2: Espectro electromagnético.....	2
Figura 3: Evolución histórica de las comunicaciones ópticas inalámbricas1.....	4
Figura 4: Evolución temporal de eficiencia luminosa de la tecnología LED.....	5
Figura 5: Evolución temporal de la tecnología LED en relación con el brillo y el coste de producción.....	5
Figura 6: Aplicación de la tecnología LED en función de los ingresos.....	6
Figura 7: Espectro RGB.....	7
Figura 8: Espectro de emisión de un LED blanco basado en fósforo fabricado por Nichia Corporation (Japón).....	7
Figura 9: Tecnologías LED usadas en VLC1.....	8
Figura 10: Comparación de la cobertura de VLC respecto a otras tecnologías inalámbricas1.....	10
Figura 11: Estándares JEITA CP-1221 y JEITA CP-12221.....	11
Figura 12: Asignación de la frecuencia subportadora.....	11
Figura 13: Forma de la onda en un sistema JEITA VL ID.....	12
Figura 14: Sensibilidad del ojo humano a las diferentes longitudes de onda del visibleImagen.....	14
Figura 15: Curva de respuesta del sensor PDA36A. Fuente: Thorlabs.....	15
Figura 16: Intensidad relativa en función de la longitud de onda para diferentes fuentes de iluminación [43].....	16
Figura 17: Cronología de PureLiFi1.....	17
Figura 18: Principales elementos de lifi y sus aplicaciones.....	18
Figura 19: Esquema básico de un sistema lifi.....	19
Figura 20: (a) Flujo de datos y (b) diagrama de bloques del sistema.....	20
Figura 21: Esquema de sistema LiFi utilizando el dispositivo plug and play Li-1st.....	21
Figura 22: Topologías MAC para LiFi.....	23
Figura 23: Capas de la pila de protocolo lifi.....	24
Figura 24: Modelo de referencia utilizado en el estándar para un dispositivo VPAN.....	25
Figura 25: Diagrama de bloques para el modelo PHY-I.....	28
Figura 26: Diagrama de bloques para el modelo PHY-II.....	28
Figura 27: Diagrama de bloques para el modelo PHY-III.....	28
Figura 28: Sistema de transmisión SISO.....	28
Figura 29: Sistema de transmisión MIMO.....	29
Figura 30: Modulación en el dominio espectral.....	29
Figura 31: Separación de los tipos de PHY.....	30
Figura 32: Diferentes modos de MAC para LiFi.....	31
Figura 33: Técnica de modulación OKK utilizando códigos Manchester.....	44
Figura 34: Técnica de modulación VPPM.....	45
Figura 35: Modulación CSK.....	47
Figura 36: Regla de diseño para 4-CSK descrita en el estándar IEEE 802.15.7.....	47
Figura 37: Espectro visible.....	48
Figura 38: Canal de agregación.....	49
Figura 39: Canal de guardia.....	49
Figura 40: Máxima propagación permitida a la salida de las fuentes.....	50
Figura 41: Uso de LIFS, SIFS y RIFS.....	51
Figura 42: Ejemplo de sistema lifi para interiores.....	32
Figura 43: Sistema propuesto en [110] usando VLC.....	33
Figura 44: Ejemplo de implementación de lifi en una cabina de pasajeros.....	34
Figura 45: Esquema propuesto en [112] para el uso de LiFi en cabinas de pasajeros.....	34

Figura 46: Red lifi propuesta en [116].....	35
Figura 47: Uso de lifi en comunicaciones coche a coche.....	36
Figura 48: Comunicación C2C-VLC.....	36
Figura 49: Sistema de comunicación C2C-VLC básico teniendo en cuenta la luz solar [127].....	37
Figura 50: Central nuclear de Garoña y complejo de Repsol en Tarragona.....	37
Figura 51: Terremoto de Nepal. Fuente: El Confidencial.....	38
Figura 52: Lifi no traspasa muros lo que hace la transferencia de datos más segura.....	39
Figura 53: Ejemplo de sistema de posicionamiento lifi [140].....	40
Figura 54: LiFi Beacon para almacenes.....	41
Figura 55: Sistema lifi solar [147].....	41
Figura 56: Prototipo de lifi solar presentado por Haas en el TED 2015.....	42
Figura 57: Sistema solar lifi en teléfonos móviles: carga de batería y transmisión de datos simultánea.....	42
Figura 58: : Los coches con paneles solares podrían soportar lifi.....	43
Figura 59: Lifi solar aprovechando los paneles solares de edificios.....	43
Figura 60: Lifi solar en la señalización vial.....	43
Figura 61.....	55
Figura 62: Proceso de “Handshake” en protocolos orientados a conexión2.....	57
Figura 63: Pila OSI vs Pila TCP/IP-UDP/IP.....	58
Figura 64: Capas de la pila de protocolo 802.15.7.....	61
Figura 65: Modelo de referencia utilizado en el estándar para un dispositivo VPAN.....	61
Figura 66: Topologías MAC para LiFi.....	62
Figura 67: Diferentes modos de MAC para LiFi.....	65
Figura 68: Formato general de trama para la capa MAC3.....	65
Figura 69: Formato de la cabecera de las tramas MAC (MHR)6.....	66
Figura 70: Formato del cuerpo (payload) de la trama MAC de datos9.....	68
Figura 71: Formato de la trama MAC de acuse de recibo10.....	69
Figura 72: Implementación típica del cálculo de la Secuencia de Comprobación de Tama (FCS-CRC)14.....	69
Figura 73: Ejemplo de modulación OOK con gestión de oscurecimiento.....	76
Figura 74: Formato de trama de la capa PHY.....	77
Figura 75: Formato del preámbulo (SHR) de la trama MAC.....	77
Figura 76: Formatos del campo TDP.....	77
Figura 77: Estructura campos opcionales para modulación OOK con gestión de oscurecimiento...80	80
Figura 78: Estructura del cuerpo (payload) de la trama de la capa PHY (PSDU).....	81
Figura 79: Resumen de la estructura de la trama final IEEE 802.15.7.....	81

1 Introducción

1.1 Objetivo y contenido del trabajo fin de máster

El objetivo de este TFM es diseñar las capas del modelo TCP/IP que proporcionen un interfaz de estandarización para los medios de transmisión. Gracias a este objetivo se podrá llegar al objetivo del proyecto principal en el que se enmarca este TFM, “Lifi Last Mile”, el cual trata de hacer llegar al transporte un sistema inalámbrico de comunicaciones de alta velocidad. Las capas del modelo TCP/IP que proporcionan un interfaz de estandarización para los medios de transmisión son la capa MAC y la capa PHY y el medio de transmisión empleado es la luz visible por lo que el estándar existente más cercano a esta tecnología, denominadalifi, es el estándar IEEE 802.15.7(VLC). Basándose en el estándar VLC se podrá llegar a una diseño de estas capas para lifi. Este diseño e implementación traerá consigo una serie de modificaciones y mejoras que permitan a la tecnología que se utilizará poder realizar este tipo de comunicación. Las capas diseñadas se implementaran en un sistema empotrado denominado System of chip (SoC), el cual consta de dos partes fundamentales. La primera es una FPGA en la cual se encurta implementada la capa PHY a través de un lenguaje de descripción hardware. La segunda parte fundamental es el procesador ARM que incorpora en el que se encuentra el código correspondiente a la capa MAC.

Al estar ante un trabajo directamente relacionado con una tecnología en auge se ha tenido que realizar un estudio histórico del sistema de comunicaciones a través de luz visible, mostrado en esta sección.

En la sección 2 se encuentra una breve descripción del origen de esta tecnológica, una comparativa entre el lifi y vlc. En esta sección también se pueden encontrar los consorcios que existen íntimamente relacionados con el lifi además de las aplicaciones que tiene y como debe ser la estructura dependiendo de la aplicación

También se ha realizado un profundo estudio del estándar IEEE 802.15.7, sección 4, el cual presta una idea de como sera el protocolo final implementado en el sistema diseñado. En base a este estándar y diferentes artículos estudiados para el proyecto se ha realizado un diseño previo y en base a este diseño una implementación en el SoC como se puede ver en la sección 4

En el último apartado se presenta las conclusiones, resultados obtenidos hasta la fecha, los cuales han sido satisfactorios tanto para la empresa Optiva Media como para el CDTI con los cuales ya se ha pasado la primera inspección. Además también se presenta el trabajo futuro en el cual se esta comenzando a trabajar para intentar implementarse antes de la fecha limite.

1.2 Motivación de una nueva tecnología

En la actualidad, uno de los principales problemas a los que se enfrenta el sector de las telecomunicaciones, en lo que respecta a las tecnologías de transmisión inalámbricas de información, es la saturación del espectro electromagnético de radiofrecuencias (RF) [1]. El espectro electromagnético de radiofrecuencia abarca el rango de frecuencias de 3 KHz – 300 GHz, Figura 1, donde se recogen los distintos rangos de actuación tecnológica junto con las aplicaciones más significativas y lo enmarca dentro del espectro electromagnético general.

Una de las posibles soluciones para superar este inconveniente es operar en rangos diferentes del

espectro electromagnético, que como sabemos es bastante más amplio tal y como muestra la Figura 2. Sin embargo, para aplicar esta solución hay que tener en cuenta las limitaciones de carácter tecnológico, las implicaciones medioambientales y la incidencia en salud. En este sentido es de sobra conocido que los rangos por encima del visible tienen efectos nocivos debido a su condición ionizante [2]. Por ejemplo, los rayos gamma (γ) a pesar de usarse en diagnóstico y tratamientos terapéuticos, en general son muy perjudiciales para la salud ya que provocan cambios en las cadenas de ADN generando cáncer [3]. De la misma forma, los rayos X, muy utilizados en diagnóstico de fracturas óseas, son igualmente perjudiciales suministrados en grandes dosis o de una forma continuada [4]. Finalmente, el ultra violeta el cual se usa, por ejemplo, en los procesos fotolitográficos también es dañino para nuestra salud [5].

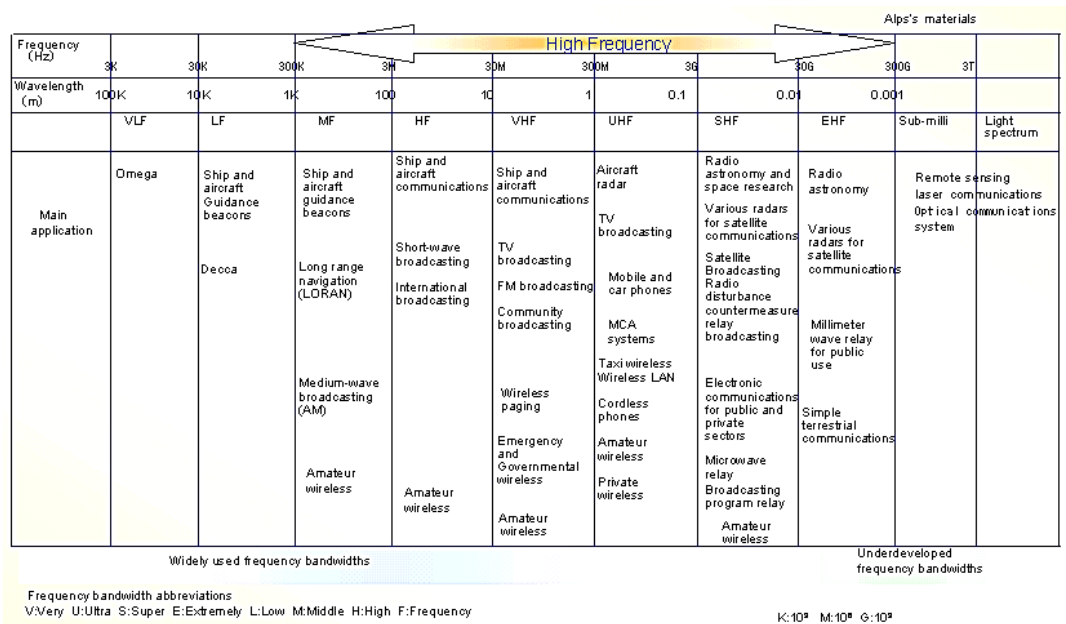


Figura 1: Espectro de radiofrecuencia.

1 Fuente: http://www.alps.com/e/about_alps/tec/tec_communication.html

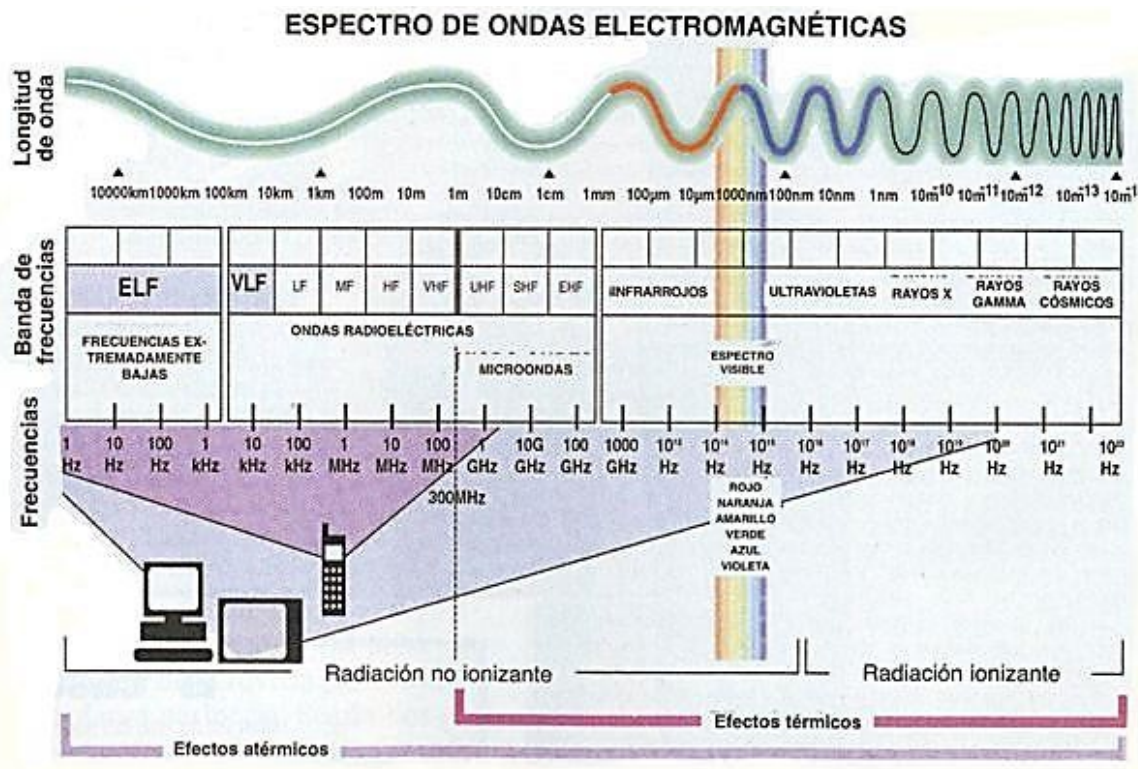


Figura 2: Espectro electromagnético.

Por otra parte, el espectro de radiofrecuencias, microondas e infrarrojo está limitado al uso en bajas potencias ya que también producen efectos perjudiciales para la salud, bien a nivel superficial, bien en el interior del cuerpo humano debido a la capacidad de penetración de radiofrecuencias y microondas [6]. Además, las comunicaciones que utilizan las radiofrecuencias suelen tener costes elevados y ser menos seguras, comparadas con la tecnologíalifi propuesta tal y como veremos a lo largo de las siguientes secciones [7].

Con todas estas restricciones e inconvenientes parece lógico recurrir al rango del visible ya que en estos momentos no se utiliza para comunicaciones, no conlleva riesgos para la salud y, además, es compatible con las tecnologías actuales, incluida la de iluminación artificial.

1.3 Introducción histórica: Comunicaciones ópticas

Es difícil precisar en qué época se utilizó por primera vez un elemento óptico para transmitir una información. Probablemente este hecho se produjo con la utilización del fuego por el hombre. Por ejemplo, las civilizaciones antiguas tales como la griega o la china, así como las tribus americanas, utilizaban las señales de humo como señal visual para comunicar la presencia de algún peligro o cualquier evento significativo. Con el mismo fin, también se usaban almenas donde se encendía el fuego en su interior. Éstas estaban situadas en un lugar elevado lo que hacía que su luz se viera a kilómetros de distancia [8]. Otras formas usuales de comunicaciones ópticas eran las señales con banderas, las bengalas, las hogueras y demás elementos utilizados antes del uso de la electricidad.

Ya a finales del siglo XVIII Claude Chappe (1763 – 1805) propuso lo que denominó taquígrafo óptico cuyo funcionamiento se basa en mandar señales visuales entre elementos colocados a cierta distancia sin elementos intermedios que su recepción [9]. Poco después el científico alemán Carl Friedrich Gauss de la Universidad de Göttingen desarrolló en 1821 un heliotropo predecesor de lo que hoy conocemos como heliógrafo. Éste utiliza un espejo para reflejar la luz solar en la dirección

de un receptor que observa los destellos. La comunicación se establece mediante un determinado código conocidos por ambos, como por ejemplo el código Morse [10].

En 1880 Alexander Graham Bell junto con su ayudante Charles Sumner Tainter inventaron el fonógrafo, dispositivo capaz de transmitir sonido por medio de la emisión de luz. La base de su funcionamiento consistía en modular la luz mediante un espejo vibratorio y recibir la información a través de un espejo parabólico [11]. La distancia de comunicación rondaba los 213 m.

1.4 Comunicaciones ópticas inalámbricas

Dentro de las comunicaciones ópticas, un caso particular es aquél en el que el intercambio de información se realiza sin cableado entre los dispositivos emisores y receptores utilizando como fuente luminosa el visible, el infrarrojo (IR) o el ultravioleta (UV). A este tipo de comunicaciones las denominamos comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC, *Optical Wireless Communications*) [12]. Un caso particular de estas comunicaciones son las comunicaciones de espacio libre (FSO, *Free-Space Optical*) donde la comunicación se realiza en la atmósfera a grandes distancias. La idea general de las OWC es la existencia de un dispositivo emisor que convierte las señales eléctricas en señales luminosas para ser enviadas hacia el dispositivo receptor. A su vez, éste realiza la conversión inversa obteniendo la información transmitida. Como fuente luminosa se puede utilizar por ejemplo diodos emisores de luz más conocidos como LEDs (*Light-Emitting Diode*) o diodos láser y como receptor un conjunto de fotodiodos o cámaras matriciales de distintas tecnologías.

Existen diferentes tipos de comunicaciones ópticas que pueden emplearse en una amplia variedad de aplicaciones:

- Distancias cortas (del orden de milímetros) como por ejemplo para realizar interconexiones ópticas dentro de circuitos integrados.
- Distancias medias (del orden de metros) como por ejemplo para comunicación entre dispositivos.
- Distancias largas (del orden de kilómetros) como por ejemplo para comunicar edificios o satélites.

Dentro de las OWC a cortas distancias una de las fuentes luminosas más utilizadas es el IR. En 1979 F. R. Gfeller logró la transmisión de datos de forma inalámbrica utilizando como fuente luminosa radiación infrarroja de longitud de onda 950 nm obteniendo una tasa de transferencia de 1Mb/s [13]. Posteriormente empezaron a aflorar los trabajos con sistemas difusos que lograron mantener tasas de transmisión relativamente altas. En 1997 J. M. Khan y J. R. Barry realizaron un repaso de las técnicas presentadas hasta el momento para áreas locales haciendo especial hincapié en la descripción de un sistema experimental con una tasa de transferencia estable de 50 Mb/s [14]. Para ellos existen seis configuraciones posibles para comunicaciones en interior de acuerdo con la existencia de línea de visión entre emisor y receptor, así como del grado de direccionalidad. Poco después, J. B. Carruther y J. B. Khan lograron en el año 2000 tasas de transferencia estables de 70 Mb/s mediante el uso de sistemas difusos [15]. Por lo general en todos estos trabajos se utilizaron fuentes luminosas con longitudes de onda comprendidas entre los 780 nm y los 950 nm ya que el pico de sensibilidad se encuentra en este rango con la ventaja añadida de ser las fuentes de menor coste. En cuanto a las FSO, el rango utilizado de longitudes de onda es el comprendido entre los 785-1550 nm [16]. Entre las principales ventajas que ofrece esta tecnología se encuentra la posibilidad de poder instalarse en cualquier parte del mundo sin licencia y con rapidez, posibilita un gran ancho de banda y grandes tasas de transmisión de datos.

1.5 Comunicaciones por luz visible: VLC

En la actualidad, investigación e industria han comenzado a apostar por utilizar el rango espectral comprendido entre los 375 nm y los 780 nm (400-800 THz). Este rango se corresponde con la zona visible del espectro electromagnético dando lugar a las comunicaciones por luz visible o VLC del inglés *Visible Light Communication* tal y como vemos en la Figura 1 y explicamos en la Sección 1.2.

1.5.1 Iluminación LED

VLC utiliza como principal fuente de iluminación los dispositivos de iluminación LEDs [17]. Esta tecnología ha sufrido un enorme desarrollo debido a sus ventajas frente a la iluminación tradicional [18]. Como se observa en la Figura 3, desde 1998 se ha producido un gran crecimiento en la eficiencia luminosa pasando de menos de 20 lm/W en 1998 hasta 186 lm/W en 2009 con una previsión a 2020 de 200 lm/W. De igual forma se puede comparar como se ha reducido en coste de producción con los años, Figura 4, donde se observa que a día de hoy el coste se ha equiparado al resto de tecnologías actuales de luminarias.

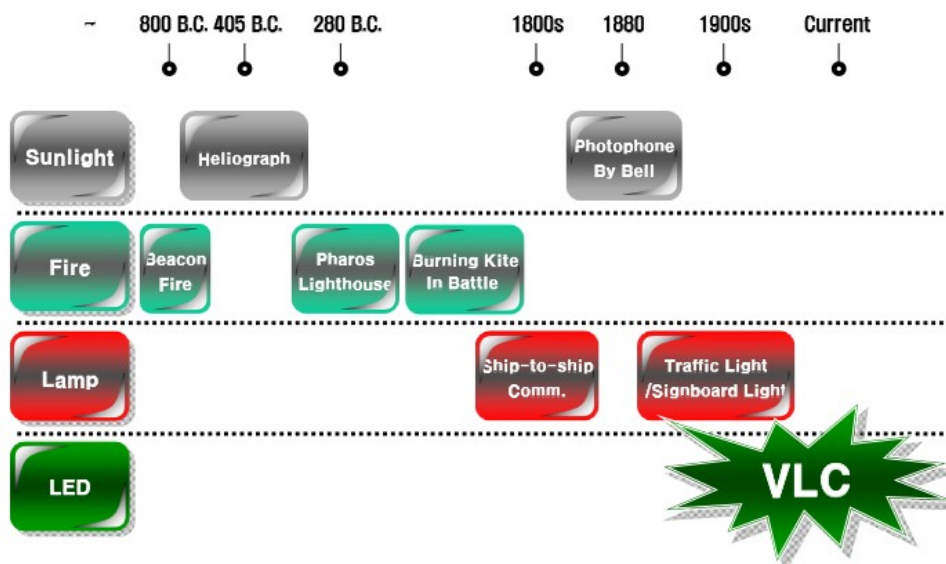


Figura 3: Evolución histórica de las comunicaciones ópticas inalámbricas.

2

2 Fuente: IEEE VLC Tutorial <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html> .

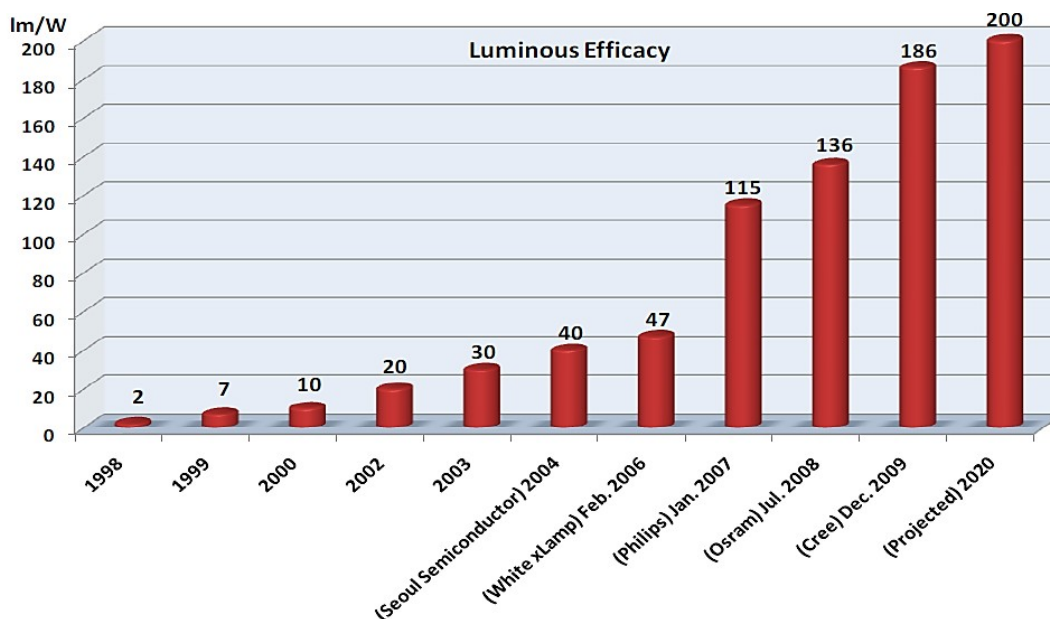


Figura 4: Evolución temporal de eficiencia luminosa de la tecnología LED.

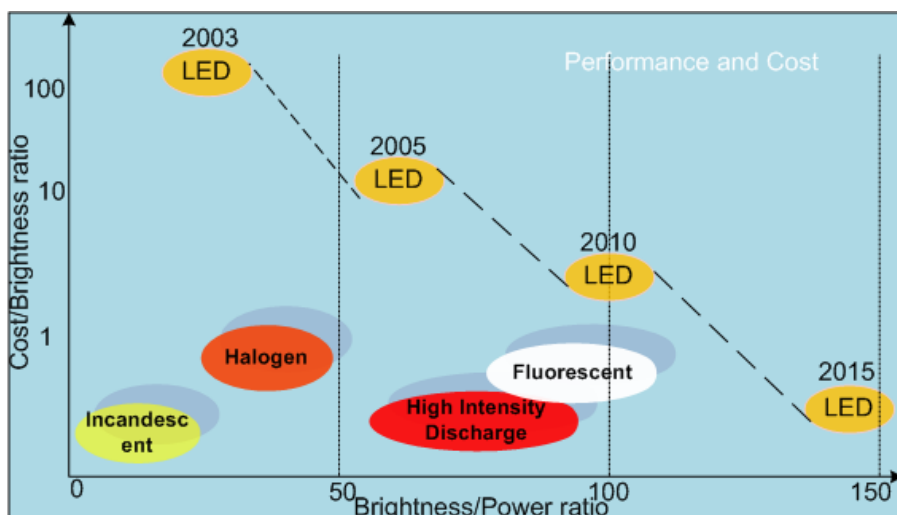


Figura 5: Evolución temporal de la tecnología LED en relación con el brillo y el coste de producción.

Dado que es posible su utilización tanto en interior como en exterior, existe una gran variedad de aplicaciones para esta tecnología como se observa en la Figura 5. Desde su uso estándar como iluminación interior/exterior en oficinas, hoteles, vías públicas etc. hasta su aplicación en faros de automóviles, medicina, señales de tráfico e industria en general.

A principios de este siglo XXI se comprobó que la iluminación proveniente de estos dispositivos se puede modular a altas frecuencias imperceptibles para el ojo humano. Esta cualidad permite enviar información posibilitando su uso en una doble función: cualquier aplicación de las que acabamos de mencionar y el establecimiento de comunicaciones inalámbricas de tal forma que se reducen los costes y las emisiones contaminantes. Por ejemplo, en 1999 G. Pang presentó en Hong Kong un sistema capaz de transmitir audio mediante LEDs, [19] y en 2004 T. Komine en Japón propuso un sistema de comunicación para interiores que además proporcionaba iluminación al recinto de interés [20].

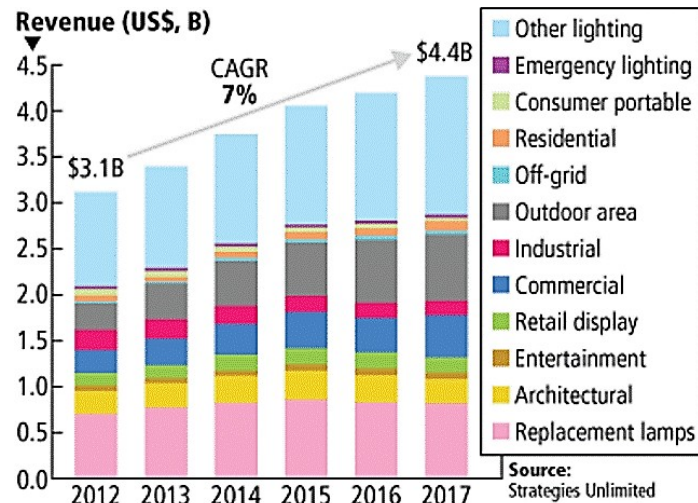


Figura 6: Aplicación de la tecnología LED en función de los ingresos.

1.5.2 Clasificación VLC

Las comunicaciones VLC utilizan la luz blanca como base de la comunicación por dos causas: (i) los pulsos temporales de la luz son más cortos y (ii) la iluminación recurre preferentemente al uso de este tipo de luz por la reproducibilidad cromática y adecuación a la luz solar. Para generar luz blanca con tecnología LED se puede utilizar:

- Mezcla tricromática. Consistente en el uso de luz roja, verde y azul, lo que se conoce como sistema RGB del inglés *Red*, *Green* y *Blue*. Las tres longitudes de onda, Figura 7, se combinan en el emisor luminoso como un único encapsulado [21], dando lugar a LEDs tricromáticos. La principal desventaja de esta tecnología es su elevado precio y su estabilidad temporal dado que la vida media y la exitancia (flujo radiante por unidad de área que sale de una superficie, $W \cdot m^{-2}$) de los tres tipos de LEDs son distintas. A cambio, aumenta el ancho de banda y no se produce desplazamiento de color debido a la modulación.

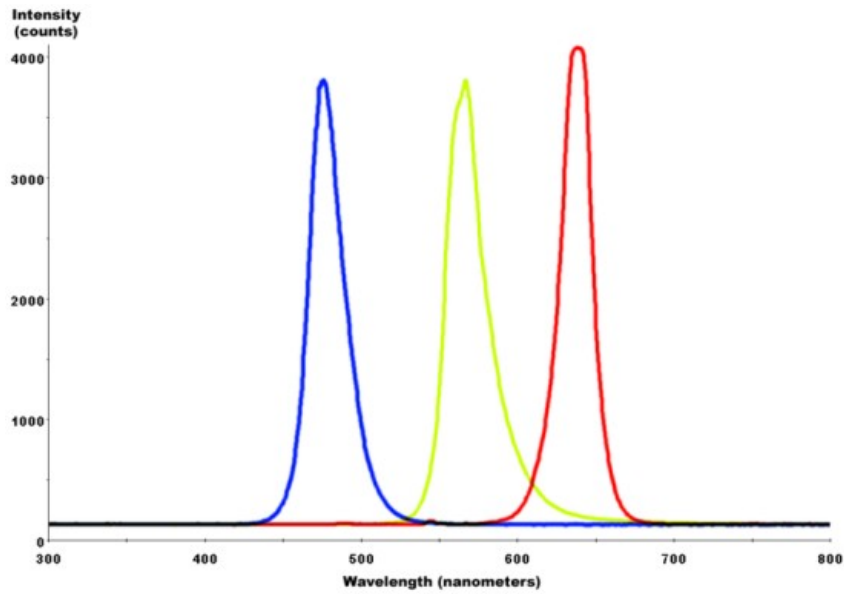


Figura 7: Espectro RGB.

- LEDs blancos. La longitud de onda utilizada es el azul y se les acopla un fósforo. De esta forma se logra la emisión de luz blanca al absorber el fósforo parte de la luz azul [21] tal y como muestra el espectro de emisión en la Figura 8. Los principales problemas al usar este tipo de LEDs son su limitado ancho de banda y la posible dispersión cromática. Sin embargo, esta opción menos costosa y más estable que la anterior, es la predominante en el mercado.

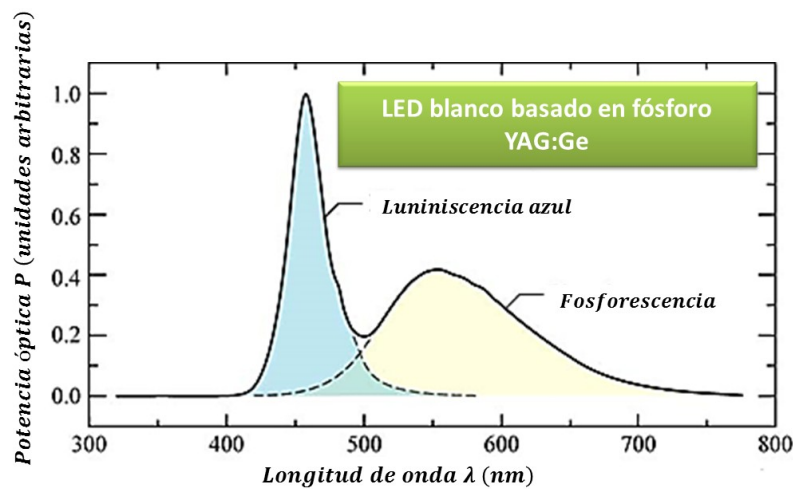


Figura 8: Espectro de emisión de un LED blanco basado en fósforo fabricado por Nichia Corporation (Japón).

En la Figura 9 se muestran los esquemas de ambas tecnologías.

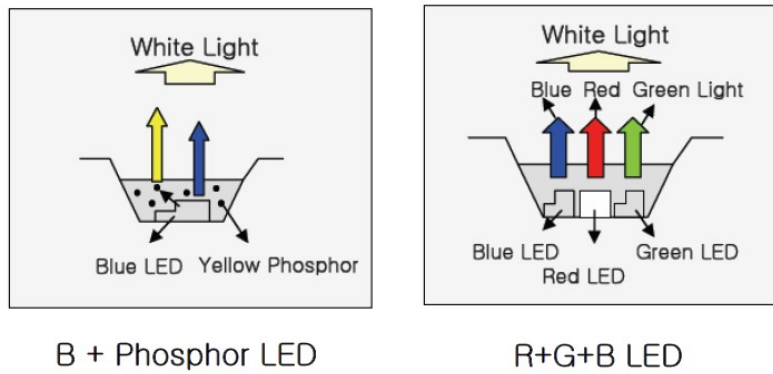


Figura 9: Tecnologías LED usadas en VLC1.

Uno de los primeros en utilizar LEDs tricromáticos para establecer una comunicación fue el científico japonés Y. Tanaka [22]. En su trabajo propone un sistema de iluminación interior que además produce la transmisión de datos mediante luz visible generada con este tipo fuente de iluminación. Los resultados obtenidos mediante simulación numérica indican tasas de transferencia de hasta 400 Mb/s. Posteriormente J. Grubor en 2008 logró experimentalmente una tasa de transferencia de hasta los 300 Mb/s mediante la modulación de la amplitud del pulso y la modulación discreta multitono (DMT, discrete multitone modulation) [23]. Por otra parte, H. L. Minh utilizó un sistema NRZ (nonreturn-to-Zero) para lograr tasas de 100 Mb/s [24]. En la misma línea J. Vučić obtuvo una tasa de 513 Mb/s proponiendo que en condiciones experimentales se podría lograr 1 Gb/s [25]. Prácticamente el mismo equipo logró llegar a 803 Mb/s con una sola luminaria RGB [26]. Un año más tarde, G. Cossu primero logró una tasa de 1.5 Gb/s en un solo canal [27] para, posteriormente, obtener una tasa de transferencia de 3.4 Gb/s mediante la modulación multitono [28]. En cuanto al uso de LED azules con fósforo, A. M. Khalid, de nuevo usando la modulación optimizada multitono, logró en 2012 una tasa de transferencia de 1 Gb/s. La misma tasa de transferencia obtuvo A. H. Azhar usando una configuración 4 x 4 de múltiples entradas y salidas (MIMO, Multiple-Input-Multiple-Output) [29]. Notablemente superior fue la tasa de transferencia conseguida por D. Tsonev que logró llegar con la configuración propuesta y mediante la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) a 3 Gb/s [30].

1.5.3 Ventajas y desventajas de VLC

A fin de poder destacar las ventajas y desventajas de VLC, en la Tabla 1 se han comparado las principales características de ésta con respecto a las comunicaciones inalámbricas realizadas por medio de radiofrecuencia e infrarrojo. Como se observa, los principales puntos a favor de VLC son el ancho de banda, el cual es mayor que en las otras dos tecnologías y la no existencia de regulación, lo que ahorra costes en su implementación. Además, la no necesidad de infraestructuras novedosas rebaja aún más los costes.

Parámetro	RF	IR	VLC
Ancho de banda	En torno a 300 GHz	~100 THz	300 THz
Velocidad	~100 Mbps	~10 Mbps	Depende de la distancia y de la velocidad de modulación del pulso (50 Mbps – 2 Gbps)
Regulación del espectro	Con licencia	Regulado y con licencia	Sin regular
Efectos dañinos	La OMS no ha encontrado ninguno	Efectos dañinos para el ojo	Ninguno
Uso	Cualquier lugar o dispositivo	Ordenadores, teléfonos, mandos a distancia, etc	Tecnología emergente
Idoneidad	Gran número de aplicaciones.	Rangos de distancia cortos	Rangos de distancia cortos y medios. Tanto en interior como en exterior
Implementación y costes	Compleja, costosa	Fácil, económica	Económica. Usa infraestructura ya existente o ligeras modificaciones.
Seguridad	Necesarios complejos algoritmos	Puede ser segura a muy cortas distancias	Muy segura (ver apartado 3.1.7)

Tabla 1: Comparación de la comunicación por RF, IR y VLC.

En la Tabla 2 se han comparado otras características entre las comunicaciones por radiofrecuencia y las comunicaciones ópticas inalámbricas en general. Uno de los grandes inconvenientes o de las grandes ventajas según la aplicación es la incapacidad de OW para atravesar objetos opacos.

Propiedades del medio	RF	OW	Comentarios de OW
¿Ancho de banda regulado?	Sí	No	No se requiere aprobación. Compatibilidad mundial. ^o
¿Atraviesa objetos?	Sí	No	Menos cobertura pero más seguridad.
¿Pérdida de propagación (Path Loss)?	Alta	Alta	Altos requerimientos de alineamiento; pérdida por dispersión
Ruido dominante	Otros usuarios	Ruido de fondo	Rango limitado
Alineamiento	Bajos requerimientos	Muy sensible	
Potencia consumida	Alta	Baja	

Tabla 2: Comparación entre la comunicación óptica y por radiofrecuencia

Además, en la Figura 10 se puede observar la tasa de transferencia frente a la distancia para diferentes tecnologías inalámbricas incluidas VLC. Como se puede observar para el caso de VLC, a medida que aumenta la distancia de comunicación, la tasa de transferencia decrece llegando a ser nula para distancias superiores a 6 m.

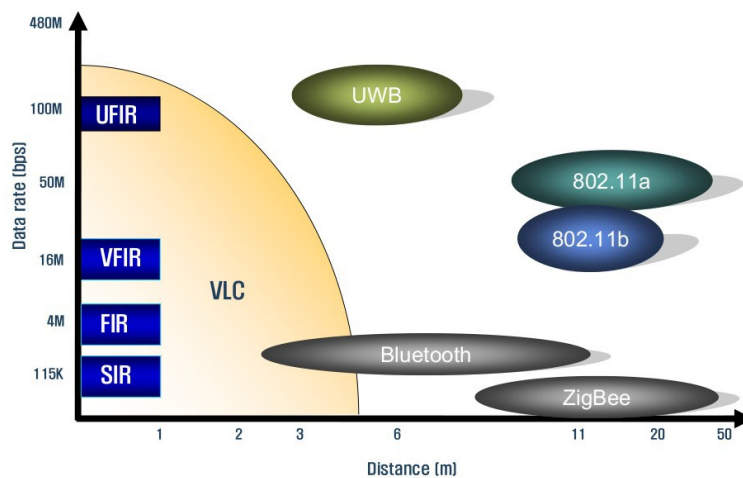


Figura 10: Comparación de la cobertura de VLC respecto a otras tecnologías inalámbricas 3

1.5.4 Consorcios y estándares

Con el nacimiento de las comunicaciones mediante luz visible no tardaron en surgir los consorcios entre organizaciones y empresas. El primero de ellos se creó en Japón el 25 de noviembre de 2003 agrupando a las mayores compañías de Japón. Éste se bautizó como *Visible Light Communications Consortium* (VLCC), [31]. Según ellos mismos indican, el VLCC tiene como principales objetivos explorar el potencial de las comunicaciones que utilizan como fuente luminosa el espectro visible e invitar a las empresas a participar y contribuir al desarrollo de la industria, el intercambio de información y el desarrollo de la tecnología. Además, pretende difundir por todo el mundo el potencial de esta tecnología que dará lugar a la siguiente generación de comunicaciones inalámbricas. Actualmente cuenta entre sus miembros con compañías tan importantes como Panasonic, Toshiba o Casio tal y como se muestra en la Tabla 3.

Lista de algunos de los principales miembros de VLCC
Panasonic Corporation Eco Solutions company
Toshiba Corporation
Casio Computer Co.,LTD.
Nakagawa Laboratories, Inc.
Outstanding Technology Co., Ltd.
TAMURA Corporation
Japan Coast Guard - Coast Guard Research Center
Marine Comms Ryukyu, Inc.
Japan Traffic Management Technology Association

Tabla 3: Principales miembros del consorcio VLCC. Fuente: VLCC (Feb de 2012)

3 Fuente: IEEE VLC Tutorial <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>

En junio de 2007 el consorcio VLCC propuso dos estándares de luz visible a JEITA (The Japan Electronics and Information Technology Industries Association) que fueron aceptados en el mismo año. Estos estándares se denominan JEITA CP-1221, para sistemas de comunicación por luz visible (marzo de 2007) y JEITA CP-1222 para sistemas de comunicación ID (junio de 2007) [32].

El estándar JEITA CP-1221 es el más básico en lo que a VLC se refiere. El propósito de este estándar es:

- Presentar un indicador mínimo para prevenir la interferencia entre diferentes equipos de comunicaciones ópticas.
- Definir los requerimientos mínimos necesarios a la hora de implementar aplicaciones que utilicen VLC.

Este estándar asume que el rango de la longitud de onda debe de ser 380 nm – 780 nm y permite un rango arbitrario de longitud de onda en cada aplicación en 1 nm de precisión. Por ejemplo, una aplicación particular podría usar luz perteneciente al rango 525 nm y 575 nm.



Figura 11: Estándares JEITA CP-1221 y JEITA CP-1222.

El estándar JEITA CP-1221 usa el método subportador a través de la modulación de la intensidad por una frecuencia específica. De esta forma, mediante el uso frecuencias subportadoras diferentes se evita la interferencia. En la Figura 12 se puede observar la asignación de la frecuencia subportadora en este estándar.

Asignación de la frecuencia subportadora en el estándar VLC

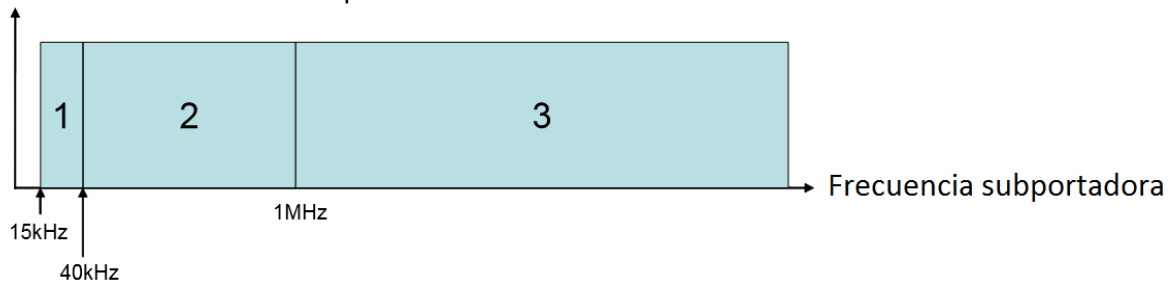


Figura 12: Asignación de la frecuencia subportadora.

- Rango de frecuencia 1: Este rango se usa en el sistema JEITA VL ID.
- Rango de frecuencia 2: En este rango, el ruido procedente del inversor de la lámpara fluorescente es notable por lo que no es apropiado para su uso en VLC.
- Rango de frecuencia 3: Este rango se usa para aplicaciones que necesitan mayores velocidades de comunicación.

Para el estándar JEITA CP-1222 tenemos las siguientes características:

- 1 Frecuencia subportadora: 28.8 KHz.
- 2 Tasa de transmisión: 4.8 Kbps
- 3 Modulación: Subportadora 4-PPM (*Pulse Position Modulation*). La modulación por posición de pulso se elige de tal forma que no provoque parpadeo.
- 4 Método de control del error: Detección del error mediante verificación por redundancia cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*).
- 5 Transmisión de contenidos: ID (dato fijado) y dato arbitrario (no fijado)

En la Figura 13 se puede observar la forma de la onda del sistema JEITA VL ID el cual usa la subportadora 4-PPM que tiene una potencia de transmisión media constante que no causa parpadeo.

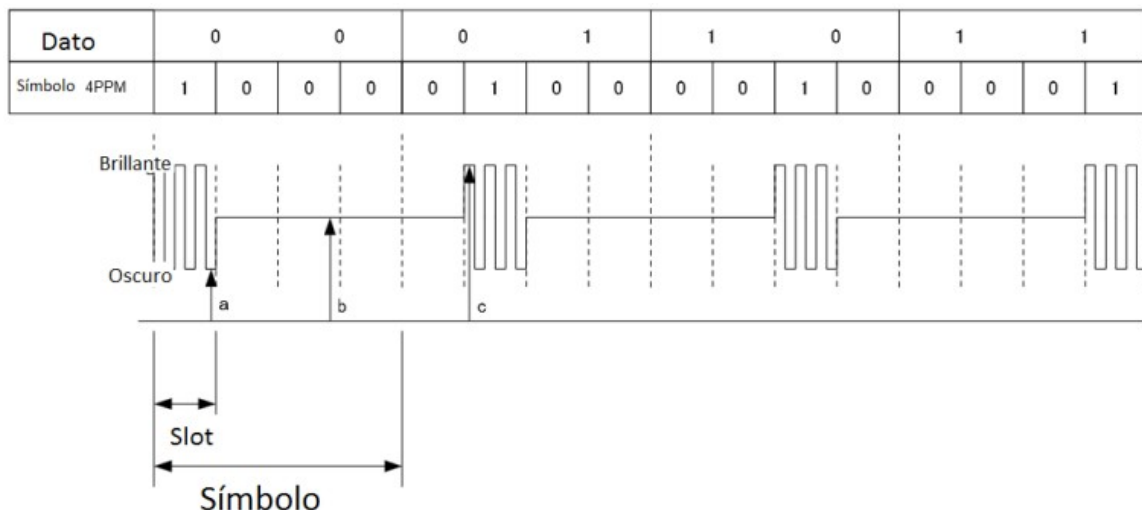


Figura 13: Forma de la onda en un sistema JEITA VL ID.

Un año después, en septiembre de 2008, VLCC inició su colaboración con la también organización internacional de estandarización de comunicaciones mediante IR *Infrared Data Association* (IrDA) anunciando un acuerdo de cooperación al que posteriormente se uniría la *Infrared Communication*

Systems Association (ICSA) [33]. Este acuerdo reconoce las sinergias entre las organizaciones y el potencial para cooperar en la promoción de tecnologías optoelectrónicas, como las comunicaciones mediante el IR y el visible. Los frutos del trabajo conjunto de ambas organizaciones no tardaron en llegar y en marzo de 2009, la especificación estándar de VLCC adoptó y expandió la capa física IrDA [34]. Mediante esta adaptación, los módulos ópticos existentes podían usarse para VLC mediante pequeñas modificaciones. También a comienzos de 2009, el grupo 7 de IEEE 802.15 dedicado a comunicaciones visibles, IEEE 802.15.7, comenzó su andadura la cual continúa en la actualidad [35].

1.5.5 Canal de comunicación por luz visible

Se puede definir el canal de comunicación visible como un canal óptico en el cual la comunicación se basa en la modulación de la intensidad luminosa y en la detección directa [36]. Este canal se modela de forma similar al canal de comunicación infrarrojo [37]. La información se transmite por medio de la modulación de la intensidad luminosa $I(t)$ según la respuesta a una señal eléctrica

$$I(t) = gx(t) ,$$

donde g es la ganancia óptica en la transmisión. La detección directa se puede modelar como la fotocorriente eléctrica $y(t)$ obtenida a la salida a partir de la intensidad luminosa. La respuesta del canal $h(t)$ de $I(t)$ a $y(t)$ se puede aproximar a

$$y(t) = rg \cdot x(t) \otimes h(t) + n(t) ,$$

donde \otimes denota la operación convolución, r es la sensibilidad del detector y $n(t)$ es el ruido en el proceso. K. Cui [38] caracterizó en 2010 un modelo de canal de línea de visión directa (LOS, *Line-Of-Sight*) a través de la pérdida de trayectoria y la potencia óptica recibida mediante simulaciones y medidas experimentales. La respuesta impulso del canal ideal LOS es plana y la señal es una función delta retrasada con el tiempo que representa la degradación de la amplitud de la señal transmitida. En interiores, se requiere un buen diseño de los esquemas de modulación y de las tasas de transmisión del sistema VLC para ampliar las múltiples reflexiones de la respuesta impulso del canal difuso [39]. Hay que tener en cuenta que el coeficiente de reflexión cambia según el material lo que provocará una mejor o menor comunicación [40]. Zhang en [39] presentó las medidas realizadas mediante el modelo de canal sin línea de visión (NLOS, *Non-line-of-sight*). En su trabajo midió experimentalmente el impulso y la correspondiente respuesta en frecuencia de un canal VLC interior mediante un pulso corto y una técnica de barrido de frecuencia. Se puede representar la respuesta del canal impulso como la suma de rayos después de un determinado número de reflexiones,

$$h_c(S, R) = \sum_{k=0}^{\infty} h_c^k(S, R) ,$$

donde $h_c(S, R)$ representa la respuesta impulso de los rayos sometidos al k -ésimo orden de reflexión desde el transmisor S al receptor R . La señal de VLC se puede transmitir mediante la reflexión en las superficies interiores presentes en el recinto. De esta forma la propagación indirecta de la luz transmitida amplía la cobertura del área de la comunicación. Sin embargo, este efecto beneficioso también puede acarrear consigo algunos inconvenientes como la atenuación de la señal y la propagación multitrayecto que causa interferencia entre símbolos (ISI, *InterSymbol Interference*) en la comunicación. La atenuación se puede reducir al proporcionar más potencia luminosa de manera que se logre obtener unas condiciones de luminosidad similares a las

proporcionadas por el canal LOS. Una posible solución a estos problemas es el uso de algunos métodos de modulación sofisticados como el acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales OFDM [30].

1.5.6 Elección de la intensidad luminosa en un sistema VLC

Otro de los factores a tener en cuenta a la hora de implementar un sistema de comunicación VLC interior es la comodidad de los usuarios con el nivel de iluminación. En la Tabla 4 podemos ver algunos ejemplos en los que el valor de la iluminancia varía de menor a mayor. Küller estudió en 2006 los niveles de iluminación preferidos por los trabajadores en una oficina [41]. Entre las principales conclusiones que obtuvo se encuentra que dependiendo del tipo de trabajo, el nivel de luminosidad debe encontrarse entre 500 lux⁴ y 700 lux. Los trabajadores se mostraron satisfechos cuando el nivel de iluminación era de 400 lux. Sin embargo, en estas condiciones el estado de ánimo de los mismos decreció sensiblemente. Por otra parte, un nivel de iluminación superior a 1000 lux provoca problemas visuales debido al brillo y la reflexión. Estos dos valores proporcionan los límites superior e inferior que debe de tener un sistema de iluminación que a su vez cumpla las funciones de un sistema de comunicación en la oficina en cuestión.

Iluminancia	Abr.	Ejemplo ⁵
0,00005 lux	50 μ lx	Luz de una estrella (Vista desde la tierra)
0,0001 lux	100 μ lx	Cielo nocturno nublado, luna nueva
0,001 lux	1 mlx	Cielo nocturno despejado, luna nueva
0,01 lux	10 mlx	Cielo nocturno despejado, cuarto creciente o menguante
0,25 lux	250 mlx	Luna llena en una noche despejada
1 lux	1 lx	Luna llena a gran altitud en latitudes tropicales
3 lux	3 lx	Límite oscuro del crepúsculo bajo un cielo despejado
50 lux	50 lx	Sala de una vivienda familiar
80 lux	80 lx	Pasillo/cuarto de baño
400 lux	4 hlx	Oficina bien iluminada
1000 lux	1 klx	Iluminación habitual en un estudio de televisión
32.000 lux	32 klx	Luz solar en un día medio (mín.)
100.000 lux	100 klx	Luz solar en un día medio (máx.)

Tabla 4: Tabla con ejemplos de iluminancia

1.5.7 Elección del color para un sistema VLC

El espectro de color de la luz es también un factor importante cuando utilizamos la doble funcionalidad del sistema de iluminación. En condiciones estándar, la iluminación se basa en el uso de luz blanca por lo que debe contener todas las longitudes de onda de la luz visible para proporcionar el mejor efecto visual al incidir sobre el ojo humano. El desequilibrio o falta de colores se puede ver como un tono distorsionado en la imagen observada.

En general, la luz blanca que percibimos se compone de diferentes partes de colores tal y como se muestra en la Figura 14. En la misma imagen se puede ver de forma aproximada la capacidad de respuesta del ojo humano [42].

4 Lux = lumen por metro cuadrado.

5 Fuente https://es.wikipedia.org/wiki/Lux#cite_note-1.

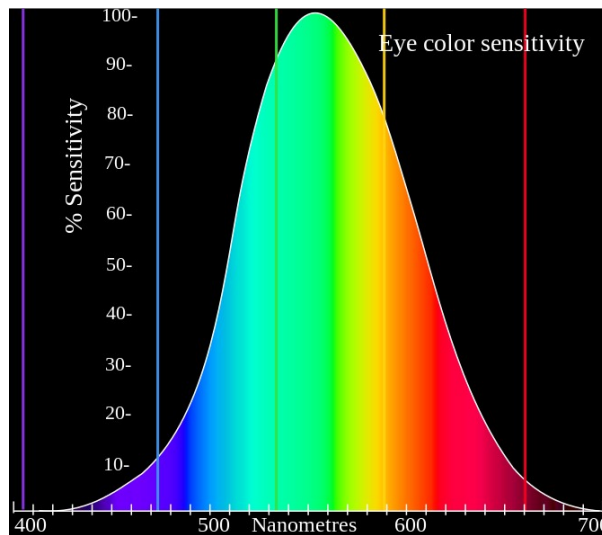


Figura 14: Sensibilidad del ojo humano a las diferentes longitudes de onda del visible ⁶

Como se puede apreciar, el ojo humano es más sensible a las longitudes de onda situadas en la región del espectro visible situada entre el verde y el amarillo de la luz. La respuesta en las regiones correspondientes al rojo y el azul es notablemente inferior lo que favorece su uso en un sistema VLC. Si se usa la región de más sensibilidad, los desplazamientos de color y cambios de intensidad y brillo se detectarán de una forma más fácil que si se producen en las regiones de menos sensibilidad.

1.5.8 Iluminación ambiente y ruido en un canal VLC

La iluminación interior o también llamada iluminación ambiente tiene por lo general dos componentes. Por una parte, está la componente artificial suministrada por el sistema de iluminación implementado. Por otra parte, se encuentra la iluminación natural suministrada por cualquier fuente luminosa no creada por el hombre. Cuando tenemos un sistema de comunicación VLC, la componente natural de la luz ambiente es detectada como una señal de fondo que también contribuye al incremento del ruido a nivel de detector. Una característica de las fuentes de luz natural es que suelen permanecer bastante estacionarias por lo que una posible solución para disminuir el ruido es recurrir al uso de filtros eléctricos u ópticos.

Como es lógico, la principal fuente de ruido para un sistema VLC es la luz solar cuya intensidad puede ser muy alta a lo largo de un amplio rango dinámico del espectro. La luz solar no contiene frecuencias que produzcan posibles interferencias en el sistema VLC dada su naturaleza de señal constante. Simplemente produce ruido de disparo estacionario que es observado como un voltaje continuo en el receptor. Este tipo de ruido se puede filtrar fácilmente de la señal detectada. Sin embargo, lo que sí es un problema es la capacidad de la luz solar para saturar la detección. Esto provoca un incremento en los requisitos de los detectores dinámicos en diferentes condiciones de iluminación. Además, la luz solar contiene entre sus longitudes onda el infrarrojo y el ultravioleta que también producen ruido de disparo en el receptor. En la Figura 15 se puede ver a modo de ejemplo la curva de respuesta del sensor PDA36A de Thorlabs. Como se observa en este caso, y en general para los detectores basados en silicio, la sensibilidad se incrementa en las longitudes de onda infrarrojas, lo que puede causar un aumento todavía mayor del ruido en el receptor VLC.

⁶ Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_vision .

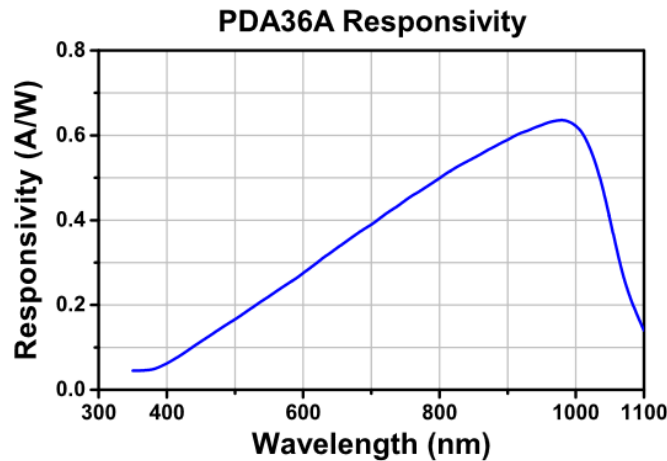


Figura 15: Curva de respuesta del sensor PDA36A.
Fuente: Thorlabs.

Como vimos en secciones anteriores, hoy día una de las fuentes luminosas artificiales más utilizadas son las de tecnología LED, junto con las lámparas de bajo consumo (fluorescentes y halogenuros metálicos) en decremento de las lámparas de incandescencia (filamento de tungsteno). En la Figura 16 se pueden ver los espectros de las fuentes luminosas más comunes [43].

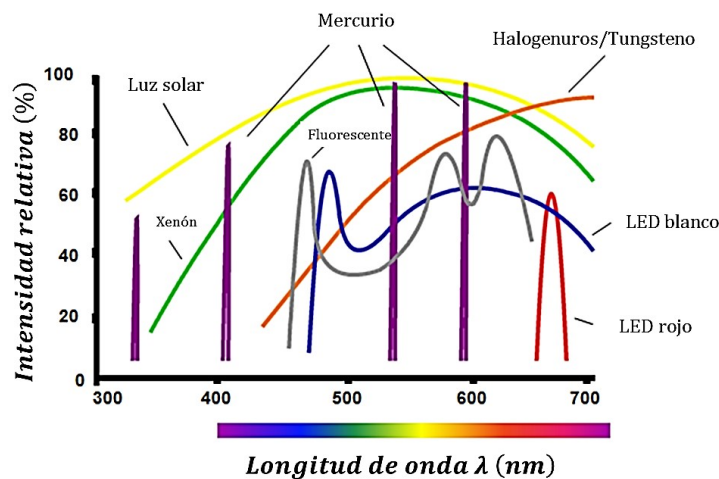


Figura 16: Intensidad relativa en función de la longitud de onda para diferentes fuentes de iluminación [43].

La luz de fondo producida por las fuentes luminosas naturales y artificiales induce ruido de disparo en la fotodetección que aumenta la corriente de fondo en el receptor. Esta corriente de fondo se puede reducir de nuevo mediante el uso de filtración óptica o eléctrica. A. Moreira en [44] midió las señales interferenciales procedentes de las fuentes de luz incandescentes y fluorescentes. Una lámpara incandescente emite una señal sinusoidal de 100 Hz de frecuencia usando una fuente de alimentación de 50 Hz. Los armónicos se pueden medir por debajo de 2 KHz sin embargo, solo las frecuencias inferiores a 800 Hz transportan una energía significativa. Por otra parte, una lámpara fluorescente convencional produce una señal sinusoidal distorsionada cuyos armónicos varían entre 50 Hz y 20 kHz y, además, produce una amplia interferencia en el rango que va desde 50 Hz hasta 1 MHz.

2 Lifi (Light Fidelity)

A lo largo de la sección anterior hemos comprobado como las comunicaciones por luz visible VLC y, en general, las OWC proporcionan buenos resultados en comunicaciones fijas. Sin embargo, para establecer un sistema de comunicación móvil es necesario el desarrollo de una red completa que proporcione una comunicación de calidad y de alta tasa de transferencia en movimiento. Nace el concepto de *Light Fidelity (LiFi)*, la red móvil y de alta velocidad basada en VLC.

2.1 Origen

La tecnología lifi, también llamada VPAN o red de área personal VLC, es relativamente reciente. Prácticamente se ha desarrollado en los últimos diez años gracias al equipo científico liderado por el profesor alemán de comunicaciones móviles Harald Haas en el *Alexander Graham Bell Building* de la Universidad de Edimburgo. La primera vez que se empleó este término fue por el propio Haas en la conferencia “*Wireless data from every light bulb*” [45] en julio de 2011 durante el *TED Global*⁷ donde sorprendió a los asistentes reproduciendo un video HD por *streaming* desde una lámpara LED convencional. Cuando Haas bloqueaba la luz, el video paraba su reproducción instantáneamente mientras que en caso contrario se reproducía con normalidad. La tasa de transferencia lograda fue de 10 Mb/s aunque en poco menos de un mes consiguió aumentar este valor hasta 123 Mb/s.

Un año más tarde en la Feria Internacional de Electrónica de Consumo, CES (*Consumer Electronics Show*) celebrada en Las Vegas en enero de 2012, se presentó al público esta tecnología mediante el intercambio de información entre dos teléfonos inteligentes. Para ello se colocaron ambos dispositivos a una distancia máxima de 10 metros y se varió la intensidad de sus pantallas [46]. Paralelamente, tal y como se observa en la cronología mostrada en la Figura Figura 17, el profesor Hass creó una empresa orientada a la explotación comercial de la nueva tecnología llamada PureVLC y que en la actualizada se denomina PureLiFi.

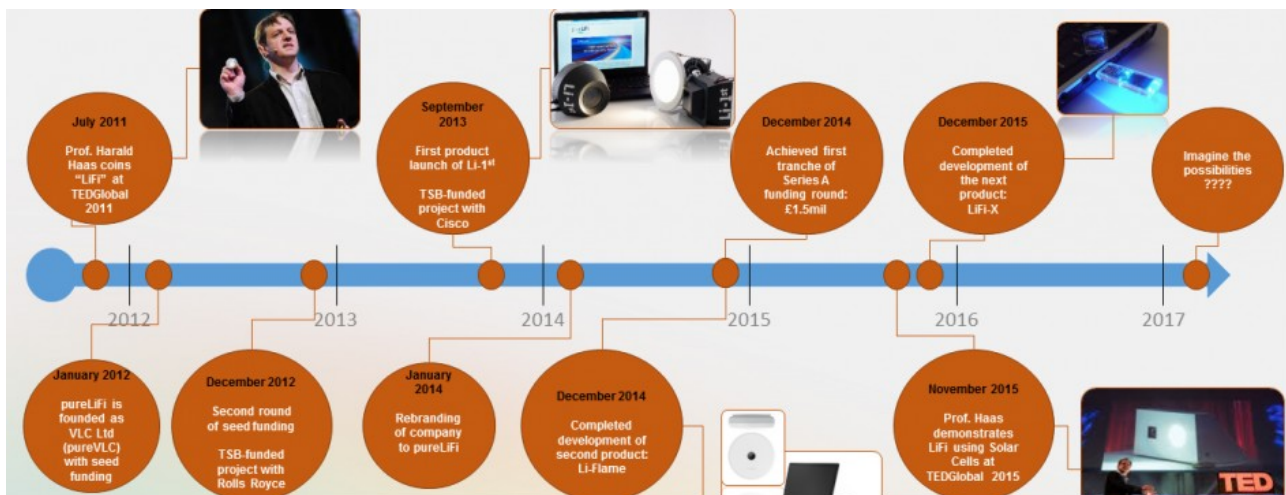


Figura 17: Cronología de PureLiFi1.

El éxito de Haas ha propiciado que numerosos grupos de investigación así como empresas, hayan apostado por esta tecnología siendo hoy día una de las que más repercusión mediática tiene. Prueba de ello es su constante presencia en medios generalistas o de divulgación [47], [48].

⁷ TED (*Technology, Entertainment and Design*) es una organización no lucrativa que nació en 1984 dedicada a la difusión de ideas sobre las tres áreas que componen su nombre en forma de breves conferencias y comunicaciones. Se puede encontrar más información en <http://www.ted.com/>.

2.2 Lifi Vs VLC

Las comunicaciones ópticas inalámbricas tradicionales como VLC usan luminarias LEDs para transmitir datos mediante la modulación de la intensidad. El receptor de señales recoge la señal a través de un fotodiodo mediante el principio de detección directa⁸. Se podría resumir el concepto de VLC como una comunicación de datos punto a punto donde se ha sustituido el cable como medio de comunicación. Como vimos en la Sección 1.5.4, las comunicaciones VLC se rigen por el estándar 802.15.7. Sin embargo, en la actualidad se está revisando para incluir las comunicaciones lifi. Lifi incluye, además, comunicación multiusuario bidireccional; por ejemplo, punto a multipunto o viceversa. También implica múltiples puntos de acceso que forman una red óptica inalámbrica de celdas ópticas o attoceldas, con transferencia sin cortes [50]. En otras palabras, lifi posibilita la movilidad del usuario y por tanto pasa a ser un nuevo tipo de comunicación dentro del sector inalámbrico. El hecho de que los LEDs sean conformadores naturales permite la contención de las señales lifi y, dado que estas se bloquean al incidir en elementos opacos como muros, se pueden controlar las interferencias cocanal⁹ aumentando la seguridad de la capa física. La Figura 18 muestra las principales técnicas que se necesitan para crear redes lifi con attoceldas (las comunicaciones VLC necesitan un conjunto de elementos que forman el núcleo de la tecnología). En el centro de la esfera se encuentran los nuevos dispositivos como los micro LEDs de nitruro de galio y los diodos de avalancha de un solo fotón (*SPAD, Single Photon Avalanche Diode*)¹⁰. También en el desarrollo de luminarias adaptadas a la nueva prestación que lifi impone y que en cualquier caso debe satisfacer a entornos diferentes. Todo ello se encuentra incluido dentro de los *back-end* ópticos junto con diversos subsistemas. Entre ellos se incluye la óptica agregaciones y/o adaptativas, así como la circuitería análoga para controlar los LEDs y dar forma a las señales obtenidas de los fotodiodos en los receptores. Para modelar correctamente los márgenes de enlace, establecer el ancho de banda de la coherencia del canal y el correcto modelo de interferencias de cocanal, se requieren modelos precisos de canal que tomen en cuenta la composición espectral de la señal [51].

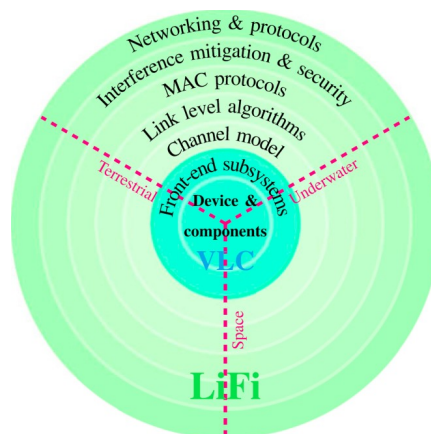


Figura 18: Principales elementos de lifi y sus aplicaciones

11

8 Receptor de detección directa, DD: Reciben esta denominación los receptores ópticos que operan convirtiendo la potencia óptica “directamente” en una corriente eléctrica proporcional a ella. Este tipo de receptores no permiten la recuperación, para su procesamiento, de la información transportada en la fase de la portadora óptica [49].

9 Interferencias producidas por otras redes inalámbricas.

10 SPAD (también conocido como *Geiger-mode APD* o *G-APD*) es un fotodetector de estado sólido en el que una portadora generada de fotones puede desencadenar una corriente de avalancha debido al mecanismo de ionización de impacto. Este dispositivo es capaz de detectar señales de baja intensidad (hasta el fotón único) e indicar los tiempos de llegada de los fotones con una fluctuación de unas pocas decenas de picosegundos.

11 Fuente: <http://www.lifi.eng.ed.ac.uk/lifi-news/2016-01-07-0734/what-lifi> .

Dado que es necesario maximizar el rendimiento de datos, es necesario el uso de algoritmos de nivel de enlace para alcanzar la forma óptima de las señales. En este contexto, debido a la positividad de las señales eléctricas en la modulación de la intensidad, se necesita un nuevo marco teórico para establecer la capacidad del canal ya que el marco tradicional de Shannon no es estrictamente aplicable [52]. Con el fin de permitir el acceso de múltiples usuarios, se requieren nuevos protocolos de control de acceso al medio (MAC, *Media Access Control*) que tienen en cuenta las características de la capa física lifi. Del mismo modo, se necesitan técnicas de reducción de interferencias para garantizar la equidad y el alto rendimiento general del sistema. Finalmente, la red óptica de attoceldas debe integrarse en redes definidas por software que se rigen por la separación de los planos de control y de datos, así como la virtualización de las redes [53]. Esto requiere el desarrollo de nuevos conceptos para lifi que aporten más conocimiento incluso fuera del ámbito de las comunicaciones VLC.

2.3 Sistema lifi

Tal y como hemos visto, el núcleo de la tecnología lifi es la luminaria que actúa como sistema de iluminación y emisor de datos de forma simultánea y el dispositivo de fotodetección. El funcionamiento es sencillo: en uno de los extremos del sistema se coloca el dispositivo emisor. Éste consta generalmente de una lámpara LED cuyo funcionamiento como codificador se rige por un microcontrolador. Normalmente, dada la doble función de este componente, se procura optimizar las condiciones de iluminación situándolo en lugares altos del recinto como techos, paredes etc. Como es lógico, en el otro extremo del sistema se coloca el dispositivo receptor en el lugar deseado por el usuario tal y como muestra la Figura 19. Éste llamado en su conjunto “candado lifi” o *Dongle* [55], consta de un fotodetector, un amplificador y un circuito de procesamiento de datos. Los datos recibidos se procesan y se envían al dispositivo deseado.

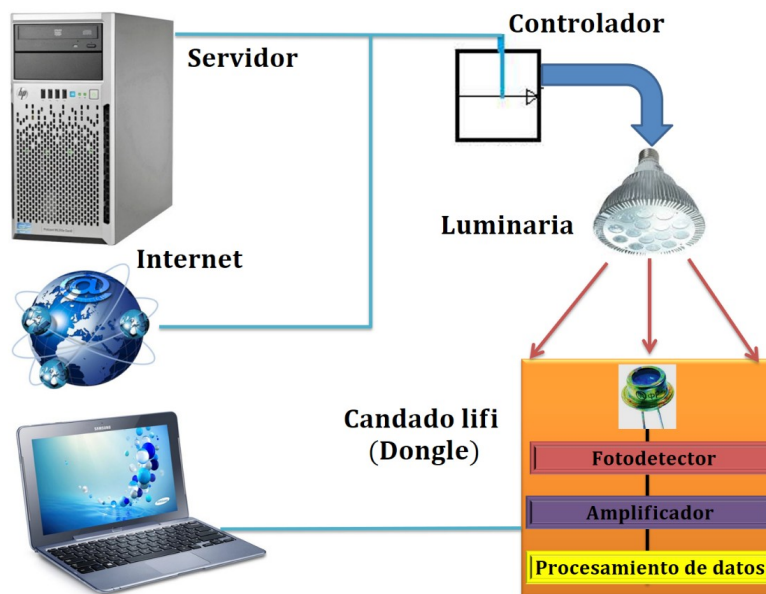


Figura 19: Esquema básico de un sistema lifi.

En la Figura 20(a) se muestra el flujo de datos del sistema y en la Figura 20(b) el diagrama de bloques. La arquitectura básica del sistema consiste en una sección de transmisión y una sección de recepción. La sección de transmisión consiste en una entrada de datos que alimenta al sistema de control de la conmutación. Éste genera la codificación binaria que indica la frecuencia de encendido y apagado del array de LEDs. En la sección de recepción, el fotodetector demodula la señal entrante

recibida y ésta se envía al filtro que elimina el ruido. Tal y como ya hemos visto, posteriormente la señal se amplifica obteniéndose la señal de salida.

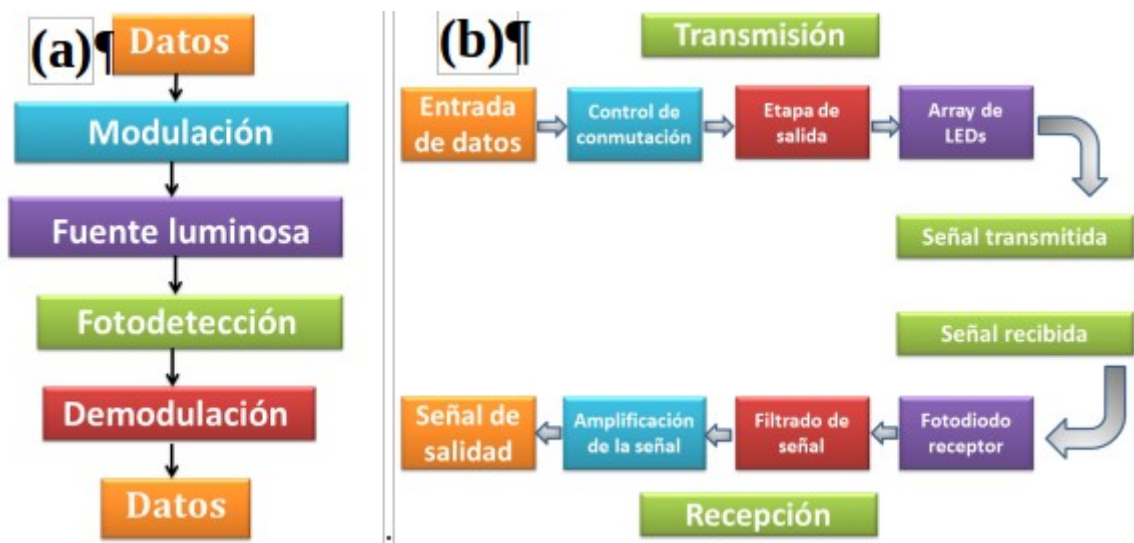


Figura 20: (a) Flujo de datos y (b) diagrama de bloques del sistema.

2.3.1 Enlace de subida (*uplink*)

Para establecer un sistema de comunicación lifi en su plenitud se requiere que la comunicación sea bidireccional o dúplex (*full duplex*) permitiendo canales de envío y recepción simultáneos [56]. En nuestro caso, esto se traduce en la necesidad de un enlace ascendente desde las terminales móviles a los puntos de acceso (AP, *Access Point*) ópticos [50]. En el ámbito de las RF se pueden encontrar diferentes técnicas como la duplexación por división de tiempo (TDD, *Time-Division Duplexing*) o de frecuencia (FDD, *Frequency-Division Duplexing*). En ellas, los enlaces ascendente y descendente se encuentran separados respectivamente por diferentes intervalos temporales o bandas de frecuencia. De entre estas dos técnicas la FDD es más difícil de llevar a cabo dado que el ancho de banda queda limitado por la superficie frontal del dispositivo y que la técnica superheterodina no se usa en sistemas IM/DD. La TDD supone una opción viable pero no impone ni un ritmo preciso ni condiciones de sincronización necesarias para la decodificación de datos. Por otra parte también asume que ambos enlaces de transmisión se realizan mediante la misma longitud de onda lo cual no siempre se desea [57]. Según esta circunstancia, la técnica más adecuada para lifi es la duplexación por división de la longitud de onda (WDD, *Wavelength Division Duplexing*) donde se establecen dos canales de comunicación a través de diferentes longitudes de onda. En este caso, una de las longitudes de onda más usadas para el enlace ascendente es el IR [57]. Siguiendo esta idea, pureLiFi presentó en 2013 uno de los primeros dispositivos comerciales llamado “Li-1st”¹² cuyo esquema de utilización se muestra en la Figura 21.

¹² <http://purelifi.com/lifi-products/li-1st/>

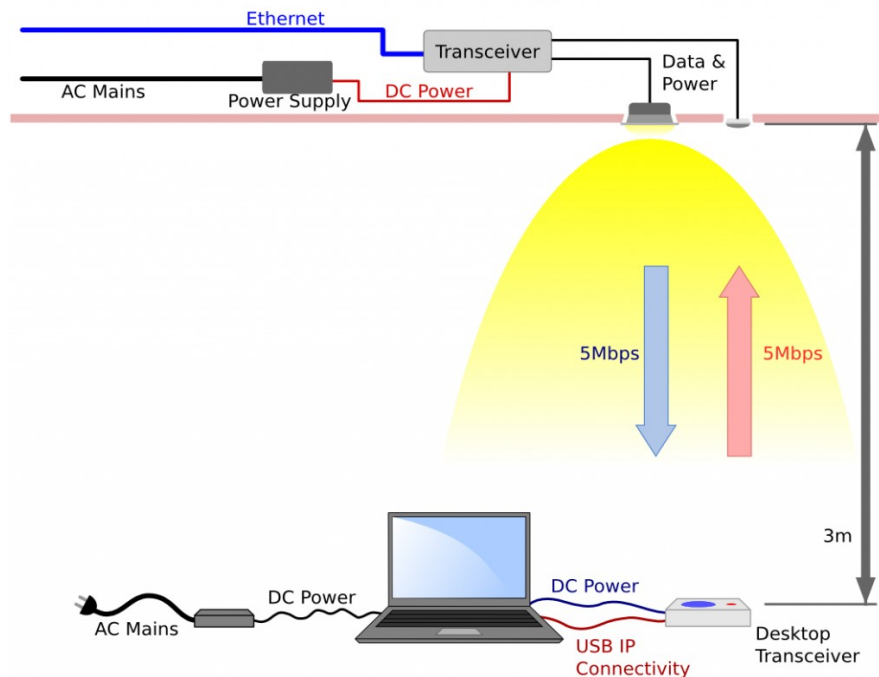


Figura 21: Esquema de sistema LiFi utilizando el dispositivo plug and play Li-1st

13

El sistema ofrece una comunicación dúplex completa con una capacidad de 11,5 Mbps para ambos enlaces a una distancia de separación de hasta 3 metros mientras que proporciona una amplia iluminación en la región de trabajo. El principal factor en la limitación de la distancia es la intensidad de la fuente luminosa.

Otra opción es utilizar para el enlace ascendente una componente del espectro electromagnético perteneciente al rango de las radiofrecuencias [57]. Este sistema tiene el inconveniente de no poder utilizarse en entornos con RF limitadas o prohibidas como las instalaciones regidas por la normativa de prevención de riesgos en atmósferas explosivas¹⁴ o en usos hospitalarios.

2.4 Consorcios y estándares

2.4.1 LiFi Consortium

Tal y como ellos mismos indican en su página web, <http://www.lificonsortium.org/index.html>, el consorcio lifi se fundó en 2011. Es una organización sin ánimo de lucro dedicada a la introducción de la tecnología óptica inalámbrica. Los miembros fundadores son un importante grupo de empresas internacionales de tecnología e instituciones dedicadas a la investigación en el campo de las comunicaciones ópticas. La finalidad del consorcio es promover el desarrollo colectivo, así como el establecimiento de una hoja de ruta para hacer llegar la nueva tecnología inalámbrica al mercado, demostrando las ventajas en cuanto a capacidad y cualidades respecto a las comunicaciones inalámbricas que utilizan las radiofrecuencias como medio de transmisión.

Hasta principios del año pasado, el consorcio se centró en las líneas fundamentales. Por una parte, el comentado desarrollo de nuevas tecnologías. Por otra parte, en el intercambio de conocimiento en el ámbito académico. Organizan habitualmente foros con expertos de todo el mundo donde se presenta la evolución de la tecnología junto con los últimos prototipos. Hoy día ha cambiado su

13 Fuente: <http://purelifi.com/lifi-products/li-1st/> .

14 <http://www.atmosferasexplosivas.com/index.php/normativaatex>

política siendo su objetivo primario el desarrollo de la tecnología y el producto final.

- Objetivos de *LiFi Consortium*
 - Promover las comunicaciones ópticas inalámbricas hasta el rango multi-gigabit en todas sus implementaciones.
 - Informar a los ejecutores potenciales y a los inversores de los recursos disponibles para ayudarles a alcanzar sus objetivos de inversión o de productos.
 - Crear soluciones integrales en previsión de las necesidades del cliente.
 - Coordinarse con otros grupos de estandarización y organizaciones de la industria para poder ofrecer a los clientes un conjunto completo de apoyo técnico y junto con el apropiado marketing.

2.4.2 Estándar IEEE 802.15.7

Al igual que para VLC, Sección 1.5.4, con el inicio de las comunicaciones lifi se comenzó a estudiar su estandarización. Ésta se empezó a desarrollar a comienzos de 2009, en el grupo 7 de IEEE 802.15 dedicado a comunicaciones visibles IEEE 802.15.7 [35].

El IEEE 802.15 es un grupo de trabajo del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*¹⁵) dirigido por Bob Heile¹⁶ (2016) [65]. 802.15 WPAN™ se centra en el desarrollo de normas de estandarización consensuadas para redes de área personal (PAN, *Personal Area Networks*) o redes inalámbricas de corta distancia (WPAN, *Wireless Personal Area Networks*). Ejemplos de estas redes son las establecidas entre dispositivos informáticos portátiles y móviles, ordenadores personales, periféricos y electrónica de consumo en general de tal forma que se posibilita la comunicación y la interoperación. El objetivo principal es la publicación de normas, prácticas y recomendaciones, o guías de amplia aplicabilidad en el mercado de tal forma que puedan competir eficazmente y coexistir con otras soluciones de redes cableadas e inalámbricas.

El grupo de trabajo IEEE 802.15 es parte del Comité de Estándares de Redes Locales y de Área Metropolitana 802 (802 *Local and Metropolitan Area Network Standards Committee*) de la IEEE *Computer Society*. El IEEE-SA es una organización internacional que ofrece a las industrias actuales una completa cartera de programas de estandarización. El IEEE tiene más de 368,225 miembros en aproximadamente 150 países. A través de sus miembros, el IEEE es una autoridad líder en áreas que van desde la industria aeroespacial, la informática y las telecomunicaciones hasta la ingeniería biomédica, la energía eléctrica y la electrónica de consumo.

Como hemos mencionado, las tareas referentes a las comunicaciones lifi recaen sobre el grupo IEEE 802.15.7. Éste define la capa de control de acceso al medio (MAC, *Medium Access Control*) que se refiere a los servicios definidos por el estándar y la capa física del estándar (PHY) que se refiere a la interfaz entre la MAC y el medio inalámbrico, con una tasa de transferencia capaz de soportar audio, video y multimedia. También tiene en cuenta la movilidad de la transmisión óptica, su compatibilidad con la iluminación artificial presente en la infraestructura y las deficiencias que puede causar la interferencia por luz ambiental. Finalmente, el estándar también tiene en cuenta todas las regulaciones en cuanto a seguridad ocular se refiere.

2.4.3 Topologías de la red

El estándar VPAN considera tres clases de dispositivos para la aplicación de VLC, cada uno con diferente rango de cobertura, velocidad de transferencia de datos, etc.: Infraestructura, móvil y vehículo tal y como muestra la Tabla 5. Estos dispositivos operan en una de las tres topologías recogidas en dicho estándar que se muestran en la Figura 22: punto a punto (P2P, *point to point*), estrella (*star*) y *broadcast*. Cada VPAN independiente tiene un identificador que permite la

15 <https://www.ieee.org/index.html>

16 Bob Heile (+1 781 222 1393), bheile@ieee.org.

comunicación entre los dispositivos presentes en una red mediante direcciones cortas. Nótese que la formación de la red se realiza en una capa superior fuera del estándar.

	Infraestructura	Móvil	Vehículo
Coordinador fijo	Sí	No	No
Fuente de alimentación	Amplia	Limitada	Moderada
Factor de forma	Sin restricciones	Restringido	Sin restricciones
Fuente luminosa	Intensa	Débil	Intensa
Movilidad física	No	Sí	Sí
Rango	Corto/largo	Corto	Largo
Tasa de transmisión	Alta/baja	Alta	Baja

Tabla 5: Clasificación de dispositivos.

El apoyo a la visibilidad se proporciona en todas las topologías para mantener la función de iluminación en ausencia de comunicación, en reposo o en los modos de recepción. El objetivo de este modo es mantener la iluminación y mitigar el parpadeo. En los siguientes apartados veremos con más detalle cada una de las topologías mencionadas

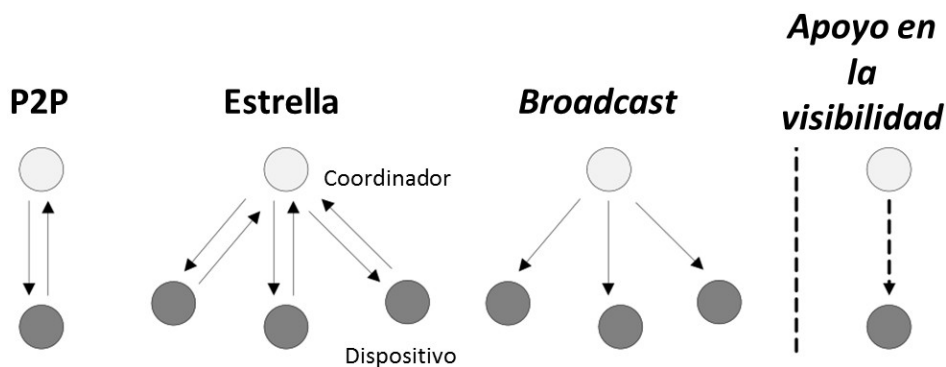


Figura 22: Topologías MAC para LiFi.

2.4.3.1 Topología punto a punto

En este caso cada dispositivo es capaz de comunicar con cualquier otro dispositivo dentro de su área de cobertura. Uno de los dispositivos actúa como coordinador cuando se establece la asociación.

2.4.3.2 Topología estrella

Todas las redes en estrella operan de forma independiente respecto de las otras redes en estrella que se encuentran en ejecución. Este mecanismo se logra mediante la elección de un identificador de VPAN que no esté siendo utilizado en ese momento por otra red dentro del área de cobertura. Una vez que se ha elegido el identificador, el coordinador permite que otros dispositivos se unan a la red.

2.4.3.3 Topología broadcast

Para este tipo de topología el dispositivo puede transmitir una señal a otros dispositivos sin formar una red. La comunicación es unidireccional y no se requiere la dirección del destino

2.4.4 Arquitectura de comunicación

En cualquier sistema de comunicación podemos encontrar dos componentes básicos principales, el emisor y el receptor. En nuestro caso, el emisor es un LED. La señal emisora se controla o por la conmutación entre el encendido y el apagado de dicho LED o por la alternancia en el color de la luz. Como sabemos, el parpadeo (*fliker*) afecta a la visión humana por lo que como solución, se han presentado diversos esquemas de atenuación de la iluminación o modulación para controlar el brillo [66]. La Figura 23 muestra el modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) [67] para VLC.

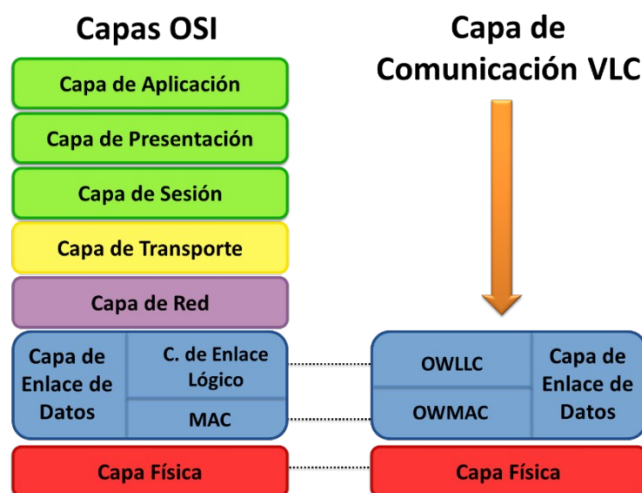


Figura 23: Capas de la pila de protocolo lifi.

El modelo OSI es el principal modelo de arquitectura para redes de comunicación. En él se describe cómo los datos y la información de la red se comunican desde una aplicación presente en un dispositivo informático a través de los medios de la red. La arquitectura del estándar IEEE 802.15.7 se define en función de un número de capas y subcapas con el fin de simplificar la estandarización. Cada capa es responsable de una parte del estándar y ofrece servicios a las capas superiores. La interfaz entre las capas sirve para definir los enlaces lógicos. Las principales capas del modelo OSI-VLC son la capa física PHY y la capa de enlace de datos (DLL, *Data Link Layer*). La MAC y las capas físicas son las mismas para emisor y receptor.

Particularizando el modelo para el caso de un dispositivo VPAN tenemos una capa física que contiene el transceptor de luz junto con su mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa MAC que proporciona acceso al canal físico de todo tipo de transferencia tal y como se muestra en la representación gráfica de la Figura 24.

Las capas superiores están formadas por una capa de red que proporciona la configuración de la red y la manipulación y el enrutamiento de mensajes y una capa de aplicación, que proporciona la función prevista del dispositivo. Una capa de control de enlace lógico (LLC, *Logical Link Control Layer*) puede acceder a la subcapa MAC a través de la subcapa de convergencia específica del servicio (SSCS, *Service-Specific Convergence Sublayer*). En la Figura 24 también se muestra la presencia de una entidad de gestión de dispositivos (DME, *Device Management Entity*). Ésta puede tener acceso a ciertos atributos de la entidad de gestión de la capa física (PLME, *Physical-Layer Management Entity*) y de la entidad de gestión del enlace de control de acceso al medio (MLME, *Medium-Access-Control Link-Management Entity*) a fin de interconectar las capas MAC y PHY con un regulador de intensidad. La DME también puede controlar el conmutador PHY mediante la PLME para la selección de las fuentes ópticas y de los fotodetectores. El conmutador PHY interactúa con el punto de acceso de servicio (SAP, *Service Access Point*) óptico y se conecta al

medio óptico que puede consistir en uno o múltiples fotodetectores y fuentes luminosas. Este último caso se tiene en cuenta en PHY-III junto con la posibilidad de movilidad de las celdas. Cabe destacar que la PLME controla el conmutador PHY para seleccionar la celda. La línea que va desde el conmutador PHY al SAP óptico es un vector. El número de líneas que componen el SAP óptico tiene una dimensión de $n \times m$, donde n es el número de celdas y m es el número de flujos de datos distintos de la PHY. En el caso de PHY-III, $m=3$.

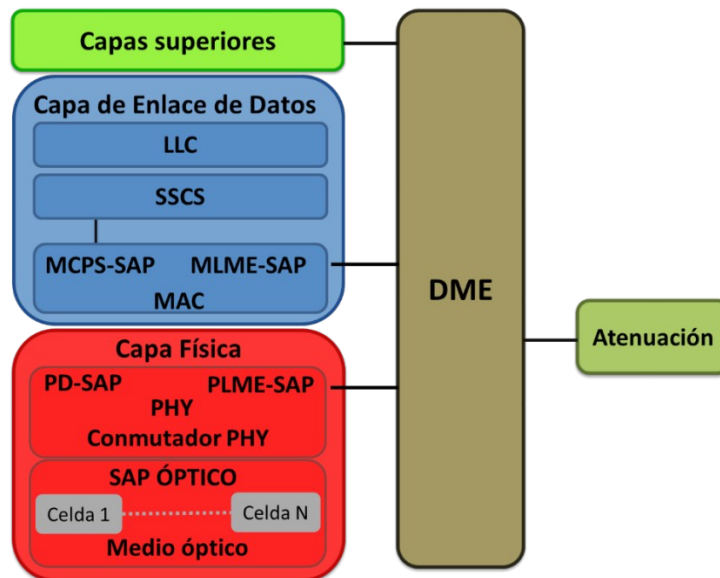


Figura 24: Modelo de referencia utilizado en el estándar para un dispositivo VPAN.

2.4.5 Capa física PHY

El estándar IEEE 802.15.7 define dentro de la capa física PHY, tres capas de acuerdo con las tasas de transferencia consideradas y su aplicación: PHY I, II y III¹⁷. PHY I opera desde los 11.67 kb/s hasta los 266.6 kb/s, PHY II desde 1.25 Mb/s hasta 96 Mb/s y finalmente PHY III opera entre 12 Mb/s y 96 Mb/s. Las funciones generales de la capa física son [68]:

- 1 Proporcionar servicios a la capa superior.
- 2 Activar y desactivar el transceptor VLC.
- 3 Proporcionar WQI (*Wavelength Quality Indication*) para todas las tramas recibidas.
- 4 Ayudar en la sincronización en el receptor utilizando el preámbulo incorporado en la estructura de la trama.
- 5 Proporcionar inserciones de cabecera (PHR, *Physical Header*) en el extremo de la transmisión. Esto se decodifica en el receptor final para determinar la longitud del campo de la unidad de datos de servicio de la capa física (PSDU, *Physical layer Service Data Unit*).
- 6 Seleccionar canales según el requisito.
- 7 Codificar la longitud de ejecución limitada (RLL, *Run Length Limited*). Ayuda a la codificación en la corrección de balance de DC, la recuperación de reloj y la mitigación de parpadeo [69]. En otras palabras, RLL es un código en línea que evita correr largas series de 1s y 0s que potencialmente pueden causar parpadeo y problemas de detección en la recuperación de datos y reloj (CDR, *Clock Data Recovery*). Para ello toma símbolos de

¹⁷ Se tiene pensado la incorporación de los protocolos en proceso PHY- IV, V y VI tal y como se observa en IEEE Draft P802.15.7r1/D0.

datos aleatorios en la entrada y garantiza el balance de DC con la igualdad de 1s y 0s a la salida de cada símbolo. Dentro del estándar se definen varios RLL como Manchester, 4B6B y 8B10B.

- 8 Proporcionar corrección de errores en el receptor mediante el uso de técnicas de corrección de errores hacia delante (FEC, *Forward Error Correction*) como la codificación por convolución (CC, *Convolutional Code*) y la codificación Reed-Solomon (RS) [70]. Los códigos de canal soportan tanto tramas de datos largas como cortas en aplicaciones con alta velocidad en interior y baja velocidad en exterior. Para aplicaciones exteriores, se han desarrollado códigos de alta robustez usando códigos RS y CC concatenados. De esta forma se supera la pérdida de trayectoria adicional debida a la mayor distancia y a la potencial interferencia introducida por el ruido óptico producido por la luz ambiente. Para aplicaciones interiores, donde normalmente los requerimientos de codificación son menos estrictos para distancias menores, se suelen utilizar códigos RS debido a que se adaptan mejor a implementaciones de altas velocidades.

Cada modo de modulación PHY tiene asociada una velocidad de reloj que “se divide” en varios esquemas de codificación para la obtención de las velocidades finales tal y como se muestra en Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8. La velocidad del reloj óptico para PHY I se elige de tal forma que sea $\leq 400 \text{ KHz}$ para tener en cuenta el hecho de que los LED usados en aplicaciones como luces de tráfico requieren altas corrientes. Para PHY II, la velocidad de reloj óptico se elige $\leq 120 \text{ KHz}$ para acomodar LEDs rápidos utilizados en dispositivos móviles y portátiles. Finalmente en PHY III la velocidad de reloj óptico se elige $\leq 24 \text{ KHz}$. El estándar también soporta el uso de diferentes velocidades de reloj con el mismo dispositivo para transmitir y recibir datos dado que el transmisor (LED) y el receptor (PD) son circuitos independientes.

Modulación	Código RLL	Frecuencia de reloj óptico	FEC (RS código externo)	FEC (CC código interno)	Tasa de transmisión
OOK	Manchester	200 KHz	(15,7)	1/4	11.67 Kbps
			(15,11)	1/3	24.44 Kbps
			(15,11)	2/3	48.89 Kbps
			(15,11)	Ninguno	73.3 Kbps
			Ninguno	Ninguno	100 Kbps
VPPM	4B6B	400 KHz	(15,2)	Ninguno	35.56 Kbps
			(15,4)	Ninguno	71.11 kbps
			(15,7)	Ninguno	124.4 Kbps
			Ninguno	Ninguno	266.6 Kbps

Tabla 6: Modos de operación para lifi PHY-I.

Modulación	Código RLL	Frecuencia de reloj óptico	FEC	Tasa de transmisión
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)	1.25 Mbps
			RS(160,128)	2 Mbps
		7.5 MHz	RS(64,32)	2.5 Mbps
			RS(160,128)	4 Mbps
			Ninguno	5 Mbps
OOK	8B10B	15MHz	RS(64,32)	6 Mbps
			RS(160,128)	9.6 Mbps
		30 MHz	RS(64,32)	12 Mbps
			RS(160,128)	19.2 Mbps
		60 MHz	RS(64,32)	24 Mbps
			RS(160,128)	38.4 Mbps
		120 MHz	RS(64,32)	48 Mbps
			RS(160,128)	76.8 Mbps
			Ninguno	96 Mbps

Tabla 7: Modos de operación para lifi PHY-II.

Modulación	Frecuencia de reloj óptico	FEC	Tasa de transmisión
4-CSK	12MHz	RS(64,32)	12 Mbps
8-CSK	12MHz	RS(64,32)	18 Mbps
4-CSK	24MHz	RS(64,32)	24 Mbps
8-CSK	24MHz	RS(64,32)	36 Mbps
16-CSK	24MHz	RS(64,32)	48 Mbps
8-CSK	24MHz	Ninguno	72 Mbps
16-CSK	24MHz	Ninguno	96 Mbps

Tabla 8: Modos de operación para lifi PHY-III.

En la Figura 25 se puede ver el diagrama de bloques de la capa física PHY-I. Los bits de entrada procedentes de las capas superiores se codifican mediante la codificación RS. Posteriormente se realiza un relleno de ceros mediante Padang (*Zero Padding*) [71] teniendo como resultado un intercalador para seguidamente pasar a un codificador convolucional. A continuación, pasa a través de un codificador RLL teniendo a la salida un símbolo formado por 2, 4 o 6 bits. Finalmente, pasa por un modulador y se envía por un canal con una sola fuente emisora de luz.

En el caso de PHY-II, el diagrama de bloques es más sencillo tal y como se muestra en la Figura 26. El inicio del modelo es igual al anterior codificándose los bits de entrada mediante RS. A la salida se produce la codificación mediante RLL donde el símbolo estará formado por 2, 4, 6 u 8 bits según los requerimientos deseados. Por último, se produce la modulación y se envía la información a través de un único LED.

Para el modelo PHY-III el diagrama de bloques es ligeramente más complejo. Se pasa por un bloque de codificación RS cuya salida vuelve a codificarse nuevamente mediante RS. Posteriormente se inicia la codificación por color. El espectro de luz visible se divide en 7 grupos. Cada uno de estos 7 grupos tiene un código específico en forma de coordenadas x, y. Mediante la modulación CSK se opera con 3 de estos grupos para formar los vértices de un triángulo logrando la formación de las constelaciones necesarias. En el caso del receptor, el sistema consta de tres fotodetectores cada uno sensible a una longitud de onda para desarrollar la decodificación.

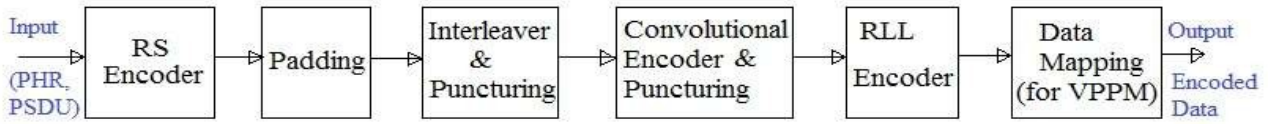


Figura 25: Diagrama de bloques para el modelo PHY-I.

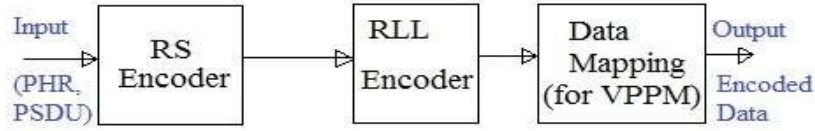


Figura 26: Diagrama de bloques para el modelo PHY-II

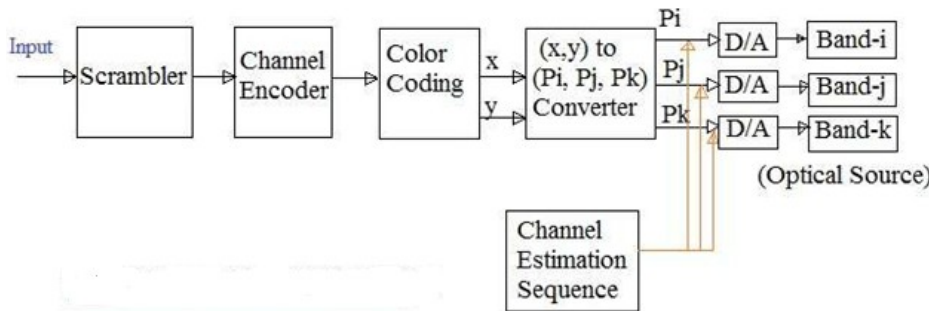


Figura 27: Diagrama de bloques para el modelo PHY-III

Como acabamos de ver, PHY I y II son transmisiones con una sola fuente de luz o SISO (*Single-Input, Single-Output*), es decir, “una entrada, una salida” [72] tal y como se observa en la Figura 28. Estas transmisiones se suele utilizar para las técnicas de modulación con portadora única (Ver Sección 2.5). Por otra parte, PHY III es una comunicación MIMO (*multiple-input and multiple-output*), es decir, de múltiples entradas y salidas capaces de soportar múltiples fuentes ópticas, Figura 29. Una modulación común para este caso es el desplazamiento de color CSK.



Figura 28: Sistema de transmisión SISO.



Figura 29: Sistema de transmisión MIMO.

2.4.5.1 Estructura de la trama PHY

La unidad de datos de protocolo de la MAC (MPDU, *MAC Protocol Data Unit*) en la salida de la subcapa MAC pasa a través de la capa PHY y se convierte en PSDU en la salida de la capa PHY después de procesarse a través de los varios bloques de PHY, como la codificación de canal y la codificación de línea. Precediendo a la PSDU se encuentra una cabecera de sincronización (SHR, *Synchronization Header*), que contiene el campo de secuencia de preámbulo; y una cabecera de PHY (PHR, *Header*), que, entre otras cosas, contiene la longitud de la PSDU en octetos. La secuencia de preámbulo permite al receptor lograr la sincronización. Los elementos SHR, PHR, y PSDU forman la trama PHY o la unidad de datos de la capa PHY (PPDU, *PHY Data Unit*).

2.4.5.2 Interoperabilidad y coexistencia entre los tipos de PHY

Un concepto muy importante a la hora de hablar de las capas físicas es la modulación espectral. En la Figura 30 se muestra un esquema del mismo. La fuente de luz visible siempre está encendida, por lo tanto, se puede observar la salida del fotodetector para producir la evaluación del canal libre (CCA, *Clear Channel Assessment*). La función CCA es un mecanismo de la capa física usado para determinar si un canal está siendo utilizado por otro dispositivo [73]. Antes de $t = T_1$, todo el espectro se encuentra en corriente continua. Posteriormente, el espectro se divide entre la continua y la señal moduladora.

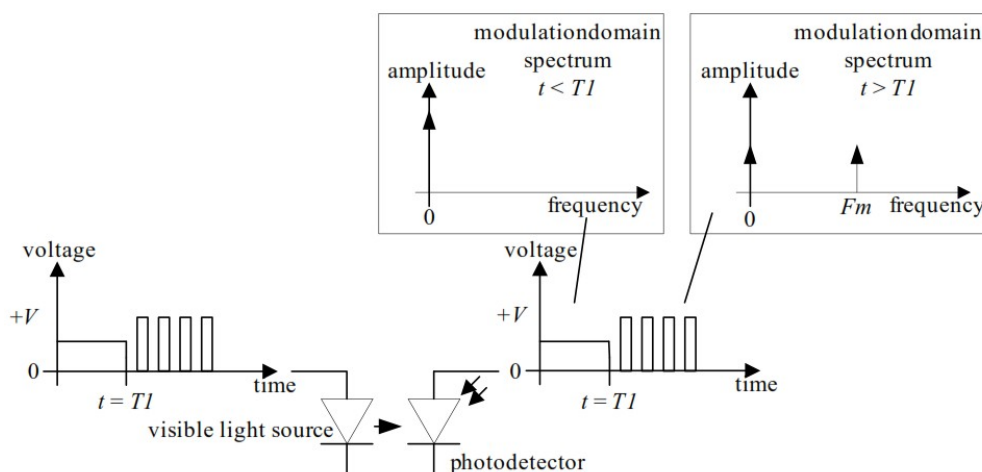


Figura 30: Modulación en el dominio espectral.

Cuando tenemos diferentes tipos de capas físicas, éstas coexisten, pero no interoperan. PHY-I y PHY-II ocupan diferentes regiones en el dominio espectral con diferentes velocidades de datos lo que permite la multiplexación por división de frecuencia (FDM, *Multiplexing División Frequency*)

como mecanismo de coexistencia, tal y como se muestra en Figura 31. Sin embargo, PHY-II y PHY-III comparten velocidades de reloj óptico, causando un solapamiento significativo en el dominio de frecuencia. Además, no todos los dispositivos son compatibles con múltiples bandas de frecuencia óptica necesarias para la PHY-III. Por tanto, todos los dispositivos PHY-III utilizan un dispositivo PHY II para la detección de dispositivos que apoyen la coexistencia con PHY-II.

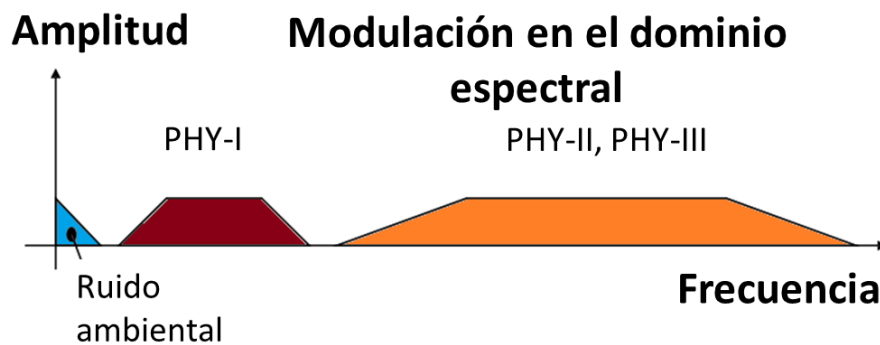


Figura 31: Separación de los tipos de PHY.

2.4.6 Capa de control de acceso MAC

El modelo estándar IEEE802 LAN (red de área local) y MAN (red de área metropolitana) [74] define el control de acceso al medio (MAC) como una subcapa de la capa de enlace de datos presentada en el modelo OSI. Las principales funciones de la capa MAC son la delimitación de la trama y el reconocimiento, direccionamiento, transferencia de datos desde las capas superiores, protección de errores (por lo general mediante el uso de secuencias de comprobación de tramas), y el arbitraje de acceso a un canal compartido por todos los nodos [74]. Los protocolos de capa MAC para redes inalámbricas de sensores deben ser eficientes para maximizar la vida útil de energía. Además, los protocolos deben ser escalables de acuerdo con el tamaño de la red y deben adaptarse a los cambios en la red, tales como la adición de nuevos nodos, la muerte de los nodos existentes, y la presencia de ruido transitorio en el canal inalámbrico [75].

El estándarlifi utiliza los modos de MAC resumidos en la Figura 32 para la transmisión de datos y la gestión de tramas [76]:

- Modo individual (*single*): En este modo, la trama transporta un PPDU (PLCP¹⁸, *Protocol Data Unit*) por trama. Se utiliza para comunicaciones cortas de datos como ACK, Association, Beacon, etc.
- Modo empaquetado (*packed*): En este modo, la trama transporta múltiples PPDUs hacia el mismo destino. Este modo mejora la eficiencia de la MAC ya que elimina cabeceras repetidas para las capas PHY y MAC con el mismo destino.
- Modo ráfaga (*burst*): En este modo la trama utiliza el preámbulo PHY con una longitud reducida después de la primera trama. Por otra parte, se utiliza RIFS (*Reduced Interframe Space*) en lugar de SIFS (*Short Interframe Space*). De esta forma se aumenta la eficacia y el rendimiento.
- Modo de modulación digital de amplitud atenuada (*OOK Dimmed*): Se utiliza para la transferencia de datos en aplicaciones de atenuación.

18 PLCP: *Physical Layer Convergence Protocol*

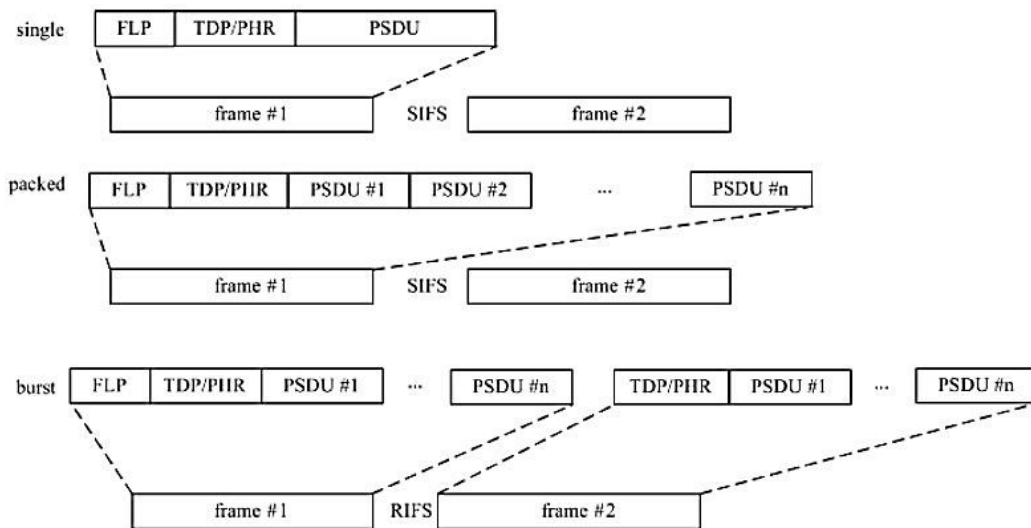


Figura 32: Diferentes modos de MAC para LiFi.

La Tabla 9 muestra la estructura de la trama de la capa física PHY. El sistema lifi usa una trama consistente en un preámbulo, una cabecera de PHY, y una unidad de datos de servicio PHY (PSDU, *PHY Service Data Unit*). Veamos con más detalle el significado de cada uno.

Preámbulo: Es utilizado por el transceptor para realizar la sincronización del reloj óptico. Preámbulo = {FLP (64 a 16384 bits), TDP (15 bits cada uno), ~ TDP, TDP, TDP ~} patrón de bloqueo rápido (FLP, *Fast Locking Pattern*) se compone de ceros y unos alternados. Cuatro patrones de topología dependientes (TDP, *Topology Dependent Patterns*) distinguen los modos PHY utilizados. Cada patrón TDP alternativo se invierte para lograr el equilibrio de DC en la capa física LiFi.

Preámbulo	Cabecera PHY	Secuencia de chequeo de cabecera (HCS, <i>Header Check Sequence</i>)	Campos opcionales	PSDU
Encabezado de sincronización (SHR, <i>Synchronization Header</i>)	Encabezado físico (PHR, <i>Physical Header</i>)			Payload

Tabla 9: Trama PHY para lifi (estructura PPDU).

Cabecera PHY: Se transmite junto con el tipo de modulación OOK. Transporta el modo ráfaga, el número de canal, el índice de esquema modulación/codificación (ID MCS, *Index of a Modulation / Coding Scheme*) que define el tipo PHY (PHY-I, II o III), la longitud PSDU etc.

HCS: Tiene un tamaño de 16 bits. Se utiliza para proteger la cabecera de la PHY en la capa física de lifi. Hay campos opcionales usados en el modo PHY-I para la frecuencia de reloj de 200 KHz.

PSDU: Tiene una longitud variable. Transporta los datos de la trama de PHY. PSDU: {cabecera MAC (MHR, *MAC Header*), MAC Payload, unidad de datos de servicios de la MAC (MSDU, *MAC Service Data Unit*), FCS, cola de bits}.

Octetos: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/ 10/14	Variable	2
Control de la trama	Número de secuencia	Identificador VPAN del destino	Dirección de destino	Identificador VPAN del origen	Dirección de origen	Cabecera de seguridad auxiliar	Payload de la trama	FCS
Campos de direccionamiento								
MHR							MSDU	MFR

Tabla 10: Trama MAC para LiFi (estructura MSDU).

La trama lifi para la MAC consiste en MHR, MSDU y MFR. El campo del control de la trama se transporta en MHR y tiene un tamaño de dos octetos como vemos en la Tabla 10. Está compuesto por el tipo de trama, los campos de direccionamiento y los indicadores de control. El tipo de trama de la MAC tiene una longitud de 3 bits. Se usa para diferenciar tipos de trama como Beacon, Data, Acknowledgment, Command, CVD etc. Las direcciones de origen y de destino tienen un tamaño de 16 o 64 bits.

2.5 Técnicas de modulación para lifi

Las comunicaciones lifi son comunicaciones que utilizan el espectro electromagnético del rango del visible para transportar la información. Por lo tanto, las técnicas de modulación para comunicación mediante radiofrecuencias seguirán siendo válidas aplicando unas ciertas modificaciones. Por otra parte, también existirán técnicas de modulación específicas para este rango espectral que se analizan en los siguientes apartados.

2.5.1 Modulación con portadora única (SCM)

En lifi frecuentemente se usan esquemas de modulación con portadora única. Estos incluyen la modulación digital de amplitud (OKK, *On-Off Keying*), la modulación por posición del pulso (PPM, *Pulse Position Modulation*) y la modulación por amplitud de pulsos (PAM, *Pulse Amplitude-Modulation*) utilizados en las comunicaciones inalámbricas por infrarrojo [14]. La modulación digital de amplitud, Figura 33, es uno de los esquemas de modulación más sencillo por lo que también es de los más utilizados. Éste ofrece un buen compromiso entre el rendimiento del sistema y la complejidad de la implementación. Dada su propia naturaleza, la OKK transmite datos apagando y encendiendo secuencialmente el LED. Esto puede proporcionar apoyo a la regulación de la luminosidad. Tal y como se especifica en estándar IEEE 802.15.7 [74], la atenuación de la OKK se puede lograr:

- i) Redefiniendo los niveles de encendido/apagado. Puede mantener la misma velocidad de datos, sin embargo, el alcance del rango fiable de comunicación puede decrecer con los niveles bajos de atenuación.
- ii) Jugando con la compensación del símbolo. Se logra mediante la inserción adicional de pulsos de encendido / apagado, cuya duración viene determinada por el nivel de atenuación deseado. Como la máxima tasa de transferencia se logra con un 50 % de atenuación en los niveles y, asumiendo que en media tenemos igual número de 1s y 0s, incrementar o disminuir el brillo de los LEDs podría causar un decrecimiento en la tasa de transferencia de datos.

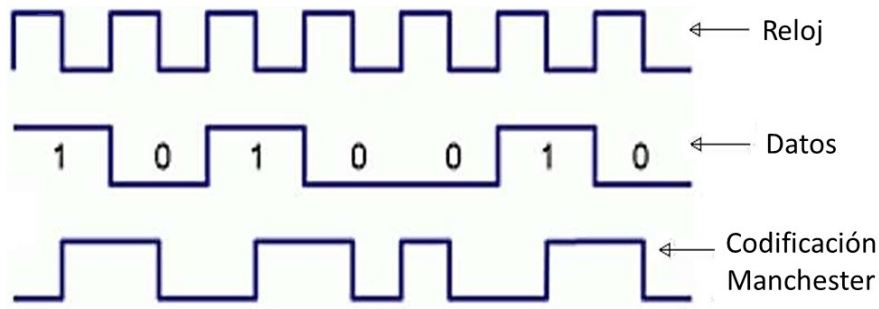


Figura 33: Técnica de modulación OOK utilizando códigos Manchester.

En estándarlifi, OOK utiliza códigos de Manchester para representar información digital en forma de unos y ceros. La codificación se realiza utilizando el concepto de transición de borde donde de menor a mayor representa un '1' lógico y de mayor a menor representa un '0' lógico.

Comparada con OOK, PPM es más eficiente en cuanto a potencia, pero menos en cuanto a eficiencia espectral. Una variante de la misma conocida como modulación de la posición del pulso variable (VPPM, *Variable Pulse Position Modulation*), Figura 34, puede apoyar la regulación a través del cambio de la anchura de los pulsos según el nivel de brillo específico. De esta forma podemos entender VPPM como una combinación de PPM con la modulación por ancho de pulsos (PWM, *Pulse Width Modulation*).

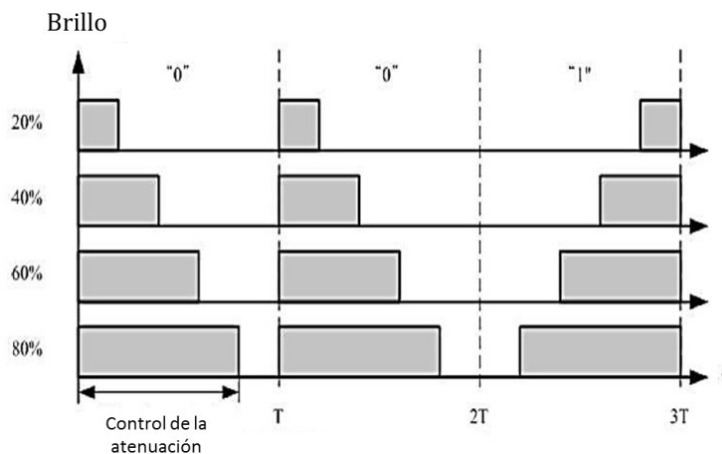


Figura 34: Técnica de modulación VPPM.

En el caso de VPPM, el '0' lógico se asigna utilizando un pulso positivo al comienzo del periodo seguido de un pulso negativo. El '1' lógico se asigna utilizando un pulso negativo al principio del periodo seguido de un pulso positivo.

La modulación espacial óptica es un nuevo esquema SCM que se basa en el principio de modulación espacial [77]. Se ha comprobado que, en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas interiores, este tipo de modulación es eficiente tanto en potencia como en ancho de banda. Wu plantea una variante de la modulación de amplitud en cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) para los sistemas de portadora simple [78]. El sistema propuesto utiliza dos señales ortogonales en lugar de las partes real e imaginaria del formato de señalización QAM, para la transmisión de señal de espectro eficiente en las redes lifi.

2.5.2 Modulación con multipotadora

A medida que los requerimientos en cuanto a tasa de transferencia aumentan en las redes lifi, esquemas como los vistos en el apartado anterior comienzan a sufrir efectos no deseados como la

distorsión de la señal no lineal en el *front-end* del LED y la interferencia entre símbolos causada por la selectividad de frecuencia en canales inalámbricos ópticos dispersivos. Esto hace que para comunicaciones ópticas inalámbricas de alta velocidad se haya optado por la modulación multiportadora (MCM, *Multi-Carrier Modulation*). Comparada con SCM, MCM es más eficiente en el ancho de banda, pero menos eficiente en términos energéticos. La implementación más habitual en redes lifi es la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) donde los flujos de datos paralelos se transmiten simultáneamente a través de una colección de subportadoras ortogonales con posibilidad de omitir la ecualización compleja [79], [80]. Si se elige el número de subportadoras ortogonales de manera que el ancho de banda de la señal modulada sea más pequeño que el ancho de banda de coherencia del canal óptico, cada subcanal se puede considerar como un canal de desvanecimiento plano pudiéndose aplicar las técnicas para tal caso. El uso de OFDM permite la utilización de técnicas de carga de potencia y bits adaptativas en cada subportadora de modo que se mejore el rendimiento del sistema [81]. Un modulador de OFDM se puede implementar mediante un bloque de transformada discreta de Fourier que supone el uso de la transformada rápida de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) seguido de un convertidor digital analógico. Así, la señal OFDM generada es compleja y bipolar. A la hora de implementar comunicaciones lifi, se deben de modificar las técnicas convencionales de OFDM a fin de ajustar los requerimientos de modulación de intensidad/detección directa impuestos por los LEDs comerciales.

Normalmente, para asegurar una señal de salida de valor real después de la transformada se aplica la simetría hermítica en las subportadoras. Por otra parte, la intensidad luminosa no puede ser negativa por lo que la señal lifi obligatoriamente debe ser unipolar. En la literatura podemos encontrar múltiples ejemplos para la obtención de una señal unipolar en el dominio temporal. DCO-OFDM utiliza la componente positiva de la corriente continua para la generación de la señal unipolar [14]. Este método produce un aumento en el consumo total de energía eléctrica sin pérdida en la eficiencia espectral. Otro esquema de OFDM es el óptico asimétrico recortado (ACO-OFDM, *Asymmetrically Clipped Optical*) donde, además imponer la simetría hermitiana, solo se utilizan las subportadoras impares para la transmisión de datos imponiendo la nulidad de las pares [82]. Esta imposición hace que la eficiencia espectral se reduzca a la mitad. Por otra parte, dado que solo se necesita una pequeña componente de continua, ACO-OFDM es energéticamente más eficiente que DCO-OFDM [83]. El esquema asimétricamente recortado de corriente continua (ADO-OFDM, *Asymmetrically clipped Direct Current biased*) es una combinación de DCO-OFDM y ACO-OFDM donde el esquema DCO-OFDM se usa para las subportadoras pares y ACO-OFDM para las impares [84]. En ciertas situaciones, ADO-OFDM produce mejores resultados en términos de eficiencia energética respecto a DCO-OFDM y ACO-OFDM. En 2013 H. Elgala propuso el esquema de OFDM conocido como óptico polarizado inverso (*RPO-OFDM, Reverse Polarity Optical*) en el que incorpora la atenuación óptica [85]. Así, se combina la señal de OFDM de alta velocidad con la señal PWM de baja velocidad contribuyendo ambas a la iluminación del LED. Con este sistema se utiliza el máximo rango lineal del LED por lo que se minimiza la distorsión no lineal de la señal. Otro esquema fue propuesto en 2009 por Lee en el que modifica la modulación multitono discreta mediante la modificación de la amplitud del pulso (PAM-DMT, *Pulse-Amplitude-Modulated Discrete Multitone Modulation*) [86]. Como en ACO-OFDM, también se recorta la señal negativa. La principal diferencia se haya en el hecho de que en este caso se utilizan para la transmisión de información todas las subportadoras disponibles. Sin embargo, cada subportadora únicamente modula las partes imaginarias de la señal. Así, la distorsión de señal provocada por el recorte asimétrico recae en la componente real, y es ortogonal a la señal portadora de información. A mediados de 2015 Wang presentó una combinación de los esquemas ACO-OFDM y QAM-DMT denominado óptico asimétrico híbrido OFDM (AHO-OFDM, *Asymmetrical Hybrid Optical OFDM*) [87]. En este caso se utilizan las subportadoras pares e impares para la transmisión de información. También en 2015 Mossaad presentó una técnica de OFDM basada en el uso de una

matriz de LEDs de tal forma que se puede asignar subportadoras a LED separados físicamente [88]. De esta forma se ayuda a la mitigación de las distorsiones no lineales debido al promedio de la potencia de pico alto.

Entre las alternativas a ACO-OFDM se encuentran los sistemas de comunicación unipolar como Flip - OFDM [89] y (U-OFDM, *Unipolar* - OFDM) [90] con los que se pueden lograr rendimientos comparables en tasas de errores binarios (BER, *Bit Error Rate*) y eficiencia espectral. Recientemente Tsonev ha propuesto una nueva técnica de sistema unipolar mejorado (eU-OFDM, *enhanced Unipolar*) que permite la generación de la señal unipolar sin pérdida de eficiencia espectral como en ACO-OFDM, PAM-DMT, Flip-OFDM y U-OFDM [91]. Como alternativa, Noshad propone usar la matriz de Hadamard en vez de la de Fourier como una matriz ortogonal para multiplexar múltiples flujos de datos [92].

2.5.3 Modulación específica de LiFi

Por lo general los transmisores lifi posibilitan la comunicación inalámbrica y la iluminación de forma simultánea. Tal y como hemos visto para las comunicaciones VLC, la luz puede provenir de LEDs azules con un recubrimiento amarillo de fósforo o mediante la mezcla de LEDs con los tres colores fundamentales. Las luminarias diseñadas con LEDs multicolores proporcionan más posibilidades de modulación de la señal y de detección en sistemas lifi [93]. En este sentido, en el estándar 802.15.7 se describe la modulación por desplazamiento de color (CSK, *Color Shift Keying*), donde las señales se codifican en intensidades de color emitidas por LEDs rojos, verdes y azules (RGB). En este sistema, los bits entrantes se asignan a las cromaticidades instantáneas de los LEDs de colores mientras se mantiene constante un color promedio percibido. En la Figura 35 se muestra un esquema de esta modulación y en la Figura 36 se muestra un esquema de diseño de constelaciones descrito en el estándar IEEE 802.15.7. Los elementos S_i son los símbolos de 4-CSK e I, J y K son las coordenadas xy de cromaticidad.

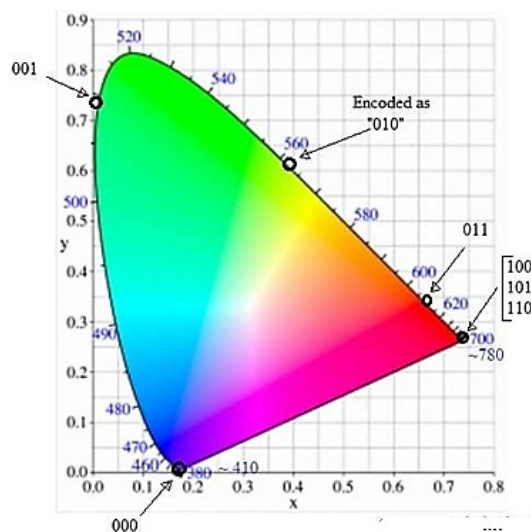


Figura 35: Modulación CSK.

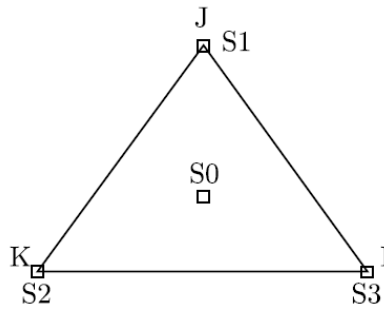


Figura 36: Regla de diseño para 4-CSK descrita en el estándar IEEE 802.15.7.

Existen dos principales ventajas de CSK sobre los sistemas de modulación de intensidad convencionales. En primer lugar, ya que se garantiza un flujo luminoso constante, no hay efecto de parpadeo sobre todas las frecuencias. En segundo lugar, el flujo luminoso constante implica una corriente de excitación LED casi constante, lo que reduce la posible corriente de entrada en la modulación de la señal, y por lo tanto mejora la fiabilidad del LED. Basado en CSK, Mutala en 2012 desarrolló la modulación metamérica (MM, *Metameric Modulation*) que puede lograr una mayor eficiencia energética y proporcionar más control en la calidad del color [94]. El inconveniente principal se encuentra en el hecho de necesitar un LED verde adicional controlado de forma independiente. Desde la perspectiva de la maximización de la capacidad de comunicación, Ahn propuso en 2012 la modulación de la intensidad de color (CIM, *Color Intensity Modulation*) tanto para canales ópticos ortogonales como para no ortogonales [95].

2.6 Requisitos generales de PHY

2.6.1 Plan de bandas de longitud de onda

El estándar contempla que un dispositivo compatible debe de operar con el pico de radiancia energética en el rango de longitud de onda comprendido entre los 380 nm y los 780 nm que se corresponde aproximadamente con el espectro visible por el ser humano, Figura 37.

violeta	380-450 nm
azul	450-495 nm
verde	495-570 nm
amarillo	570-590 nm
anaranjado	590-620 nm
rojo	620-750 nm

Figura 37: Espectro visible.

Estos dispositivos pueden operar en una o varias bandas de frecuencias del rango impuesto que se recogen en la Tabla 11.

Bandas de longitud de onda (nm)	Anchura espectral (nm)	Código
380 to 478	98	000
478 to 540	62	001
540 to 588	48	010
588 to 633	45	011
633 to 679	46	100
679 to 726	47	101
726 to 780	54	110
Reservado		111

Tabla 11: Bandas de longitud espectral y su anchura.

Los códigos se indican en la cabecera PHY y se utilizan para informar acerca de las longitudes de onda que contienen el pico espectral para la trama transmitida. El receptor puede utilizar esta información para optimizar su rendimiento. El estándar también admite el uso de transmisores ópticos de amplio ancho de banda como los LEDs blancos que pueden transmitir en múltiples bandas o tener filtraciones en otras bandas que utilizan canales de agregación o de guardia. El agregado de canales, Figura 38, se utiliza para indicar a las fuentes ópticas que abarcan múltiples bandas (>1) en el plan de bandas propuesto y están transmitiendo intencionadamente en múltiples bandas debido a la elección de la fuente luminosa. Los canales de guardia, Figura 39, se usan para indicar las fuentes ópticas que involuntariamente se filtran a otras bandas cuya información se puede descartar en el receptor para incrementar el rendimiento. Si se agregan múltiples bandas o se transmiten simultáneamente múltiples fuentes ópticas, los mismos datos se enviarán a todas las fuentes ópticas durante el preámbulo y la cabecera durante la detección de dispositivos, ya que no conoce las prestaciones del receptor.

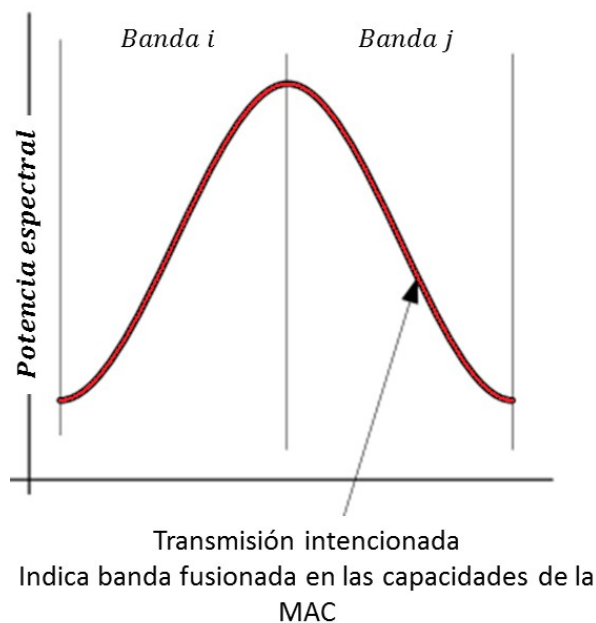
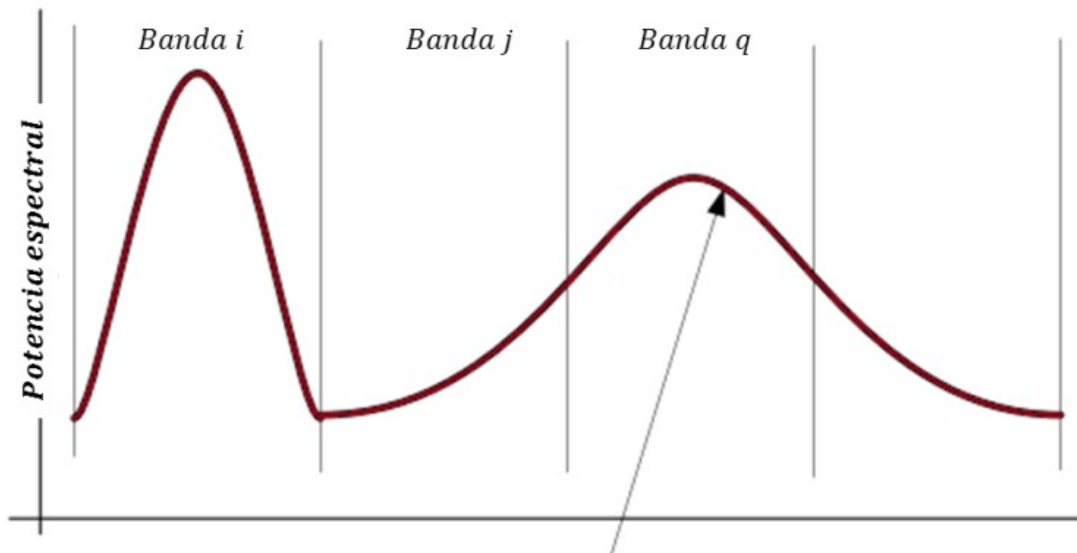


Figura 38: Canal de agregación.



Transmisión no intencionada
Indica banda(s) de guarda en las capacidades de la
MAC, depende de la cantidad de fuga

Figura 39: Canal de guardia.

2.6.2 Asignación óptica

Un nivel alto de conmutación de la PHY, aplicado a la fuente de luz, dará lugar a una alta intensidad radiada mientras que un nivel bajo de conmutación dará lugar a una reducción de la intensidad radiada. La relación de extinción [96],

$$r_e = \frac{P_1}{P_0} ,$$

es escogida por el implementador.

2.6.3 Máxima tolerancia del error para múltiples fuentes ópticas

Cuando se utilizan varias fuentes ópticas, el estándar recomienda que éstas tengan respuestas de frecuencia similares ya que la entrada digital a todas las fuentes ópticas de la PHY debe de estar sincronizada. La Figura 40 muestra la propagación permitida a la salida de las fuentes ópticas suponiendo que la entrada digital está sincronizada. Como norma, la desviación en el nivel medio de intensidad de la señal durante la subida y la bajada temporal a la salida de las fuentes no debería variar más de un 12,5 % del periodo de reloj.

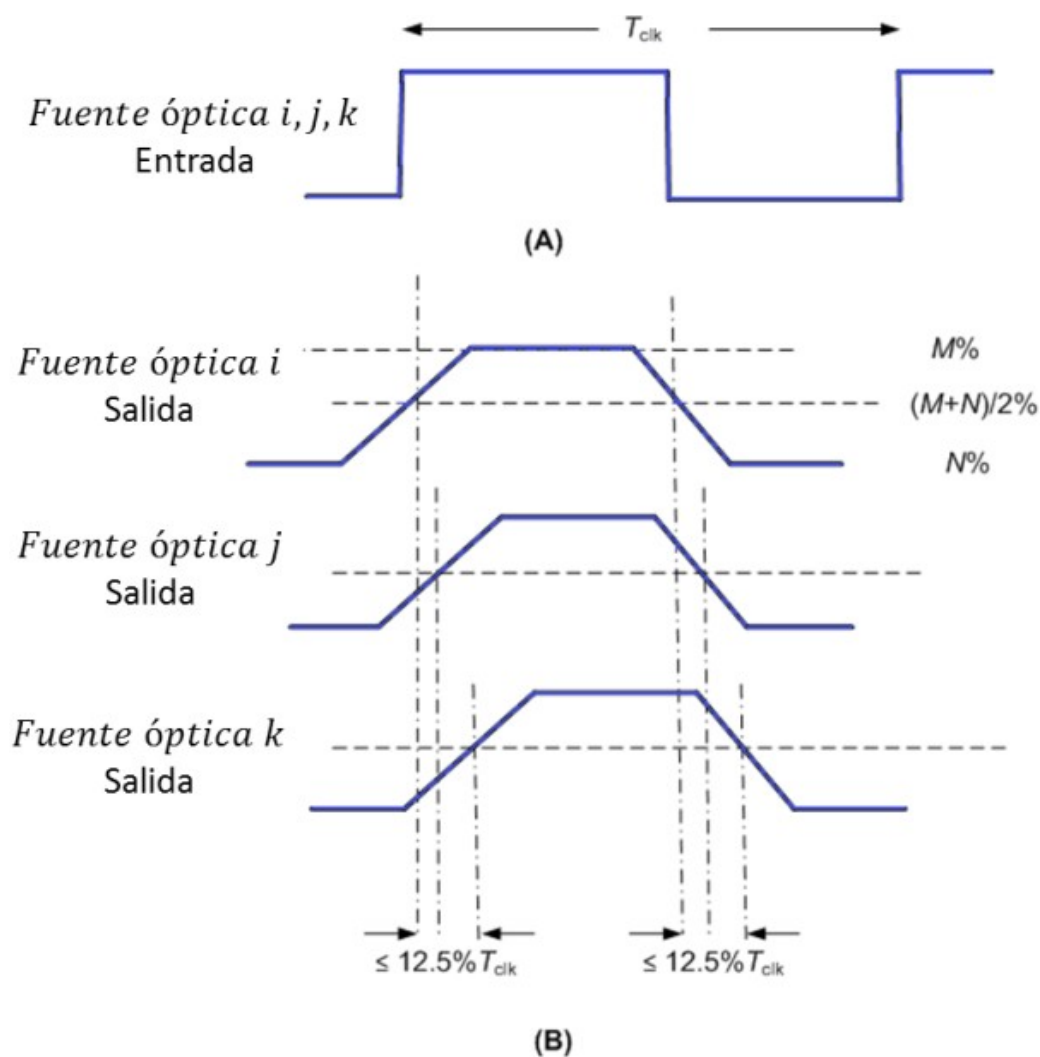


Figura 40: Máxima propagación permitida a la salida de las fuentes.

2.6.4 Periodos mínimos de LIFS, SIFS y RIFS

Para proporcionar el espacio entre tramas adyacentes se utiliza un mecanismo basado en prioridades llamado (IFS, *Interframe Sparcing*). La separación mínima entre tramas depende del modo de operación de la MAC. El estándar define tres tipos de espaciado entre tramas utilizados para proporcionar diferentes prioridades: largo (LIFS, *Long Inter Frame Sparcing*), corto (SIFS, *Short Inter Frame Sparcing*) y reducido (RIFS, *Reduce Inter Frame Sparcing*). Para las topologías de estrella y punto a punto el periodo SIFS, LIFS y RIFS se basa en la velocidad del reloj óptico negociada por la MAC justo antes de iniciar la comunicación de datos. Una vez seleccionada la velocidad del reloj óptico, el periodo queda fijado tal y como muestra la Tabla 12. En la Figura 41 se muestra de forma detallada la descripción y el uso de los espaciados.

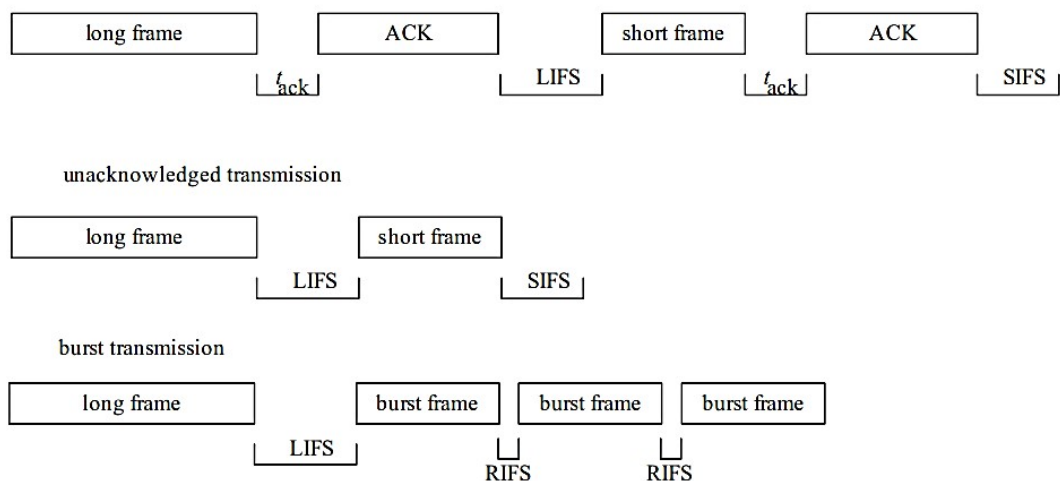


Figura 41: Uso de LIFS, SIFS y RIFS.

PHY	Periodo LIFS	Periodo SIFS	Periodo RIFS	Unidades
PHY I	400	120	40	Reloj óptico
PHY II	400	120	40	Reloj óptico
PHY III	400	120	40	Reloj óptico

Tabla 12: Periodos mínimos LIFS, SIFS, RIFS.

2.6.5 Tiempo de respuesta Emisor-Receptor, Receptor-Emisor.

El tiempo de respuesta para los binomios Emisor- Receptor y Receptor-Emisor se muestra en la Tabla 13.

Constante	Descripción	Valor
aMaxPHYFrameSize	El tamaño máximo de PSDU en octetos que la PHY dese ser capaz de recibir	1023 para PHY I 65535 para PHI II, III
aTurnaroundTime-TX-RX	Tiempo máximo de respuesta Emisor-Receptor	Ciclos de reloj óptico cero
aTurnaroundTime-RX-TX	Tiempo máximo de respuesta Receptor-Emisor	PHYI: ≤ 240 ciclos de reloj óptico PHYII, III: ≤ 5120 ciclos de reloj óptico
aPreambleFrequency (aPF)	La frecuencia del preámbulo	2.2 KHz
aFrequencyLabelingRatio (aFLR)	Relación de frecuencias del etiquetado.	1.5

Tabla 13: Constantes PHY.

2.6.6 Tolerancia de la frecuencia de datos de transmisión

En este caso la tolerancia tendrá unos límites máximos de $\pm 20 \text{ ppm}$.

2.6.7 Indicador de la calidad de la longitud de onda (WQI)

2.6.7.1 Soporte WQI para OOK y VPPM

El parámetro WQI (*Wavelength Quality Indicator*) es una caracterización de la fuerza y/o la calidad de una trama recibida. Se puede implementar usando la detección de energía (ED, *Energy Detection*), una estimación de la señal ruido o mediante la combinación de ambos métodos. La medición WQI debe realizarse para trama recibida, y el resultado se notifica a la subcapa MAC usando la PD-DATA como un elemento que va desde 0x00 a 0xff.

2.6.7.2 Soporte a WQI CSK

Un dispositivo será capaz de estimar la calidad del enlace del canal de color recibido, donde la calidad del color se define como una estimación de la relación señal-ruido (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) disponible después de la recuperación de la señal de reloj y datos (CDR, *Clock and Data Recovery*) e incluirá todas las pérdidas de implementación asociadas con la particular arquitectura del receptor (ruido de cuantificación, canal errores de estimación, etc.). Todos los valores estimados, cuando se miden en condiciones estáticas de canal, serán monótonamente crecientes con la intensidad de la señal en todo el rango de informes. Se debe tener en cuenta que las estimaciones pueden mostrar un comportamiento de saturación en los valores más altos que el necesario para el funcionamiento a más alta velocidad. Por último, las estimaciones de la calidad del enlace se efectuarán sobre una base de trama a trama.

2.6.8 Valoración del canal limpio (CCA, *Clear Channel Assessment*)

El estándar puede proporcionar la capacidad de realizar CCA según al menos una de los tres métodos siguientes:

- 1 Modo CCA 1: Energía por encima del umbral. CCA puede informar de un medio ocupado al detectar cualquier energía por encima de la energía umbral.
- 2 Modo CCA 2: Detección de portadora única. CCA puede informar de un medio ocupado solamente en la detección de una señal con las características de modulación del estándar. Esta señal puede estar por encima o por debajo de la energía umbral.
- 3 Modo CCA 3: Detección de portadora con la energía por encima del umbral. CCA puede informar de un medio ocupado solamente en la detección de una señal con las características de modulación de IEEE 802.15.7 con energía por encima de la energía umbral.

2.7 Acceso multiusuario en lifi

Al igual que la tecnología de banda ancha inalámbrica, lifi puede proporcionar acceso simultáneo a la red a múltiples usuarios. Una de las tecnologías más usuales es el acceso múltiple por división de espacio óptico (SDMA, *Space Division Multiple Access*) [97] el cual se ha llevado a cabo mediante un transmisor de diversidad angular. Ésta técnica puede mejorar más de 10 veces el rendimiento de la red en comparación con el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) [98]. Sin embargo, esta mejora en el rendimiento requiere un cuidadoso diseño del transmisor de diversidad angular y de los algoritmos de agrupamiento de usuarios los cuales tienen un alto consumo al basarse en los algoritmos de búsqueda exhaustiva. La OFDM proporciona un método sencillo para el acceso multiusuario. Sin embargo, a diferencia de los sistemas de RF, no

existe un rápido desvanecimiento en sistemas lifi y el canal inalámbrico óptico interior muestra la característica similar a la respuesta de frecuencia de un filtro paso baja. Por lo tanto, subportadoras con frecuencias más bajas en general, proporcionan a los usuarios estadísticas de alta SNR. Según lo explicado, es importante en OFDMA utilizar técnicas de programación apropiadas para garantizar que la equidad en la asignación de recursos (subportadoras) se mantiene.

Con el fin de mejorar el rendimiento de los usuarios en el borde de la celda, Saito en 2013 propuso el uso del acceso múltiple no ortogonal (NOMA, *Nonorthogonal Multiple Access*) [99] para sistemas de comunicación [100]. En 2015 Marshoud propuso usar esta técnica en VLC para mejorar el rendimiento del enlace en un sistema VLC [101]. En la literatura se pueden encontrar diferentes esquemas de NOMA. Por ejemplo la multiplexación en el dominio de potencia [102]. En este esquema, la cancelación de interferencia sucesiva (SIC, *Successive Interference Cancellation*) se utiliza en el lado del receptor para cancelar la interferencia entre usuario.

2.8 Arquitectura Utilizada

Para realizar el proyecto se barajaron distintos tipos de arquitecturas, por economía del proyector y versatilidad de la arquitectura, el consorcio se decanta por el SoC. Como se vera en los siguientes apartados de forma más detallada, este tipo de arquitectura dará la posibilidad de interconectar HW externo al HW y SW desarrollado para el proyecto.

2.8.1 Definicion System on Chip (SoC)

System-on-a-chip o **SoC** (sistema en chip, también referido como *System-on-chip*), describe la tendencia cada vez más frecuente de usar tecnologías de fabricación que integran todos o gran parte de los módulos que componen un computador, o cualquier otro sistema informático o electrónico, en un único circuito integrado o chip. Así pues, se trata de la “unión” de distintos módulos hardware formando un pequeño ordenador. El diseño de estos sistemas puede estar basado en circuitos de señal digital, señal analógica, o incluso de señal mixta (tanto analógica como digital), y a menudo módulos o sistemas de radiofrecuencia (módulos de comunicación inalámbrica: Wi-Fi, Bluetooth, y otros). Un ámbito común de aplicación de la tecnología SoC son los sistemas embebidos.

La diferencia principal de un SoC con un microcontrolador tradicional es la capacidad de procesamiento y de memoria. Mientras que los microcontroladores son estructuras microchip en su mayoría, que rara vez disponen de más de 100 kilobytes de memoria RAM (de hecho, lo más frecuente es que las memorias, tanto la RAM como la flash, de un microcontrolador consten de unos pocos kilobytes), el término SoC es usado para procesadores más potentes y de arquitectura más compleja que dependen de chips o módulos de memoria externos para ser eficaces. La tendencia actual en el desarrollo de sistemas SoC es incluir un multiprocesador, módulos de memoria (RAM, ROM, EEPROM...), osciladores, PLL (Phase Locked Loops), controladores de comunicación, y conversores ADC/DAC.

Dentro de los SoC destacan los **PSoC** o (*Programmable System-on-chip*). Esta tecnología de microcontrolador, inicialmente creada por Cypress Semiconductor en 2002 y actualmente comercializada por diferentes fabricantes, incorpora todo un sistema configurable dentro de un único chip. Así, a diferencia de los SoC en los que únicamente se utilizan las funcionalidades inicialmente implementadas, en los PSoC se puede asignar cualquier función a cualquier terminal del circuito integrado, lo que confiere una gran versatilidad al dispositivo. Para ello, un PSoC comprende una matriz configurable de funciones analógicas solapada con otra de funciones digitales, pudiendo configurarse cada uno de los bloques, tanto analógicos como digitales, así como programar la interconexión entre cada uno de los bloques y el enrutamiento de las señales.

2.8.2 Diseño del sistema

El SoC propuesto en el proyecto, tal y como se observa en la Figura 42 para el transmisorlifi y en la Figura 43 para el receptor, está integrado principalmente por una FPGA con la cual podemos programar el hardware específico de transmisión y recepciónlifi, y un microprocesador ARM formando una CPU lo bastante potente para poder a llegar a hacer un tratamiento de la señal en tiempo real, y en el que se instalará la lógica de comunicaciones y el entramado/desentramado de los datos.

La implementación se he realizado sobre un dispositivo programable que incorpora un microprocesador y diferentes módulos HW programables (PSoC). En concreto, se ha utilizado la utilización el dispositivo Zynq 7000 de Xilinx¹⁹, figura 22. Este dispositivos integra la capacidad de programación SW de un microprocesador con la capacidad de programación HW de una FPGA, permitiendo añadir los periféricos y elementos de aceleración necesarios para adaptar el dispositivo a cualquier aplicación a un bajo coste y con tiempos relativamente cortos de implementación.

En los siguientes subapartados se hará una breve descripción del ARM que se ha utilizado y de los diferentes bloques lógicos programados en la FPGA, tanto para el emisor como para el receptor.

2.8.3 ARM

ARM (*Advanced RISC Machine*) es una arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer), inicialmente de 32 bits y recientemente también de 64 bits, desarrollada por la empresa británica ARM Holdings. Concebida originalmente para su uso en ordenadores personales, su enfoque de diseño basado en RISC hace que los procesadores ARM precisen de una cantidad menor de transistores que los procesadores x86 CISC típicos en la mayoría de ordenadores personales, provocando una reducción de costes, calor y energía, convirtiéndolos en microprocesadores ideales para aplicaciones de baja potencia. Como resultado, ARM se ha convertido en la tecnología dominante en el mercado de la electrónica móvil e integrada.

Dentro de la familia ARM, uno de los microcontroladores más populares es el ARM Cortex-A9²⁰. Este ARM implementa la arquitectura ARMv7-A, ampliamente soportada y caracterizada por su alta eficiencia, con una gran potencia de cálculo y un bajo consumo de energía. Además, su versatilidad y escalabilidad, al poder ser configurado para trabajar con un solo núcleo o con cuatro núcleos en paralelo, hacen de este microcontrolador uno de los preferidos (de manera directa o licenciada) por multitud de los principales fabricantes de dispositivos móviles como Samsung, Apple para sus smartphones o Sony para su PlayStation Vita entre otros.

La placa electrónica PSoC utilizada en este proyecto lleva integrada un ARM Cortex-A9 y se encargará de la parte SW del protocolo de comunicaciones. La lógica de comunicaciones de la capa MAC del sistema, así como el entramado y desentramado de los flujos de datos, será instalada en el ARM. Para facilitar esta integración, todo el código ha sido desarrollado en el lenguaje de programación C y adaptado a las peculiaridades de este tipo de microcontroladores en cuestión de entradas y salidas, asignación de memoria y eficiencia de recursos.

2.8.4 FPGA

Una **FPGA** (*Field Programmable Gate Array*) es un dispositivo programable que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada mediante un lenguaje de descripción especializado. La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas

19 <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000.html>

20 <https://www.arm.com/products/processors/cortex-a/cortex-a9.php>

como las llevadas a cabo por una puerta lógica, o un sistema combinacional, hasta circuitos mucho más complejos.

Las FPGAs son más lentas y tienen un mayor consumo que los circuitos ASICs específicamente creados para una aplicación determinada, y no pueden abarcar sistemas tan complejos, ofreciendo siempre soluciones menos eficientes para el mismo problema. Sin embargo, las FPGAs tienen la enorme ventaja de ser reprogramables y sus costes de desarrollo y compra son mucho menores para pequeñas cantidades, así como el tiempo de desarrollo. Su uso es tan amplio que existen numerosos entornos de desarrollo para el diseño e implementación de sistemas sobre FPGAs. Un diseño puede ser realizado a partir de un esquema o haciendo uso de un lenguaje de programación de hardware o HDL (Hardware Description Language)

Por todas las características antes mencionadas las FPGAs son ideales para la realización de prototipos como el que se propone en este proyecto. Concretamente, la FPGA se encargará de realizar la (de)modulación y la (de)codificación en línea de la capa PHY del estándar IEEE 802.15.7 [1].

La Figura 42 muestra el diagrama de bloques de los diferentes componentes que se implementarán en el transmisor lifi.

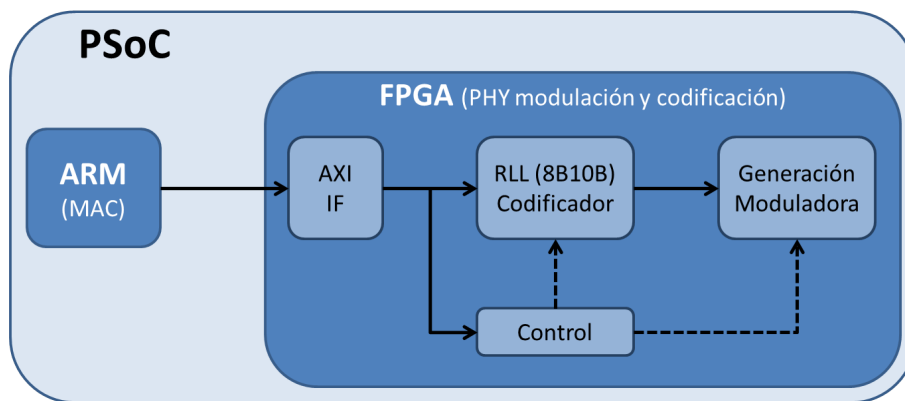


Figura 42: Diagrama de bloques PSoc Tx LiFi

Estos bloques son los siguientes:

- **Interfaz con el microprocesador ARM (bus AXI).** Se prevén dos interfaces, uno para la transmisión de datos y otro para el intercambio de señales de control con el bloque encargado de la gestión del proceso completo de transmisión.
- **Codificador RLL.** Se encargará de realizar la codificación de línea implementando el código utilizado 8b10b de acuerdo con las especificaciones del estándar.
- **Generación de la señal moduladora (digital).** La modulación se deberá hacer externamente en el driver LED, dado que el PSoc no puede generar una señal analógica. No obstante, la modulación OOK es muy sencilla a partir la señal moduladora proporcionada por el PSoc.
- **Bloque de control.** Es el encargado de coordinar el funcionamiento de los diferentes componentes que forman parte de la FPGA, manteniendo la sincronización entre ellos y garantizando tanto la integridad de los datos como el correcto flujo de ellos. El intercambio de señales de control con el microprocesador se ajustará a las especificaciones de servicios PHY contemplados en el estándar.

En cuanto al receptor, el diagrama de bloques es muy similar, como se puede observar en la Figura 43.

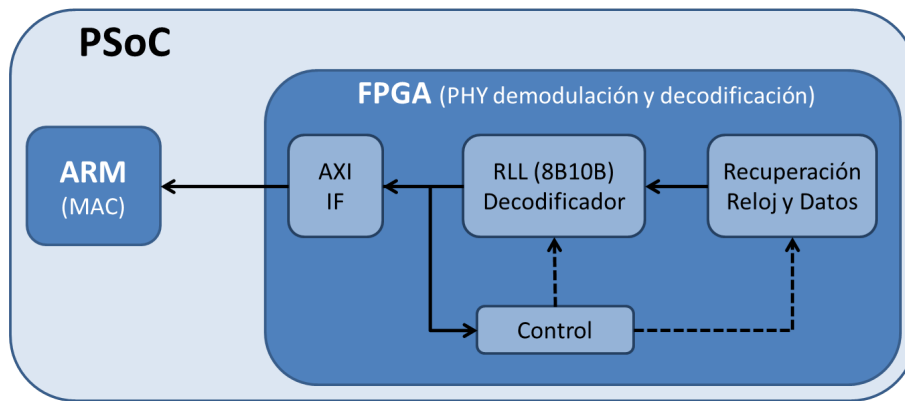


Figura 43: Diagrama de bloques PSoC Rx LiFi

En este caso, el módulo receptor consta de los siguientes bloques:

- **Recuperación de reloj y datos (CDR).** Encargado de obtener la señal de reloj y de los datos a partir de una señal digital de características compatibles con el PSoC. Para ello se realizará previamente, fuera de la PSoC, la detección de portadora y el paso al dominio digital en el CAD (Convertor Analógico Digital). La recuperación del reloj y de los datos se basará en el preámbulo, aunque dado el tamaño del PSDU (ver apartado 4.6.1.1) se considerará un ajuste dinámico de la fase del oscilador.
- **Decodificador RLL.** Realizará la decodificación de la trama de datos recibida según el código 8b10b, de acuerdo con las especificaciones.
- **Interfaz con el microprocesador ARM (bus AXI).** Al igual que en el caso del transmisor, se prevén dos interfaces, uno para la transmisión de datos y otro para el intercambio de señales de control.
- **Bloque de control.** Con funcionalidades semejantes a las expuestas para el transmisor.

Por último, tanto para transmisor como receptor, los datos recibidos/transmitidos se almacenarán temporalmente en una memoria FIFO (first in first out) que permita la recepción/transmisión en modo *streaming*.

3 Diseño de los códigos de comunicaciones

En informática y telecomunicación, un protocolo de comunicaciones se define como un sistema de reglas que permiten que dos o más entidades de un sistema de comunicación se comuniquen entre ellas para transmitir información por medio de cualquier tipo de variación de una magnitud física. Se trata de las reglas o el estándar que define la sintaxis, semántica y sincronización de la comunicación, así como también los posibles métodos de recuperación de errores. Los protocolos de alto nivel definen como se comunican las aplicaciones, mientras que las de bajo nivel definen como se transmiten las señales por el cable. Los protocolos pueden ser implementados por hardware, por software, o por una combinación de ambos.

El modelo OSI (*Open System Interconnection*), mostrado en la Figura 44, es el principal modelo de arquitectura para redes de comunicación. En él se describe cómo los datos y la información de la red se comunican desde una aplicación presente en un dispositivo informático a través de los medios de la red. Cada capa es responsable de una parte de la comunicación y ofrece servicios a las capas superiores. La interfaz entre las capas sirve para definir los enlaces lógicos.



Figura 44: Modelo OSI

Sobre este modelo se construyen los diferentes protocolos de comunicaciones existentes en la actualidad. Éstos se pueden dividir en dos grupos:

- **Orientados a conexión:** Tienen como objetivo asegurar la llegada de todos los datos enviados por el emisor, estableciendo para ello una conexión entre emisor y receptor. Para poder realizar esta comunicación, y tener abierta la conexión, debe hacer un paso previo denominado “Handshake”, en el que el emisor manda un paquete solicitando al receptor un canal de comunicación ya que tiene información que enviarle. A su vez, el receptor debe mandar una confirmación, o ACK, de ese paquete e indicar si puede o no abrir el canal de comunicación con el emisor. Por último el emisor mandará al receptor confirmación de este último paquete referido a la apertura o no del canal de comunicación. El proceso completo lo podemos ver en la Figura 45.

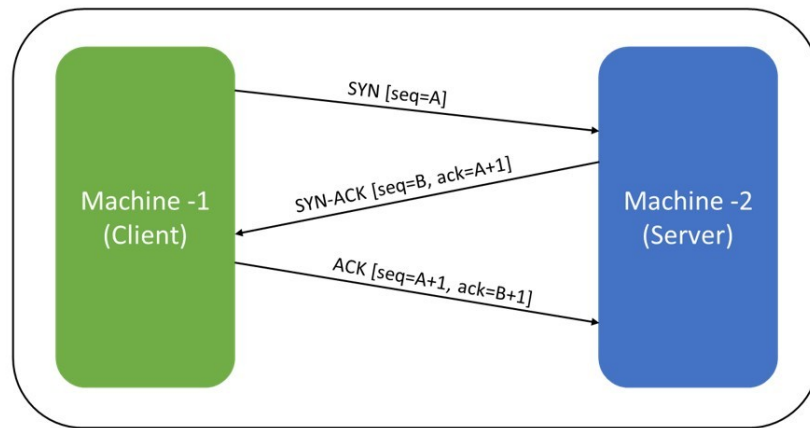


Figura 45: Proceso de “Handshake” en protocolos orientados a conexión

Después de este paso, y siempre que el receptor haya aprobado la conexión, se comenzará con el envío de datos. El receptor debe mandar confirmación de cada dato recibido para que el emisor tenga constancia de ello. Además, si por cualquier motivo algún paquete no llegara a su destino, el emisor no recibirá el ACK correspondiente, por lo que procederá al reenvío del paquete correspondiente para cerciorarse de que llega a su destino.

- **No orientados a conexión:** Los protocolos sin conexión no establecen una conexión dedicada de extremo a extremo. La comunicación se logra mediante la transmisión de información (mensajes) en la dirección de la fuente al destino, sin la verificación previa de la disponibilidad o, en general, del estado del receptor. Estos protocolos utilizan un modelo de transmisión simple con un mínimo de mecanismos asociados. No tienen diálogos de toma de contacto, y por lo tanto no exponen al programa o a la aplicación de usuario a ninguna posible falta de fiabilidad del protocolo de red subyacente. Como la transmisión se produce normalmente sobre medios que pueden perder paquetes, no hay garantía de entrega de los paquetes de datos, normalmente llamados *datagramas*, o de la recepción en orden de los mismos. Para dotar de cierta seguridad, estos protocolos proporcionan sumas de comprobación de la integridad de los datos y números de puerto específicos para diferentes funciones en el origen y el destino de los datagramas.

Los principales ejemplos de ambos grupos son *Transmission Control Protocol (TCP)* como protocolo orientado a conexión, y *User Datagram Protocol (UDP)* como protocolo no orientado a conexión. La Figura 46 muestra el modelo de capas de ambos protocolos comparado con el modelo OSI. Tal y como se puede observar, ambos protocolos se centran en la capa, o nivel, de transporte siendo tarea del diseñador del sistema el elegir el protocolo o los protocolos de otros niveles que mejor se adapten a las necesidades del dominio de aplicación para el cual se esté desarrollando el sistema. El principal protocolo de nivel de red es IP y generalmente se suelen considerar los binomios TCP/IP y UDP/IP (más comúnmente UDP a secas) como principales exponentes de protocolos orientado a conexión y no orientados a conexión respectivamente.

La elección final de uno u otro binomio de protocolos de transporte y red depende de la aplicación final buscada, que además condicionará los protocolos a utilizar en el resto de los niveles de la pila: niveles de aplicación, de enlace de datos y físico. Así, TCP/IP es idóneo para aplicaciones sensibles a pérdidas y que requieran que todos los paquetes de datos lleguen al destino, preservando además el orden en que fueron enviados. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones es la navegación por Internet o la descarga de archivos desde un servidor. Por contra, UDP está pensado para que los datos lleguen de forma rápida, a costa de asumir posibles pérdidas de datos en el camino. El más claro ejemplo de aplicación es el *streaming* de contenido audiovisual en tiempo real.

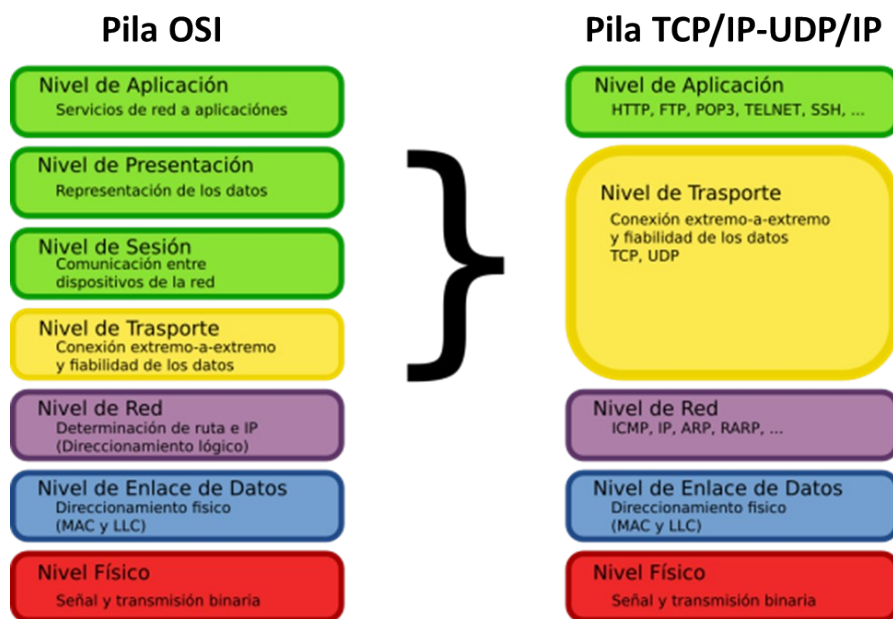


Figura 46: Pila OSI vs Pila TCP/IP-UDP/IP

Tal y cómo se ha introducido a lo largo de este documento, la aplicación principal del sistema lifi a desarrollar es la provisión de una selección de vídeos, series y películas en medios de transporte para su visualización en los dispositivos de los usuarios. Existen diferentes alternativas para realizar el *streaming* de vídeo, y la elección de una u otra familia de protocolos vendrá determinada por la opción elegida, pudiendo encontrarse implementaciones de libre distribución y ampliamente utilizadas tanto de TCP/IP y UDP como de los protocolos de nivel de aplicación. Por el contrario, y debido a la ‘juventud’ de los sistemas lifi, no existen desarrollos disponibles de protocolos para los niveles de datos (MAC) y físico (PHY) para la interconexión entre dispositivos lifi y se requiere una implementación nueva y específica, que seguirá las directrices recogidas en el estándar IEEE 802.15.7 [35] para comunicaciones por luz visible.

Una vez exista un estándar de comunicación lifi establecido por el IEEE se abrirá un abanico de posibilidades. Tanto a nivel industrial como a nivel domestico el lifi pudiendo ser un antes y un después en la historia de las comunicaciones.

3.1 Aplicaciones de lifi

En general, las aplicaciones de lifi son infinitas. Se podría decir que su ámbito de aplicación es prácticamente cualquier lugar interior o exterior donde se requiera una red de datos. A lo largo de este apartado presentaremos algunas de ellas de manera más o menos extensa dependiendo del estado de su desarrollo.

3.1.1 Redes de comunicaciones en interior

Una de las principales aplicaciones directas de lifi es su aplicación en ambientes interiores aprovechando el sistema de iluminación tal y como muestra la Figura 47. Dado que esta es la aplicación sobre la que se ha sustentado la memoria no daremos más detalles.

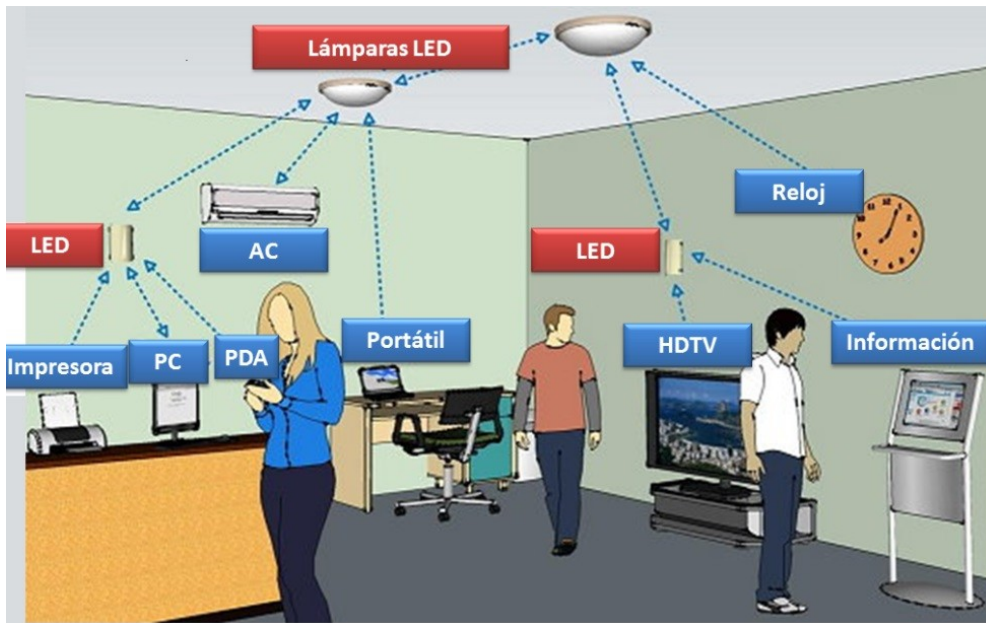


Figura 47: Ejemplo de sistema lifi para interiores.

3.1.2 Salud

Dentro de los recintos sanitarios existen estancias donde las comunicaciones por radiofrecuencias están limitadas o prohibidas. Por ejemplo, en los quirófanos estas comunicaciones están prohibidas ya que podrían causar interferencias con los equipos de seguimiento y control del paciente. La utilización de lifi supera estos inconvenientes pudiendo incluso automatizar procedimientos remotos y consultas. Por ejemplo, Tan [110] propuso en 2014 un sistema de vigilancia sanitario móvil mediante VLC. En él, la información de interés como las señales biomédicas y la información del paciente se transmiten a través de la iluminación LED del sistema. Como receptor se desarrolló un pequeño módulo portátil para proporcionar un completo entorno de monitorización. Mediante un único canal de VLC se transmiten de forma simultánea el electrocardiograma (ECG), la señal de fotopleletismografía (PPG) y la información HL7²¹ (*Health Level Seven*) [111]. En este sistema el tamaño del paquete de datos se diseña de tal forma que se pueda transmitir información con una tasa de error mínima. En la Figura 48 podemos ver el esquema del sistema propuesto donde mediante una tableta y una aplicación diseñada para tal propósito, se puede realizar el seguimiento y evaluación de parámetros biomédicos, como por ejemplo, la frecuencia cardíaca y la presión arterial en tiempo real y de forma simultánea.

21 Conjunto de estándares para facilitar el intercambio electrónico de información clínica.

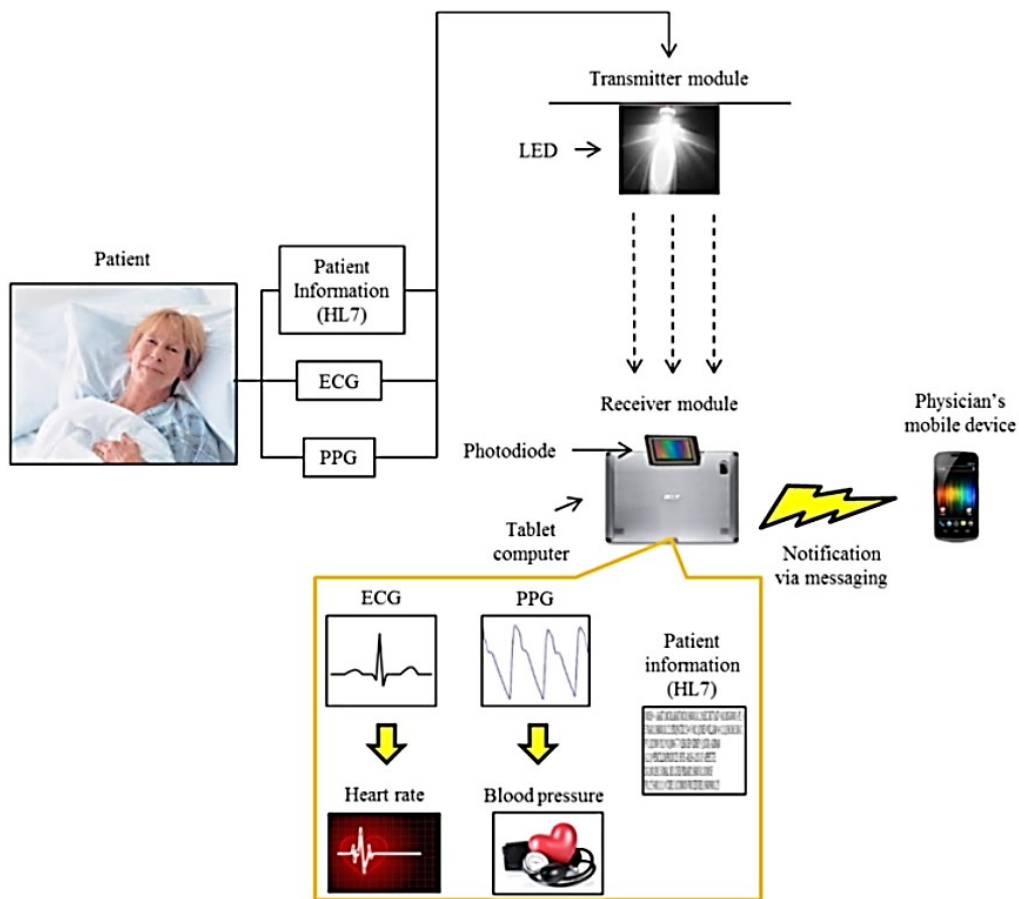


Figura 48: Sistema propuesto en [110] usando VLC.

3.1.3 Transporte público

En la mayoría de los vehículos destinados al transporte de pasajeros, se posibilita el ocio del usuario mediante el despliegue de iluminación interior y otros sistemas de entretenimiento. Lifi se puede apoyar en ellos e integrar junto con los propios dispositivos móviles de los usuarios tal y como muestra la Figura 49.



Figura 49: Ejemplo de implementación de lifi en una cabina de pasajeros.

En el caso concreto del transporte aéreo donde las RF están limitadas, puede contribuir a la

reducción del peso y el cableado de la aeronave, así como a la flexibilidad en el diseño de las cabinas de pasajeros. Además, podría contribuir a la rebaja de costes de acceso a internet, así como la posibilidad del uso de la misma por parte de los pilotos sin posibles interferencias con los dispositivos de control. En la Figura 50 se muestra el esquema propuesto por el grupo del profesor Haas en 2011 [112]. El servicio se establece a través de una combinación de las comunicaciones cableadas, inalámbricas y satelitales. Las estaciones de base cableadas (BS) se unen con los equipos de iluminación basados en WLED (lámparas de lectura) para proporcionar a los pasajeros acceso a internet y servicios multimedia. La alimentación a través de ethernet (PoE, *Power over Ethernet*) se utiliza tanto para transportar el tráfico de datos como para proporcionar la energía a las BS y a las lámparas.

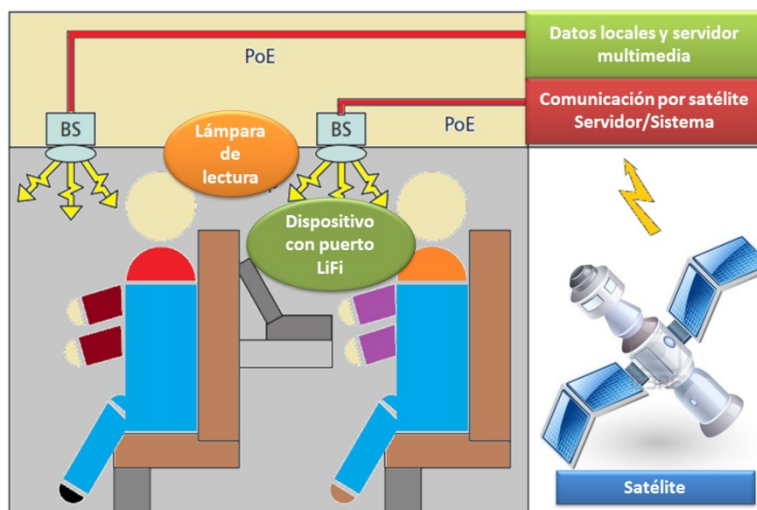


Figura 50: Esquema propuesto en [112] para el uso de LiFi en cabinas de pasajeros.

Sobre la base de esta aplicación, Park en 2012 propuso un esquema de cancelación de interferencias para comunicaciones VLC [113]. Éste se basa en la cancelación sucesiva de interferencias (SIC, *Successive Interference Cancellation*) y el rendimiento se evalúa en términos de la tasa de error binario (BER, *Bit Error Rate*). Ping en cambio, utiliza VLC para la transmisión y recepción de señales de audio de alta calidad dentro de aeronaves [114]. Más recientemente, Shen ha propuesto un sistema de red inalámbrico para cabinas [115].

3.1.4 Vías de circulación y vehículos

En las vías de circulación existen numerosas señales, paneles luminosos y alumbrado. Lifi se puede utilizar para establecer comunicación tanto con los usuarios de la vía pública ya sean motorizados o no como para posibilitar la comunicación entre dichos usuarios. Siguiendo esta línea de investigación se encuentra un grupo español de la Universidad Carlos III liderado por la profesora Ana García Armada. En uno de sus últimos trabajos propone usar como emisor las farolas presentes en las vías públicas y como receptor las cámaras presentes en los teléfonos móviles tal y como muestra la Figura 51 [116].

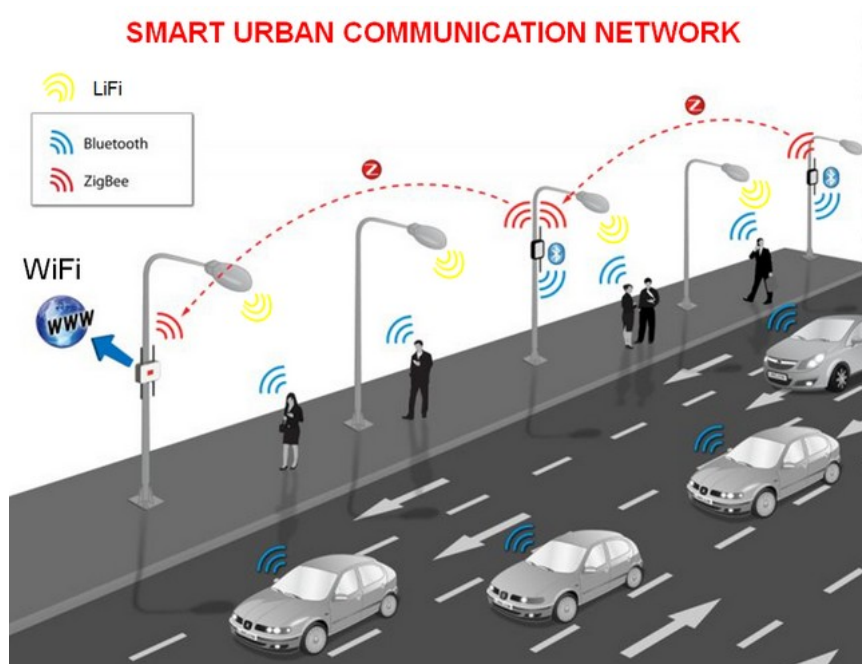


Figura 51: Red lifi propuesta en [116].

Por otro lado, dadas las ventajas de la iluminación LED, la mayoría de los vehículos presentes en el mercado actual utilizan en faros y luces de posición este tipo de iluminación. Por tanto, la transmisión de información entre vehículos también es posible [117]. Por ejemplo, en la Figura 52 se muestra un posible ejemplo de utilización [118].

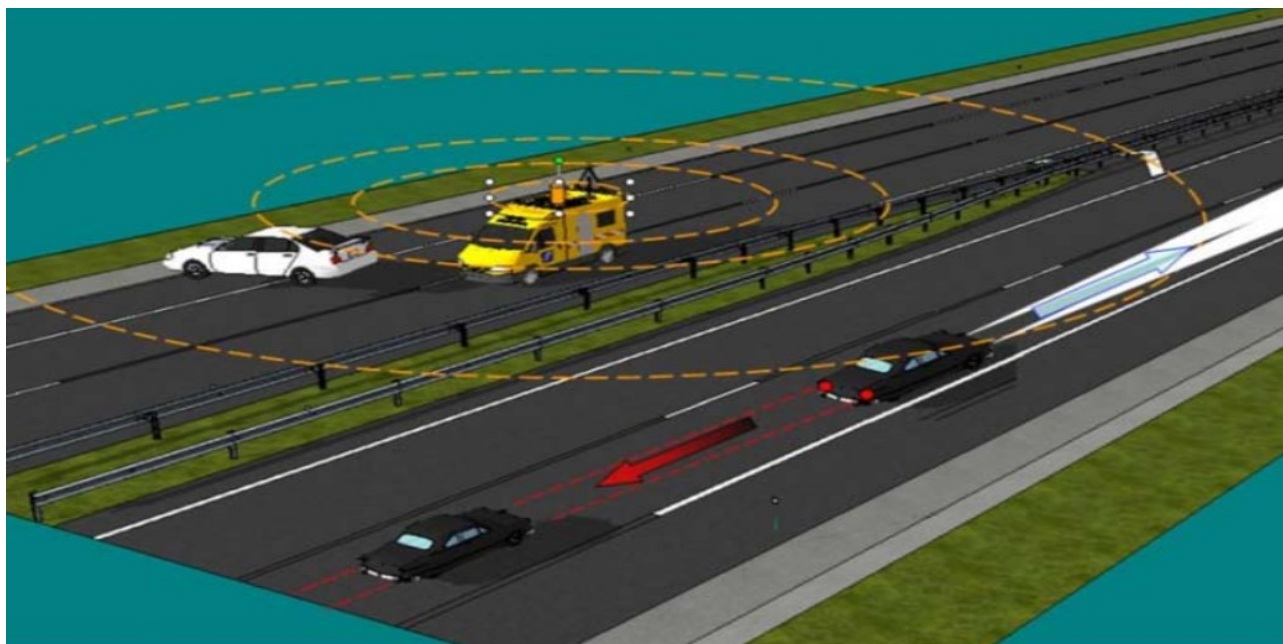


Figura 52: Uso de lifi en comunicaciones coche a coche.

En ella un vehículo ha tenido un accidente avisando a los servicios de emergencia. El coche de seguridad se sitúa junto al mismo y transmite la información a todos los vehículos situados alrededor suyo mediante faros, luces de posición y emergencia. Así mismo, los otros vehículos establecen comunicaciones entre ellos posibilitando el intercambio de información mecánica, de velocidad, etc. A este tipo de comunicación se la denomina coche a coche o C2C-VLC (*Car-to-Car-VLC*). En la Figura 53 se muestra un esquema de la comunicación establecida entre dos vehículos donde los faros traseros del primer coche actúan como emisor y el fotodiodo colocado en el segundo coche como receptor.

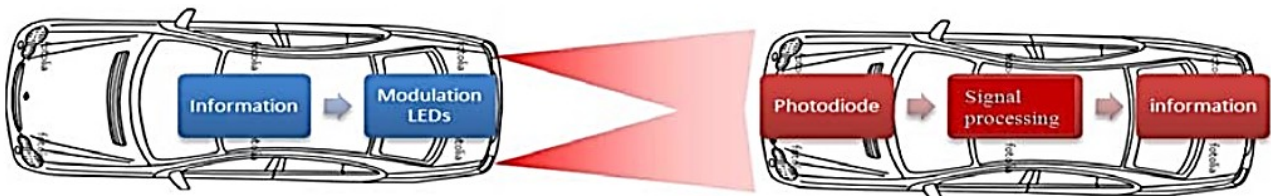


Figura 53: Comunicación C2C-VLC. [118].

Este tipo de comunicaciones posee ventajas específicas con las tecnologías de comunicaciones dedicadas de corto alcance DSRC (*Dedicated short-range communication*) basadas en RF [119]. Entre las principales se encuentran

- i) Baja complejidad y bajo coste especialmente en lugares donde, como hemos mencionado, cada vez se utiliza más la iluminación LED: vehículos, semáforos, iluminación vial [120].
- ii) Posicionamiento de alta precisión. Debido a las características de propagación de la luz, la incertidumbre en el posicionamiento se puede reducir a unas decenas de centímetros mejorando a las técnicas de RF [121], [122].
- iii) Alta escalabilidad y bajo nivel de interferencia [123]. A medida que aumenta la densidad de vehículos (por ejemplo en las horas punta), las tecnologías basadas en RF experimentan colisiones de paquetes no deseados así como retraso en la recepción [124] mientras que con VLC solamente reciben señal los vehículos vecinos reduciendo la congestión de la señal.

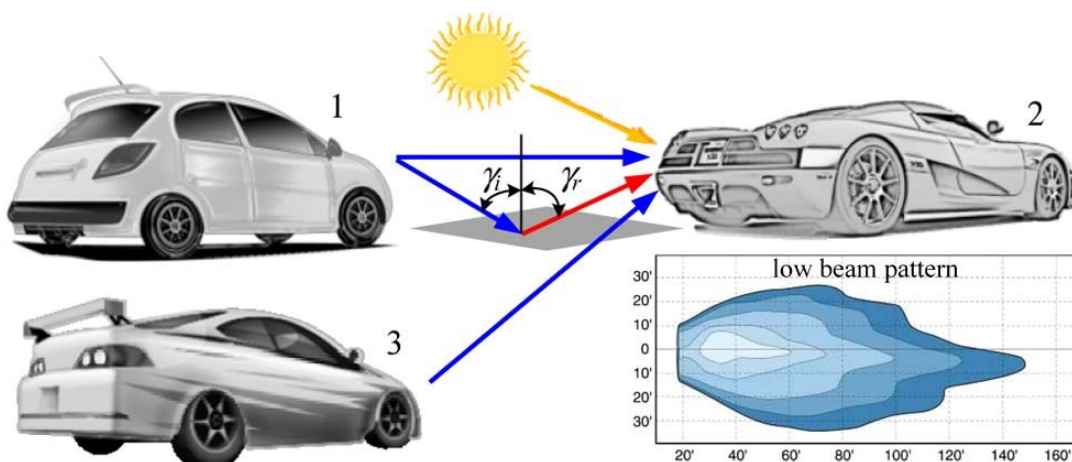


Figura 54: Sistema de comunicación C2C-VLC básico teniendo en cuenta la luz solar [127].

Existen en la literatura diferentes técnicas de comunicación C2C-VLC. Calilean propuso en 2012 un sistema de comunicación entre vehículos e infraestructuras viales con una cobertura de hasta 15 metros de distancia [118]. Yu combina las comunicaciones y el posicionamiento por luz visible para la mejora de la seguridad de vehículos al ser capaces de detectar riesgos potenciales con antelación ayudando al usuario a la prevención [125]. Luo en 2014 presentó un modelo matemático para este tipo de comunicación capaz de predecir el rendimiento del sistema bajo diferentes geometrías de comunicación [126]. Posteriormente el mismo Luo amplió su trabajo para tener en cuenta las condiciones de iluminación bajo luz solar [127], Figura 54.

3.1.5 Entornos sensibles a la radiofrecuencia

Las centrales eléctricas necesitan redes de datos lo más rápidas posible y conectadas entre sí de manera que la demanda, la integridad de la red y la temperatura de la central (en el caso de las centrales nucleares) puedan ser monitorizadas. Wifi y, en general, las radiofrecuencias están limitadas o prohibidas por normativa al igual que en plantas petroleras o de productos químicos. Lifi puede ofrecer conectividad segura y abundante para todas las áreas de lugares como los mostrados en la Figura 55. En ambas centrales las RF están prohibidas y se podría implantar lifi.



Figura 55: Central nuclear de Garoña y complejo de Repsol en Tarragona.

3.1.6 Gestión de desastres

Lifi se puede utilizar como un poderoso medio de comunicación en circunstancias muy adversas como huracanes o terremotos como el mostrado en la Figura 56. Las estaciones de metro, túneles, aparcamientos subterráneos, zonas muertas comunes para la mayoría de las comunicaciones de emergencia, no representan un obstáculo para la tecnología lifi.



Figura 56: Terremoto de Nepal. Fuente: El Confidencial.

3.1.7 Seguridad

Según un informe presentado por la compañía de antivirus McAfee en 2014, la ciberdelincuencia produjo pérdidas globales por valor de 445 billones de dólares²². Lifi ofrece una nueva y segura forma de intercambiar información. Lifi podría proporcionar una solución de confianza incrementado la seguridad en las empresas que buscan mejorar la protección de datos, en las organizaciones gubernamentales y de defensa, en el sector público, financiero, farmacéutico, o cualquier organización que disponga de información susceptible de ser sustraída. Las señales wifi se propagan en todas las direcciones y pasan a través de objetos opacos posibilitado su captación por dispositivos ajenos. Debido a que las señales de lifi viajan en haces direccionales entre un punto de acceso y un terminal o viceversa, un interceptor potencial tendría que estar en el espacio de superposición de ambos haces de luz para robar la información (Figura 57).

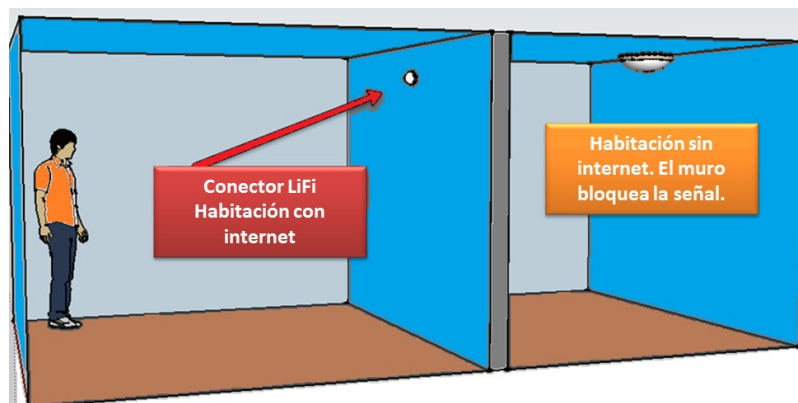


Figura 57: Lifi no traspasa muros lo que hace la transferencia de datos más segura.

22 <http://www.mcafee.com/us/resources/reports/rp-economic-impact-cybercrime2.pdf?clickid=10AXFdRSKVzF0mR3zT0c7UPTUkSRL8w9kxbqyg0&lqmcate=Affiliate:IR:null:74047:10078:10078:null&sharedid=>

3.1.8 Posicionamiento interior

Otra de las posibles aplicaciones que ya es una realidad es el posicionamiento en el interior de recintos. Por ejemplo, mediante los teléfonos inteligentes se puede utilizar para proporcionar la ubicación y así guiar a los usuarios dentro de grandes museos o centros comerciales. Otra posible aplicación es la detección de la ubicación de productos dentro de grandes almacenes donde el posicionamiento interior puede automatizar algunos de los procesos de gestión del inventario. Así mismo, si se implementan en dispositivos de consumo, se pueden utilizar para proporcionar servicios, consejos y anuncios basados en la localización de los usuarios. Para éstas y otras muchas aplicaciones, las empresas dedican grandes recursos e inversiones. Sin embargo, el posicionamiento interior es difícil de lograr mediante el sistema de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*) dado que las señales de radio procedentes de los satélites que orbitan en torno a la Tierra, no son capaces de penetrar los muros de los edificios o lo hacen con escasa calidad. Esto hace que el posicionamiento obtenido sea nulo o con demasiada incertidumbre. Para evitar esta situación, las alternativas más frecuentes son complementar los sistemas basados en el GPS con técnicas de RF olifi. En el caso de las RF, las técnicas convencionales son las redes inalámbricas locales, la identificación por radiofrecuencia, la banda ultra ancha, el bluetooth, etc. [134]–[137]. Estos métodos proporcionan precisiones en el posicionamiento de entre decenas de centímetros hasta metros [138]. Esta incertidumbre es excesiva para las aplicaciones que hemos mencionado. Además, la precisión puede empeorar debido a las posibles interferencias resultantes entre los diferentes sistemas. Por todas estas razones, una vez más, lifi se presenta como una buena solución. En la literatura podemos encontrar diferentes algoritmos para lograr un óptimo posicionamiento interior mediante sistemas VLC. Éstos se pueden dividir en tres categorías: triangulación, análisis de la escena y proximidad [139]–[142]. En la Ejemplo de sistema de posicionamiento lifi [140], se muestra un ejemplo de implementación.

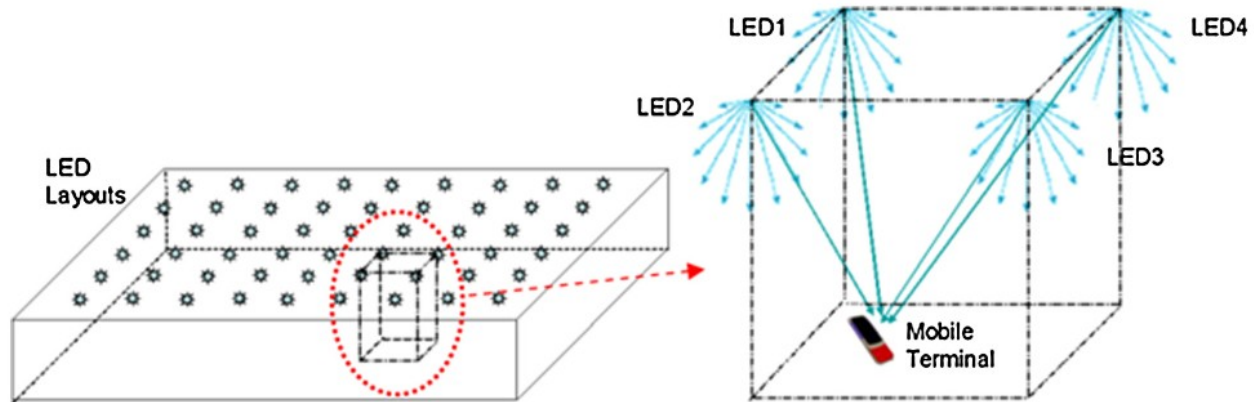


Figura 58: Ejemplo de sistema de posicionamiento lifi [140].

Con el término de triangulación se agrupan aquellas técnicas que utilizan las propiedades geométricas de los triángulos para la estimación de la posición. Éstas a su vez se dividen en técnicas de lateración y angulación. Los métodos de lateración estiman la ubicación mediante la medida de las distancias a múltiples puntos de referencia. En el caso particular de VLC, estos puntos son las fuentes luminosas y el objetivo es el receptor óptico. La distancia se mide indirectamente a través de la fuerza de la señal recibida (RSS, *Received Signal Strength*), el tiempo de llegada (TOA, *Time-Of-Arrival*) o de la diferencia en el tiempo de llegada (TDOA, *Time-Difference-Of-Arrival*). Los métodos basados en TOA requieren una completa sincronización entre los relojes del emisor y el receptor por lo que no se utilizan en VLC, aunque sí en GPS. Los métodos basados en TDOA requieren únicamente la sincronización entre transmisores y si es posible su utilización en VLC [141], [143]. La angulación consiste en medir los ángulos relativos en relación con varios puntos de

referencia denominados ángulos de llegada (AOA, *Angle Of Arrival*). La estimación en la localización se produce mediante la búsqueda de los puntos de intersección entre las líneas direccionales [144].

Dentro del grupo de algoritmos de análisis de la escena se engloban aquellos en los que la información de la medición se compara con una base de datos de calibraciones previas. Estos algoritmos tiene la desventaja de ser válidos para un entorno específico precalibrado impidiendo la configuración en tiempo real [145].

El método de proximidad es quizás el más simple en el sentido de que se basa en una cuadrícula de puntos de referencia, teniendo cada uno una posición bien conocida. Cuando un objetivo recoge la señal procedente de una única fuente, se considera para ser un emplazamiento junto con la fuente. Por lo tanto, la precisión se rige por la propia resolución de la red [142], [146].

Para finalizar, cabe destacar que ya hay empresas con dispositivos comerciales de posicionamiento lifi. Éste es el caso de Oledcomm. En la Figura 59 se muestra uno de sus dispositivos *GeoLiFi* llamando *LiFi Beacon* para almacenes. En este dispositivo el sensor lifi se encuentra situado en el casco del usuario posibilitando el posicionamiento en todo momento.

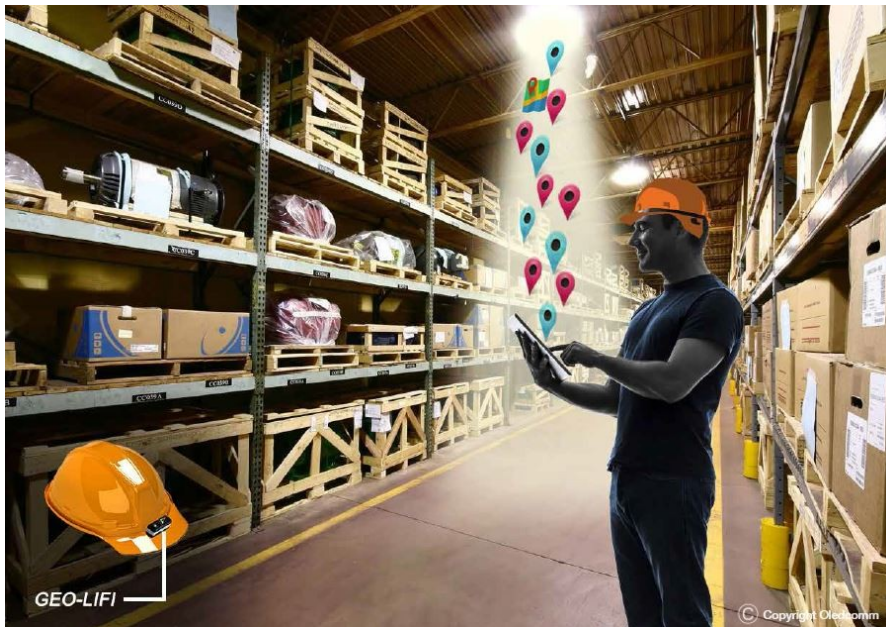


Figura 59: LiFi Beacon para almacenes. Fuente: Oledcomm.

3.1.9 Lifi solar

Dentro del grupo del profesor Haas se ha desarrollado recientemente un sistema lifi en el que se sustituye el fotodiodo receptor común por un panel fotovoltaico tal y como muestra la Figura 60. De esta forma se posibilita que el sistema pueda simultáneamente producir energía eléctrica mediante la recolección de luz solar a la vez que proporciona la transferencia de datos aprovechando la tecnología actual de paneles solares [147].



Figura 60: Sistema lifi solar [147].

Haas presentó el prototipo en el TED de 2015²³, Figura 61, donde mostraba que el dispositivo funcionaba perfectamente incluso en condiciones de luminosidad reducida.

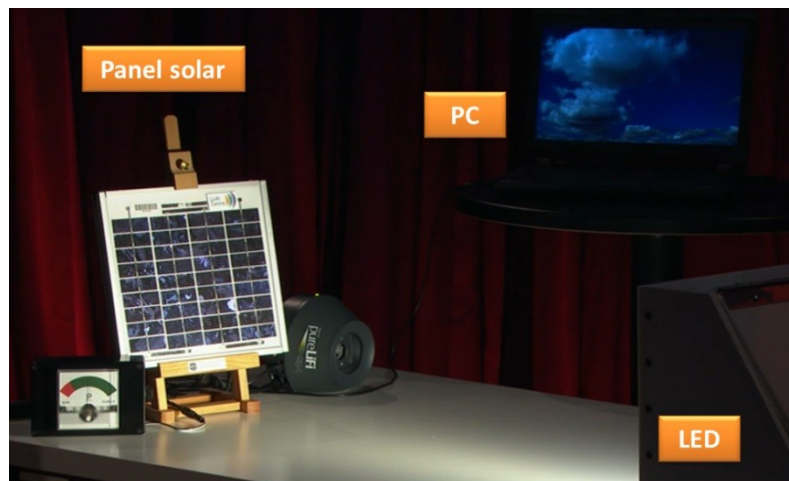


Figura 61: Prototipo de lifi solar presentado por Haas en el TED 2015.

En el mismo congreso, Haas presentó algunas de las posibles aplicaciones. Por ejemplo, los teléfonos móviles actuales sufren el inconveniente de un alto consumo de la batería. Si se incorporan a los mismos pequeños paneles solares se podría tener Internet mientras se recarga la batería tal y como muestra la Figura 62.

23 http://www.ted.com/talks/harald_haas_a_breakthrough_new_kind_of_wireless_internet

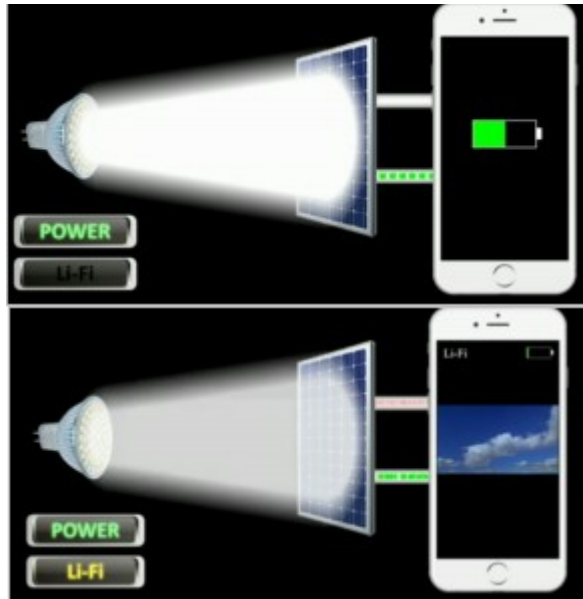


Figura 62: Sistema solar lifi en teléfonos móviles: carga de batería y transmisión de datos simultánea.

Otra de las posibles aplicaciones es el uso de lifi en coches eléctricos los cuales suelen tener los paneles solares en el techo posibilitando la recepción sin obstáculos intermedios.



Figura 63: : Los coches con paneles solares podrían soportar lifi.

Otra posible aplicación podría ser la comunicación entre lugares distantes aprovechando la infraestructura eficiente de los edificios, Figura 63.



Figura 64: Lifi solar aprovechando los paneles solares de edificios.

Finalmente, se podrían aprovechar los paneles solares instalados en la señalización vial tal y como muestra la Figura 65



Figura 65: Lifi solar en la señalización vial.

4 Implementación de los protocolos MAC y PHY

Una vez analizado todo el contexto e historia de los sistemas de comunicación VLC y lifi, habiendo realizado un análisis de la tecnología que se utilizara para su implementación queda por exponer la etapa de implementación, en que se ha basado esta etapa y los resultados obtenidos.

4.1 Introducción

A lo largo de los siguientes apartados se presentarán las diferentes secciones y conceptos definidos en el documento IEEE 802.15.7 [35], describiendo la implementación que de ellos se ha realizado en este proyecto. Se ha optado por realizar un desarrollo mixto, en el que la mayor parte de la funcionalidad recae en un módulo SW implementado en lenguaje C y particularizado para su ejecución sobre un microcontrolador de tipo ARM, pero desarrollando la codificación de línea (codificación RLL) y la modulación final de las señales a través de componentes HW. Esta doble configuración nos permite alcanzar un cuádruple objetivo:

- 1 Acelerar y facilitar el desarrollo de los protocolos de comunicaciones, independizando la modulación del resto de la implementación del estándar.
- 2 Reducir el tiempo de procesamiento y ejecución al adaptar el código de los protocolos de comunicaciones para su ejecución directa sobre un microcontrolador, definiendo directamente las entradas y salidas de datos del controlador y sus interconexiones con el resto de componentes HW del sistema lifi.
- 3 Aumentar la velocidad de procesamiento de la señal modulada, lo cual incrementará la tasa de transferencia máxima que nuestro sistema pueda alcanzar.
- 4 Mejorar la escalabilidad y adaptabilidad del sistema, facilitando posibles cambios en el sistema a fin de utilizar la mejor modulación o codificación de línea existente o futuras, permitiendo su adaptación a diferentes dominios de aplicación.

Así pues, la implementación de los protocolos de comunicación seguirá el paradigma para la definición por software de sistemas de transmisión por radio, SDR (Software Defined Radio), con la salvedad antes mencionada de la modulación y la codificación de línea. De esta manera, el desarrollo software no sólo se encargará de la creación de las diferentes tramas de datos de las capas MAC y PHY. También incluirá los servicios e interfaces entre capas definidos en el estándar, así como la gestión y control de las comunicaciones; incluyendo tanto la señalización entre capas como la regulación de la intensidad lumínica o gestión del oscurecimiento (*dimming*).

En los siguientes apartados de esta sección 4 describiremos el estándar y las particularizaciones realizadas por el consorcio para su implementación en lenguaje de programación C para su ejecución en un microcontrolador que será descrito, junto con el diseño HW de la modulación y la codificación en línea propuestos por el estándar.

4.2 Arquitectura

Tal y como se puede observar en la Figura 66, el estándar IEEE 802.15.7 se centra en las capas más bajas del modelo OSI y en las interacciones entre ellas, definiendo la **capa de control de acceso al medio** (MAC, *Medium Access Control*) y la **capa física** del estándar (PHY). La capa MAC se refiere a los servicios definidos por el estándar, mientras que la interfaz entre ésta y el medio inalámbrico viene definida por la capa PHY, con una tasa de transferencia capaz de soportar audio, video y multimedia. Las capas MAC y PHY son las mismas para emisor y receptor.

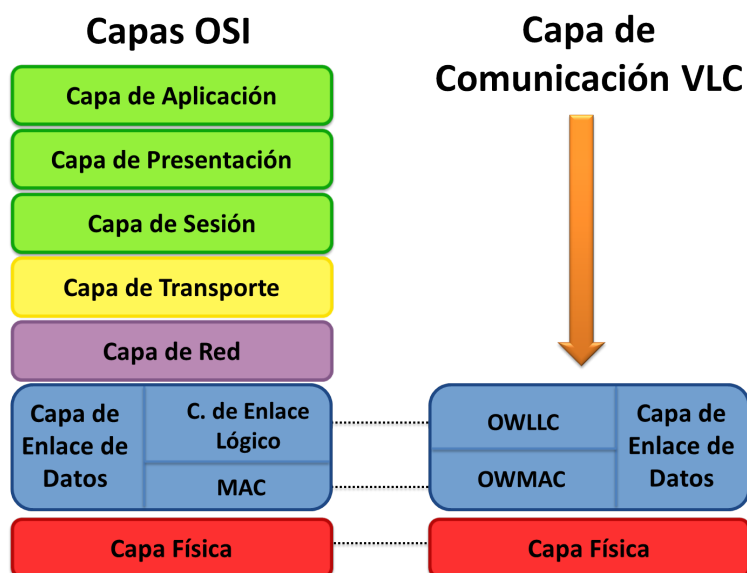


Figura 66: Capas de la pila de protocolo 802.15.7.

Particularizando el modelo OSI para el caso de un dispositivo lifi, tenemos una capa física que contiene el transceptor de luz junto con su mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa MAC que proporciona acceso al canal físico de todo tipo de transferencia tal y como se muestra en la representación gráfica de la Figura 67.

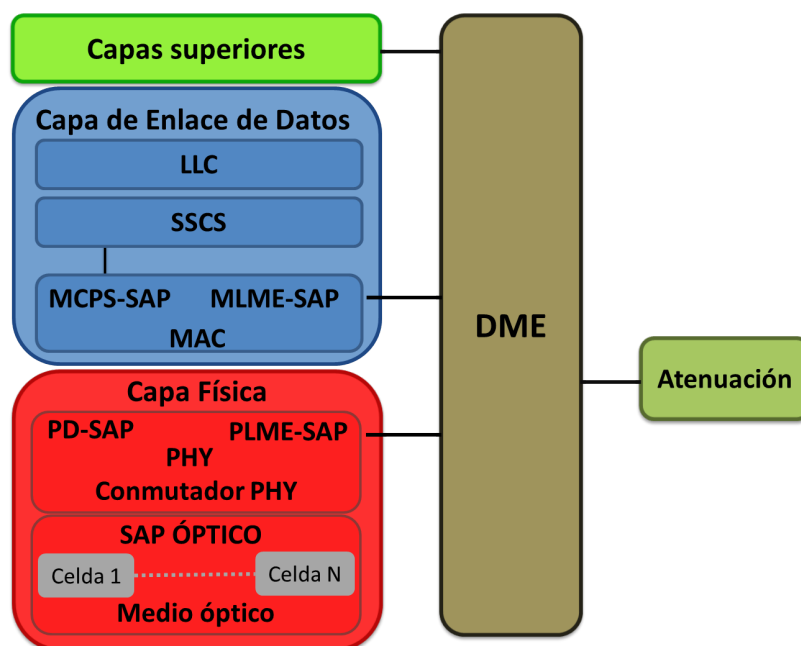


Figura 67: Modelo de referencia utilizado en el estándar para un dispositivo VPAN.

Además de las ya mencionadas capas MAC y PHY, el estándar especifica una serie de servicios e interfaces para la interconexión tanto entre la capa PHY y la MAC, como entre la capa MAC y las capas superiores: por la capa de control de enlace lógico (LLC, *Logical Link Control Layer*) se accede a la subcapa MAC a través de la subcapa de convergencia específica del servicio (SSCS, *Service-Specific Convergence Sublayer*). Sin embargo, la definición de estas subcapas superiores queda fuera del estándar.

En la Figura 67 también se muestra la presencia de una entidad de gestión de dispositivos (DME,

Device Management Entity). Ésta puede tener acceso a ciertos atributos de la entidad de gestión de la capa física y de la entidad de gestión del enlace de control de acceso al medio a fin de interconectar las capas MAC y PHY con un regulador de intensidad.

4.3 Topología de la red

El estándar IEEE 802.15.7 considera tres clases de dispositivos: Infraestructura, Móvil y Vehículo; cada uno con diferente rango de cobertura, velocidad de transferencia de datos, etc. Estos dispositivos operan en una de las tres topologías recogidas en dicho estándar que se muestran en la Figura 68: punto a punto (P2P, point to point), estrella (star) y broadcast. Para todas las topologías el estándar propone un apoyo a la visibilidad para mantener el nivel de iluminación en ausencia de comunicación, así como para mitigar un posible efecto de parpado debido al envío de luz pulsada.

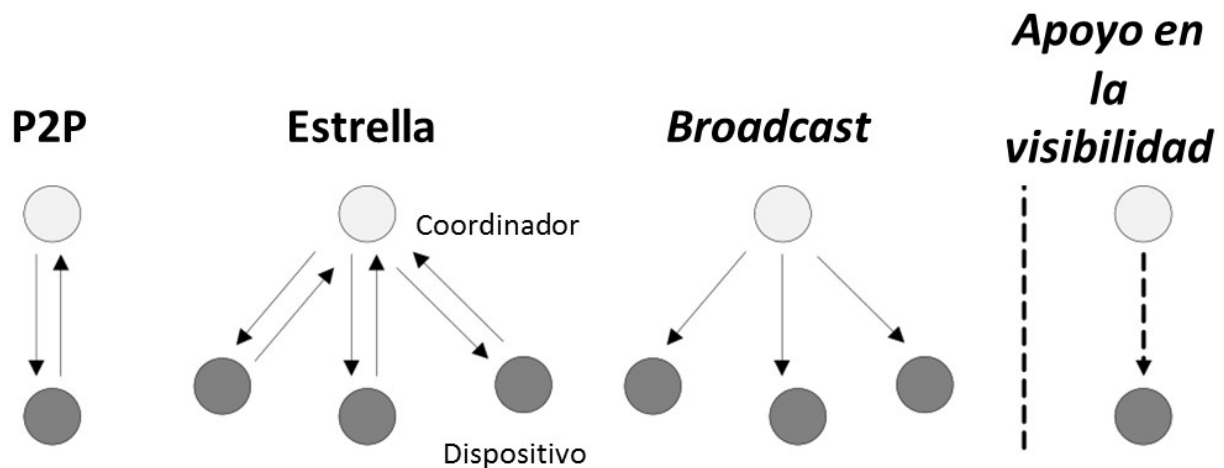


Figura 68: Topologías MAC para LiFi.

En el presente proyecto utilizaremos la topología **punto a punto**, donde cada dispositivo de usuario comunicará directamente con otro dispositivo que actuará como coordinador fijo. Este coordinador será la luminaria del vehículo y estará situado justo encima del dispositivo de usuario. Se establecerá una red única entre cada par de dispositivos.

Ésta será la configuración principal de nuestro sistema, aunque podría considerarse la posibilidad de utilizar una topología en **estrella** en la que se utilice un único controlador para cada par de asientos, según la configuración habitual de los asientos en medios de transporte público. Esta nueva topología implicaría una mayor complejidad por parte de la lógica de comunicaciones, para poder distinguir y filtrar flujos de diferentes dispositivos de usuario. Además, requeriría también un esfuerzo suplementario en el diseño del sistema de luminarias al no poder reutilizarse directamente las luminarias ya existentes. Por todo lo anterior, en una primera versión del sistema el consorcio trabajará sobre la primera hipótesis de topología, dejando la topología en estrella para una segunda versión una vez que se ha demostrado la viabilidad de la primera opción.

La topología **broadcast** podría ser también de utilidad en un entorno como el descrito en este proyecto, si bien se ha descartado en un principio pues el objetivo final es alcanzar un sistema de *streaming* de vídeo completo en el que el usuario final pueda controlar la reproducción del vídeo. Sin embargo, en caso de considerarse su utilidad sería sencilla su implementación al compartir funcionalidad con las topologías anteriores y además simplificar la configuración de las tramas (no se requiere dirección de destino ni lógica de control en la recepción de tramas por parte del usuario)

4.3.1 Modelo de transferencia de datos

Se definen en el estándar tres tipos o modos de transferencia de datos:

- iii) *Transferencia de datos desde un dispositivo al coordinador*: en nuestro sistema sería la transferencia de datos desde el dispositivo de usuario al coordinador para la selección del vídeo y para el control de la reproducción.
- iv) *Transferencia de datos desde el coordinador a un dispositivo*: en nuestro sistema sería la transferencia del *streaming* de vídeo hacia el dispositivo de usuario.
- v) *Transferencia de datos entre dos dispositivos emparejados*: este tipo de comunicación se da en topologías P2P en las que ambos dispositivos pueden actuar como coordinadores, por tanto no es de aplicación en nuestro sistema.

Los mecanismos para cada tipo de transferencia dependen de si la red soporta la transmisión de “balizas” (*beacons*) o no. Este tipo de marcadores se utiliza en redes en las que se requiere una alta sincronización o soporte para dispositivos con muy bajas latencias. Consideramos que nuestro sistema, al ser bidireccional pero marcadamente asimétrico, donde el flujo de datos principal será desde el coordinador al dispositivo de usuario, no será necesario el uso de estas “balizas”, simplificándose así la implementación del protocolo de comunicaciones de acuerdo al estándar. Consideramos que su uso podría introducir retardos en el streaming de vídeo, dificultando la reproducción en tiempo real.

Así, nuestro sistema utilizará una implementación ad-hoc con un sistema de sincronización propio, basado en el envío de mensajes de acuse de recibo (*acknowledgment*):

- Cuando un dispositivo de usuario quiere transmitir instrucciones de control de reproducción al coordinador lo hará directamente utilizando un acceso aleatorio no planificado²⁴ al canal de comunicación. El coordinador reconocerá la recepción de los datos enviando un mensaje ACK. Este acuse de recibo será enviado en el caso de que sea un mensaje de selección de vídeo a reproducir, así como para el resto de mensajes con comandos de control de reproducción (play, pause, stop...)
- Una vez que el usuario ha seleccionado un vídeo para su reproducción, el coordinador comenzará a enviar los paquetes de vídeo utilizando de nuevo un acceso aleatorio no planificado²⁵ al canal de comunicación. Al tratarse de una aplicación de *streaming* con descarga progresiva a través de un protocolo orientado a conexión, el coordinador esperará a recibir un acuse de recibo por parte del dispositivo de usuario para cada paquete antes de enviar el siguiente. Cabe mencionar que éste será un canal dedicado utilizado únicamente entre el coordinador y un dispositivo de usuario. El coordinador seguirá enviando paquetes de datos hasta que acabe la reproducción o hasta recibir un mensaje del usuario con algún comando de control de reproducción.

Para realizar cualquier transferencia de datos el estándar recoge cinco tipos de tramas, pensadas para reducir la complejidad a la vez que se asegura una protección frente a errores de transmisión en canales ruidosos:

- 1 *Trama de baliza (beacon frame)*: usada por el coordinador para enviar balizas para indicar a los diferentes dispositivos de usuario que tiene datos pendientes, y que por tanto pueden ser utilizadas por éstos para requerir el envío de esos datos. Estas tramas pueden agruparse para crear una supertrama configuradas por el coordinador para permitir a los dispositivos de usuario un acceso planificado al canal.
- 2 *Trama de datos (data frame)*: usada por el coordinador o por los dispositivos de usuario para

²⁴ Este acceso aleatorio es necesario en redes en las que tanto el emisor como el receptor comparten canal de comunicaciones. En nuestro sistema, al haber dos canales diferenciados para la comunicación coordinador-usuario (comunicación por luz) y usuario-coordinador (comunicación IRED), no será necesario crear un algoritmo de gestión de acceso aleatorio al medio.

- la transmisión de cualquier tipo de datos.
- 3 *Trama de acuse de recibo (acknowledgment frame)*: usada por cualquier dispositivo para confirmar la recepción satisfactoria de una trama.
 - 4 *Trama de comando MAC (MAC command frame)*: usada para el envío de comandos MAC entre dispositivos.
 - 5 *Trama de oscurecimiento de color (CVD -color visibility dimming- frame)*: usada para mantener una correcta intensidad de luz entre tramas de datos enviadas, dar soporte a la gestión de oscurecimiento y proveer información acerca de la calidad del canal.

El protocolo de comunicaciones desarrollado por el consorcio no utiliza transmisión basada en “balizas” ni supertrama, y usará básicamente las tramas b) y c) tal y como se ha comentado en este apartado. En cuanto a tramas importantes como la d) y la e), su envío y gestión serán implementadas a través de la lógica de comunicaciones del código instalado en la ARM.

4.4 Capa MAC

La familia de estándares IEEE 802 define el control de acceso al medio (MAC) como una subcapa de la capa de enlace de datos del modelo OSI, y cuyas principales funciones son: delimitación de la trama, reconocimiento, direccionamiento, transferencia de datos desde las capas superiores, protección de errores, y el arbitraje de acceso a un canal compartido por todos los nodos [35]. Debe ser escalable y capaz de adaptarse a cambios en la topología de red. Además, en redes inalámbricas, debe asegurar la eficiencia en las comunicaciones para maximizar la vida útil de las baterías, y la robustez frente a la presencia de ruido en el canal inalámbrico [2].

Tal y como se ha comentado en el documento, se ha optado por hacer una implementación del protocolo de comunicaciones siguiendo el paradigma SDR (Software Defined Radio) de tal manera que la mayor parte de las tareas anteriormente referidas para la capa MAC han sido trasladadas a la lógica del programa software que controlará las comunicaciones. Además, y debido a las características de la implementación de sistema lifi que se propone en el presente proyecto, existen determinados aspectos dentro de la funcionalidad asociada a la capa MAC que no serán implementadas. Este es el caso de la adaptabilidad a cambios en la topología, pues las topologías que usaremos serán fijas y predeterminadas con roles de dispositivos fijos.

En los siguientes apartados, se centrará en la descripción de la estructura de las tramas de la capa MAC.

4.4.1 Modos de transmisión de datos

El estándar lifi utiliza los modos de MAC resumidos en la Figura 69 para la transmisión de datos y la gestión de tramas [76]:

- i) *Modo individual (single)*: En este modo, la trama transporta un PPDU (*physical layer data unit*) por trama. Se utiliza para comunicaciones cortas de datos como ACK, Association, Beacon, etc.
- ii) *Modo empaquetado (packed)*: En este modo, la trama transporta múltiples PPDUs hacia el mismo destino. Este modo mejora la eficiencia de la MAC ya que elimina cabeceras repetidas para las capas PHY y MAC con el mismo destino.
- iii) *Modo ráfaga (burst)*: En este modo la trama utiliza el preámbulo PHY con una longitud reducida después de la primera trama. Por otra parte, se utiliza RIFS (*Reduced Interframe Space*) en lugar de SIFS (*Short Interframe Space*). De esta forma se aumenta la eficacia y el rendimiento.
- iv) *Modo de modulación digital de amplitud atenuada (OOK Dimmed)*: Se utiliza para la transferencia de datos en aplicaciones de atenuación.

La estructura del preámbulo de la capa PHY (FLP-Fast Locking Pattern + TDP-Topology Dependent Pattern) será descrita en detalle en el apartado 4.5.2.7 y la de la cabecera de la capa PHY (PHR, Physical layer Header) en el apartado 4.5.2.8. Por último, los periodos mínimos entre tramas (LIFS, SIFS y RIFS) serán definidos en el apartado 4.5.2.2.

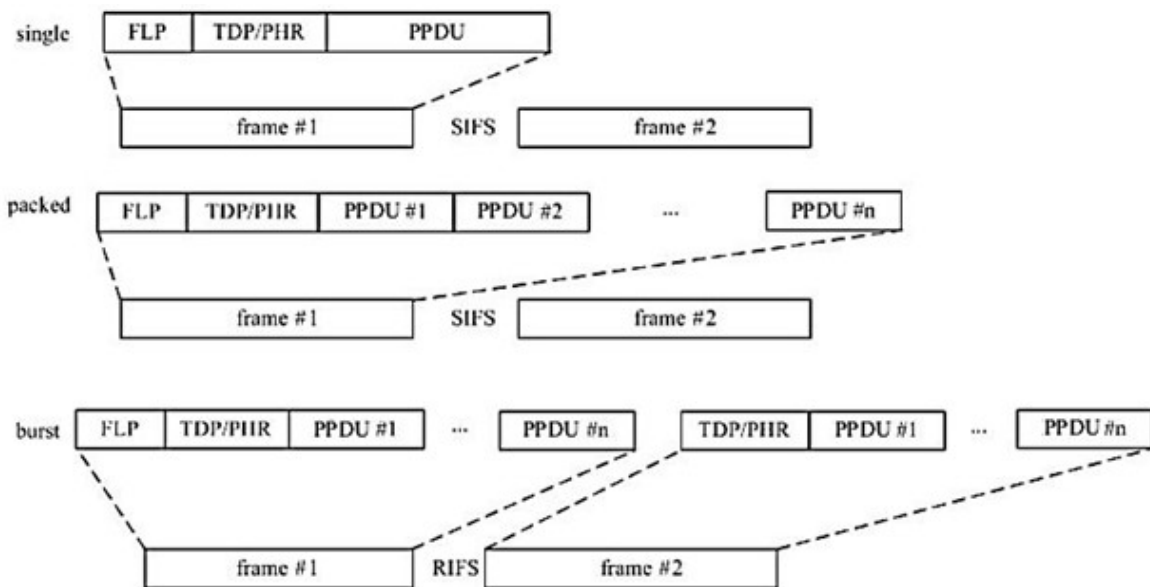


Figura 69: Diferentes modos de MAC para LiFi.

4.4.2 Formato de trama MAC

El estándar IEEE 802.15.7 [1] define 5 formatos de trama, uno por cada uno de los tipos presentados en el apartado 4.3.1, si bien todos siguen un formato general, con la presencia o no de alguno de los campos, especialmente en la cabecera. Así, en los siguientes subapartados describiremos la trama general y utilizaremos un ejemplo relacionado al entorno de aplicación del presente proyecto para ilustrar la descripción, finalizando con la definición de una trama de datos (la más completa) que será utilizada en la implementación final del sistema lifi propuesto.

Las tramas MAC se describen como una secuencia de campos en el orden en que son transmitidas por la capa PHY, de izquierda a derecha. Para cada trama MAC los bits reservados deben ser ignorados en recepción. La Figura 70 describe el formato de la trama lifi para la capa MAC, consistente en una cabecera, MHR; el cuerpo de la trama, MSDU; y por último un pie de trama, MFR.

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/ 14	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Destination VPAN Identifier	Destination Address	Source VPAN Identifier	Source Address	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
Addressing fields								
MHR							MSDU	MFR

Figura 70: Formato general de trama para la capa MAC

4.4.3 Cabecera MAC (MHR)

La cabecera de las tramas MAC tiene una longitud variable, con los campos en el orden mostrado en la Figura 71, con algunos campos como los de direccionamiento (addressing) que pueden omitirse en determinados casos, tal y como discutiremos más adelante. A continuación se describirán cada uno de los campos que conforman la MHR.

Campo Control de Trama (Frame Control)

El formato de este campo se muestra en la Figura 73, ocupa 2 octetos y contiene información importante para la definición de la trama.

Bits: 0-1	2-5	6-8	9	10	11	12-13	14-15
Frame Version	Reserved	Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	Ack Request	Dest Addressing Mode	Source Addressing Mode

Figura 71: Formato de la cabecera de las tramas MAC (MHR)

Está compuesto por los siguientes subcampos:

- *Versión de trama (frame versión)*: Especifica el número de versión de la trama y debe ser codificado con 0b00 para indicar que la trama es compatible con el estándar IEEE 802.15.7.
- *Bits reservados*: Deben ser codificados a 0, por lo tanto 0000.
- *Tipo de trama (Frame Type)*: Este subcampo define el tipo de trama según la Tabla 14, para las tramas presentadas en el apartado 4.3.1.

Frame type value b ₂ b ₁ b ₀	Description
000	Beacon
001	Data
010	Acknowledgment
011	Command
100	CVD
101-111	Reserved

Tabla 14: Descripción del campo Tipo de trama

- *Seguridad habilitada (Security Enabled)*: Tomará el valor 1 si queremos habilitar la seguridad ofrecida por la capa MAC y 0 en caso contrario. Si no habilitamos la seguridad, el campo de Cabecera Auxiliar de Seguridad (Auxiliary Security Header) mostrado en la Figura 71 puede ser omitido.
- *Trama pendiente (Frame Pending)*: Tomará el valor 1 si el dispositivo que está enviando esta trama tiene otros datos pendientes de envío, y 0 en caso contrario. Sólo se utiliza este subcampo en tramas de baliza, en el resto este bit tomará el valor 0.

- *Solicitud de acuse de recibo (Acknowledgment Request)*: Especifica si el emisor espera un mensaje de reconocimiento a la recepción de la trama, en cuyo caso tomará el valor 1, o si no se espera confirmación, en cuyo caso tomará el valor 0.
- *Modo de direccionamiento de destino (Destination Addressing Mode)*: Será codificado con un valor de la Tabla 15. En el caso de tomar el valor 00 y si el tipo de trama es distinto de acuse de recibo o baliza, el modo de direccionamiento de origen no podrá ser 00, implicando que la trama es dirigida al coordinador de la red VPAN. En caso de tomar el valor 01, el modo de direccionamiento de origen deberá ser fijado también a 01, implicando que estamos definiendo una trama broadcast y por lo tanto no utilizamos ningún tipo de direccionamiento.
- *Modo de direccionamiento de origen (Source Addressing Mode)*: Tomará alguno de los valores de la Tabla 15. En el caso de tomar el valor 00 y el tipo de trama es distinto de acuse de recibo, el modo de direccionamiento de destino no podrá ser 00, implicando que la trama se ha originado en el coordinador de la red VPAN.

Addressing mode value b ₁ b ₀	Description
00	VPAN identifier and address fields are not present.
01	No address field (broadcast only mode with no address fields present). Addresses with all ones of 16 bits or 64 bits are defined as broadcast.
10	Address field contains a 16-bit short address.
11	Address field contains a 64-bit extended address.

Tabla 15: Descripción del campo Modos de direccionamiento

Número de secuencia (Sequence Number)

Especifica el número de secuencia de la trama. Es utilizado para identificar tramas de acuse de recibo y relacionarlas con la correspondiente trama de datos. Generalmente es inicializado a un valor aleatorio y es incrementado en cada nueva trama de datos generada, de manera cíclica.

Identificador de red VPAN de destino (Destination VPAN Identifier)

Si está presente especifica el identificador unívoco de la red en la que se encuentra el destinatario de la trama. Un valor de 0xffff indica que la trama es una trama broadcast. Este campo sólo será incluido en la estructura de la trama MAC si el *modo de direccionamiento de destino* del campo Control de trama tiene un valor de 10 o 11.

El consorcio ha tenido en cuenta la configuración habitual y las características comunes de diferentes medios de comunicación terrestre, como por ejemplo trenes, proponiendo utilizar el siguiente formato para los identificadores de red: a) Número de vagón (4 bits), b) Separador (1 bit), c) Fila de asientos (6 bits), d) Separador (1 bit), e) Asiento (2 bits), f) Separador (2 bits). Utilizaremos 0 como bit separador.

Dirección de destino (Destination Address)

Si está presente, este campo tendrá una longitud de 16 o 64 bits, dependiendo del *modo de direccionamiento de destino*. Especifica la dirección del destinatario. Para tramas broadcast utilizaremos un valor de 0xffff. Este subcampo estará presente sólo si el valor del *modo de*

direccionamiento de destino es distinto de 00.

La propuesta del consorcio es usar los 14 primeros bits del identificador de red, y utilizar 00 para el coordinador, que será la luminaria del tren, y 01 para el dispositivo de usuario.

Identificador de red VPAN de origen (Source VPAN Identifier)

Si está presente especifica el identificador unívoco de la red en la que se encuentra el destinatario de la trama. Este campo sólo será incluido en la estructura de la trama MAC si el *modo de direccionamiento de origen* del campo Control de trama tiene un valor distinto de 00.

El identificador VPAN del dispositivo de destino se determina generalmente durante el proceso de asociación a una red, y puede cambiar por resolución de conflictos. En el sistema lifi propuesto en este proyecto se utilizarán direcciones MAC fijas, y tanto el dispositivo de origen como el de destino se encontrarán en la misma red por lo que utilizarán el mismo identificador de red.

Dirección de origen (Source Address)

Si está presente, este campo tendrá una longitud de 16 o 64 bits, dependiendo del *modo de direccionamiento de destino*. Especifica la dirección del destinatario. Este subcampo estará presente sólo si el valor del *modo de direccionamiento de origen* es 10 o 11.

La propuesta del consorcio es usar los 14 primeros bits del identificador de red, y utilizar 00 para el coordinador, que será la luminaria del tren, y 01 para el dispositivo de usuario.

Cabecera Auxiliar de Seguridad (Auxiliary Security Header)

Especifica información requerida para el procesamiento de la seguridad, incluyendo el nivel de seguridad de la trama y que clave definida por la MAC (clave PIB) se está utilizando. En una primera versión del protocolo de comunicaciones no usaremos seguridad propia de la MAC.

4.4.4 Cuerpo de la trama MAC (MSDU)

El cuerpo de la trama tiene una longitud variable, dependiendo del tipo de trama que estemos utilizando y la información que se quiera transmitir, proveniente de las capas superiores del modelo OSI.

Trama MAC de datos

El formato de la trama MAC de datos es el más completo, teniendo el mismo formato que el que se muestra en la Figura 70, con los campos descritos anteriormente. En cuanto al cuerpo de la trama, su formato viene detallado en la Figura 72, especificando el modo de comunicación en sus primeros bits para después indicar cuántos paquetes de datos se transmiten, y por último la información útil, de longitud variable, proveniente de las capas superiores. En nuestro sistema será la información del *streaming* de vídeo que se va a transmitir, empaquetado según el protocolo HTTP sobre TCP.

Bits 0-1	Bits 2-7	variable
00—Single 01—Packed 10—Burst 11—Reserved	Number of PPDUs per data frame	Data payload

Figura 72: Formato del cuerpo (payload) de la trama MAC de datos

Trama de acuse de recibo

El estándar IEEE 802.15.7 propone un formato simplificado para las tramas MAC de acuse de recibo, tal y como se muestra en la Figura 73.

Octets: 2	1	variable	2
frame control	sequence number	B-ACK frame payload (optional)	FCS
MHR		MSDU	MFR

Figura 73: Formato de la trama MAC de acuse de recibo

En el sistema propuesto por el proyecto “Lifi last mile” utilizaremos tramas de acuse de recibo simplificadas, con un cuerpo o payload de 0 bytes e incluiremos los campos de direccionamiento en la cabecera. Así pues, utilizaremos el formato general de trama (Figura 70), sin incluir el cuerpo de la trama. El número de secuencia de las tramas de acuse de recibo será igual al número de secuencia de la trama de datos de la que se quiera confirmar su recepción y la dirección de destino será igual a la dirección de origen de la trama de datos recibida.

4.4.5 Pie de la trama MAC (MFR)

El último campo de las tramas MAC es el pie de trama, compuesto por la Secuencia de Comprobación de Trama (Frame Check Sequence, FCS). Esta secuencia (o CRC) tiene una longitud de 2 octetos y se calcula a partir de la cabecera y el cuerpo de la trama -siempre y cuando la longitud del cuerpo sea mayor de cero.

El estándar propone utilizar un generador polinómico estándar de grado 16, $G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ y seguir el siguiente algoritmo:

1. Sea $M(x) = b_0 x^{k-1} + b_1 x^{k-2} + \dots + b_{k-2} x + b_{k-1}$ el polinomio que representa la secuencia de bits sobre los que se quiere calcular la secuencia de comprobación de trama.
2. Multiplicamos este polinomio por x^{16} , obteniendo $x^{16} \cdot M(x)$.
3. A continuación dividimos el resultado del punto anterior por el polinomio generador $G_{16}(x)$ utilizando división en módulo 2, obteniendo el polinomio resto de la división: $R(x) = r_0 x^{15} + r_1 x^{14} + \dots + r_{14} x + r_{15}$.
4. Por último, la secuencia de comprobación de trama vendrá dada por los coeficientes de este polinomio resto $R(x)$.

La Figura 74 muestra una implementación típica de este algoritmo, donde r_0 representa al primer bit a transmitir en el pie de trama, y r_{15} el último.

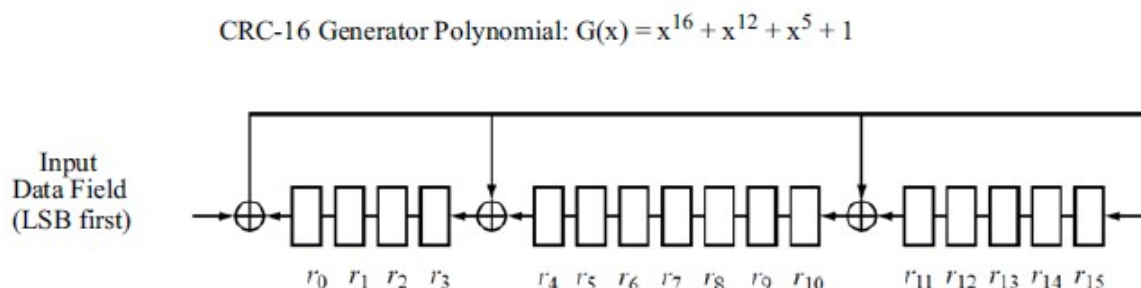


Figura 74: Implementación típica del cálculo de la Secuencia de Comprobación de Trama (FCS-CRC)

4.4.6 Ejemplo de la trama MAC

En aras de dotar a este documento de una mayor legibilidad y facilitar la comprensión del estándar IEEE 802.15.7, se recoge en la Tabla 16 un ejemplo de trama de datos a utilizar por el protocolo en las comunicaciones del sistema lifi propuesto. En la medida de lo posible se ha dado valor a los diferentes campos y subcampos definidos por el estándar, si bien en algunos casos no ha sido posible, bien porque el valor de campos o subcampos debe ser fijado en tiempo de ejecución, como es el caso del número de secuencia o de la secuencia de comprobación de trama.

En el ejemplo presentado supondremos que la trama de datos es enviada por el coordinador al dispositivo de usuario durante la transmisión de datos de *streaming* de vídeo. Repasaremos brevemente cada uno de los diferentes campos, especificando el porqué de los valores de la tabla:

- **Cabecera:**
 - *Control de trama:* 00 (versión), 0000 (valores reservados, fijados a 0 por el estándar), 001 (trama de datos), 0 (sin seguridad), 1 (suponemos que el coordinador tiene más datos para enviar al usuario, durante el *streaming* de vídeo), 1 (se requiere ACKs durante el envío de datos de *streaming*), 10 10 (utilizaremos direcciones de origen y destino cortas).
 - *Número de secuencia:* Inicializada a un valor aleatorio según el estándar por lo que su valor dependerá del valor de inicialización y del número de trama, así usaremos ssssss²⁵ para indicar que su valor debe ser fijado en tiempo de ejecución pero que ocupa 8 bits.
 - *Direccionamiento:*
 - Identificador de red destino/origen: Utilizaremos el ejemplo de dirección especificado en la definición de estos campos: 4 bits para el vagón, 6 bits para la fila, y 2 bits para el asiento, con bits puestos a 0 como separadores.
 - Dirección de destino/origen: Usaremos los primeros 14 bits del identificador de red, que identifican unívocamente el asiento, y fijaremos los últimos 2 bits de la dirección a 00 para el coordinador (origen) y a 01 para el usuario (destino).
 - *Cabecera Auxiliar de Seguridad:* No utilizada al haber marcado a 0 el bit correspondiente en el campo de control de trama.
- **Cuerpo (Payload):** Al ser una trama de datos perteneciente al *streaming* de vídeo utilizaremos el modo de transmisión *packed*, agrupando distintos paquetes de vídeo en un solo paquete de datos, fijando a 01 los dos primeros bits. En cuanto al resto de bits, dependerá del número de paquetes de datos a enviar, nnnnn⁴ (6 bits), y de los datos en sí mismo UUUU.....UUU⁴ (longitud variable)
- **Pie-FCS:** La secuencia de comprobación de trama dependerá de la trama en sí, de ahí que no podamos especificar su valor final, pero sí su longitud en bits, 16: ffffffffffffffff⁴

25 En minúscula expresamos bits que pueden tomar cualquier valor mientras que en mayúscula expresamos octetos que también pueden tomar cualquier valor.

Campo		Valor	
Cabecera	Control de trama	00 0000 001 0 1 1 10 10	
	Número de Secuencia	sssssss	
	Direccionamiento	Id VPAN Destino	0101 0 010101 0 11 00 (Vagón=5,Fila=21,Asiento=D)
		Dirección Destino	01010010101011 01 (Usuario)
		Id VPAN Origen	Misma que el destino
		Dirección Origen	01010010101011 00 (Coordinador)
	Cabecera Auxiliar de Seguridad	N/A	
Cuerpo (Payload)	01 nnnnnn UUUU....UUU		
Pie (FCS)	fffffffffffffff		
TOTAL		0000000010111010 sssssss 0101001010101100 0101001010101101 0101001010101100 0101001010101100 01nnnnnnUUUU....UUU ffffffffffffffff	

Tabla 16: Ejemplo de trama MAC de datos para el sistema propuesto en "Lifi last mile"

4.4.7 Implementación en ARM

El código que se encuentra en el ARM es código "C embebed". Es un tipo de código, derivado del C clásico y utilizado en sistemas empotrados como el que utiliza nuestro sistema de comunicaciones y se ha explicado en la sección 2.9.

En un primer momento se comenzó a implementar como si fuera un código común, utilizando "C clásico", una vez que la estructura de datos estuvo completada y resuelta se realizó una migración a C embebed, lo que solo conllevaba realizar pequeños cambios en los códigos para que pudieran ejecutarse dentro del ARM. En estos cambios había que tener muy en cuenta el tamaño de memoria que se disponía y por lo cuales se tuvieron que implementar memorias dinámicas para el guardado de los paquetes recibidos y emitidos durante el proceso. De esta forma se evitaba tener un espacio de memoria constante en uso que en ocasiones sería inútil ya que en caso de haber realizado la programación en memoria estática se habría tenido que reservar el tamaño máximo de paquete.

Además de esto se implementó, como es obvio, para poder realizar una multitarea dentro del procesador, de esta forma no hay que hacer una multiplexación por división de tiempo. Por ello y para poder de cumplir lo citado anteriormente la implementación de esta capa se realizó una segmentación del código dividiéndolo en dos partes fundamentales e independientes, código de recepción y código de emisión. El código de emisión es el encargado de realizar el análisis, configuración de la trama y empaquetado de los datos recibidos de la capa de red para transmitírselos a la capa física, como se ha explicado reiteradas veces a lo largo del documento. El código de recepción es similar al código de emisión pero realiza el proceso contrario y obtiene información necesaria que le tendrá que pasar a la capa de red y/o guardar para hacer tratamiento de paquetes venideros.

Ambas secciones implementadas en el dispositivo de recepción y emisión ya que son necesarios para el canal de subida y bajada, tiene una estructura similar. Recepción de la capa inmediatamente

superior o inferior, procesan los datos empaquetando o desempaquetando, y emisión del paquete generado a la capa inferior o superior; dependiendo de si esta emitiendo o recibiendo. Esta estructura se puede ver en el diagrama de bloques de la Figura 75

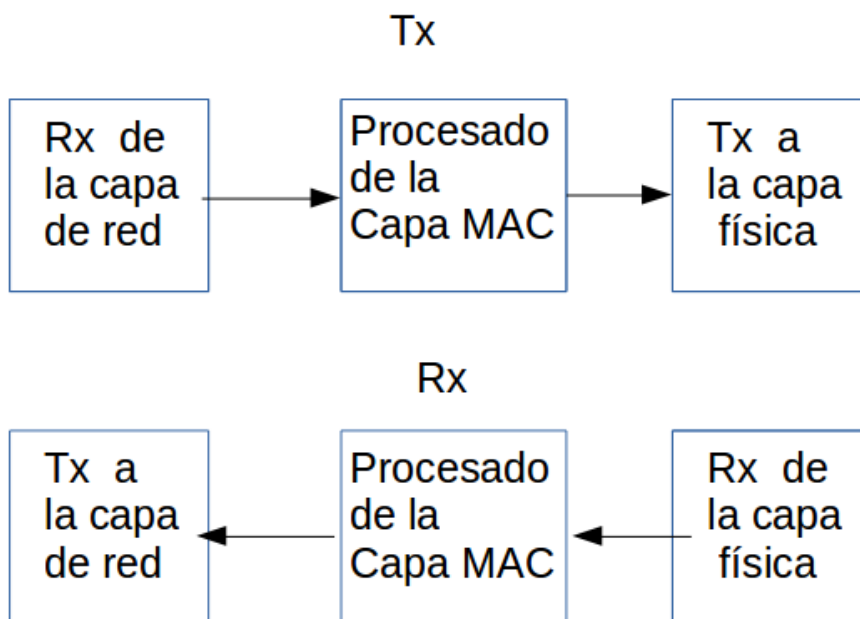


Figura 75: Proceso capa MAC

4.4.7.1 Optimización realizada y resultados obtenidos

Durante el proceso de implementación, se vio que el CRC de la capa MAC, explicado en la sección 4.4.5, era un proceso que se repetía en cada transmisión de datos. Al ser un proceso que se tiene que repetir por cada transmisión y la única parte que cambia de esta operación es la referida a los datos que se van a transmitir, se decidió realizar una optimización. El objetivo de realizar esta optimización es reducir el tiempo de computo en esta parte de la capa MAC consiguiendo realizar una mayor tasa de transmisión ya que el CRC es el ultimo calculo que se realiza y una vez calculado solo se debe concatenar con el resto de datos para que el paquete este listo para ir a la capa PHY.

La optimización propuesta fue convertir el código que realiza el CRC en una función en código ensamblador para el ARM. Estos códigos se pueden ver en la Figura 76 a y b . En la figura a se ve el código en C encargado de realizar el calculo del CRC que se concatenara para el paquete MAC y en la figura b la optimización de ese código pasa a ensamblador.

Las tasa de rendimiento las podemos ver en la Tabla 18. Para realizar esta tabla se han realizado 20 transmisiones de diez paquetes por transmisión , diferentes paquetes entre si y diferentes en cada transmisión, del orden de la decena del Kbyte. Los tiempos obtenido son exclusivamente del tiempo que tarda en ejecutar dicha función en ensamblador y en C.

Con los datos podemos ver que tenemos una mejoría de tiempo en esa función de aproximadamente un 30% lo que supone una mejoría en el procesamiento que realiza la capa MAC en el modulo de transmisión.

```

1 | long long F_CRC_CalculaChecksum(char const AF_Datos[], short VF_nBytes){
2
3 |     long long    VP_CRCTableValue = INITIAL_VALUE;
4 |     for (short VP_bytes = 0; VP_bytes < VF_nBytes; VP_bytes++)
5 |     {
6 |         VP_CRCTableValue = (VP_CRCTableValue >> 8)* AF_Datos[VP_bytes] ;
7 |     }
8 | }

1 | long long F_CRC_CalculaChecksum(char const AF_Datos[], short VF_nBytes){
2 |     asm(
3 |     ".Init:"
4 |         "ldrsh    w1, [sp, 22]"
5 |         "ldrsh    w0, [sp, 6]" // carga vp_bytes y vf_nbytes para  realizar la comparacion
6 |         "cmp     w1, w0" // compara ambos registros
7 |         "bge     .End" // si vp_bytes>=vf_nbytes salta a L2
8 |         "ldr     x0, [sp, 24]" // realiza la operacion desplazamiento 8 bits y multiplicacion por AF_Datos
9 |         //ademas de incrementar la variabal vp_bytes
10 |        "asr     x0, x0, 8"
11 |        "str     x0, [sp, 24]"
12 |        "ldrsh    w0, [sp, 22]"
13 |        "uxth    w0, w0"
14 |        "add     w0, w0, 1"
15 |        "uxth    w0, w0"
16 |        "strh    w0, [sp, 22]"
17 |        "b       .Init" // salta a L3 para continuar el for y terminar el crc
18 |     ".End:"
19 |         "nop"
20 |     )
21 | }

```

Figura 76: a) Función CRC en "C embebed"(arriba) b) Función CRC en ASM(abajo)

Nº de transmisión	ASM(us)	C(us)
1	5	7
2	4,7	7,5
3	4,2	7,6
4	4,9	5,9
5	4,5	6
6	5	6,1
7	5,1	6,5
8	5,2	7
9	5,5	6,8
10	5	7,1
11	4,1	7
12	4,5	7,5
13	4,5	6,2
14	4,7	6,8
15	5,2	6,9
16	5,3	7,5
17	5,4	7
18	4,9	6,5
19	4,8	6,5
20	4,6	7,8
Media de tiempos	4,86	6,86
	Mejora	29,23%

Tabla 17: Tasas de rendimiento obtenidas

4.5 Capa PHY

Las funciones generales de la capa física según el estándar son [1]:

- Proporcionar servicios a la capa superior.
- Activar y desactivar el transceptor VLC.
- Proporcionar WQI (*Wavelength Quality Indication*) para todas las tramas recibidas.
- Ayudar en la sincronización en el receptor utilizando el preámbulo incorporado en la estructura de la trama.
- Seleccionar canales según el requisito.
- Transmisión y recepción de datos, apoyándose en la codificación/decodificación de las tramas.
- Proporcionar corrección de errores en el receptor mediante el uso de técnicas de corrección de errores hacia delante (FEC, *Forward Error Correction*).

Una vez más, en el desarrollo de la capa PHY, seguiremos el paradigma SDR (Software Defined Radio) por lo que las funciones propias de esta capa serán implementadas por código en la lógica del programa. Nos centraremos aquí en la descripción de las principales características, con especial atención a la estructura de las tramas de la capa PHY.

4.5.1 Modos de operación

El estándar IEEE 802.15.7 define dentro de la capa física PHY, tres capas de acuerdo con las tasas de transferencia consideradas y su aplicación: **PHY I** para exteriores con tasas de transferencia bajas; **PHY II** para interiores, con tasas de transferencia medias y altas y una sola fuente de luz; y **PHY III**, también para interiores con tasas de transferencia altas y tres fuentes de luz.

Cada modo de modulación PHY tiene asociada una velocidad de reloj que “se divide” en varios esquemas de codificación para la obtención de las velocidades finales tal y como se muestra en Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20. El estándar también soporta el uso de diferentes velocidades de reloj con el mismo dispositivo para transmitir y recibir datos dado que el transmisor (LED) y el receptor (PD) son circuitos independientes.

Modulation	RLL code	Optical clock rate	FEC		Data rate
			Outer code (RS)	Inner code (CC)	
OOK	Manchester	200 kHz	(15,7)	1/4	11.67 kb/s
			(15,11)	1/3	24.44 kb/s
			(15,11)	2/3	48.89 kb/s
			(15,11)	none	73.3 kb/s
			none	none	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	none	35.56 kb/s
			(15,4)	none	71.11 kb/s
			(15,7)	none	124.4 kb/s
			none	none	266.6 kb/s

Tabla 18: Modos de operación para PHY I

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

Tabla 19: Modos de operación para PHY II

Modulation	Optical clock rate	FEC	Data rate
4-CSK	12 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	18 Mb/s
4-CSK	24 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	36 Mb/s
16-CSK		RS(64,32)	48 Mb/s
8-CSK		none	72 Mb/s
16-CSK		none	96 Mb/s

Tabla 20: Modos de operación para PHY III

El desarrollo lifi propuesto en el presente proyecto deberá proporcionar acceso a vídeo en *streaming* a usuarios de sistemas de transporte, tales como autobuses, trenes aviones. Se trata pues de una

aplicación en interior que requiere de unas altas tasas de transferencia. Además, dado que se quiere reutilizar al máximo los sistemas de luminarias presentes en este tipo de vehículos, utilizaremos el modo **PHY II** con transmisión de datos utilizando una única fuente de iluminación, y centraremos la descripción del desarrollo para este modo de la capa PHY definido por el estándar. La elección de este modo, y el hecho de querer alcanzar unas tasas de transferencia altas para garantizar un *streaming* de vídeo de alta calidad, nos impone la elección de la modulación (OOK) y de los códigos de corrección de errores.

4.5.2 Requisitos generales

4.5.2.1 Plan de bandas de longitud de onda

El estándar contempla que un dispositivo compatible debe de operar con el pico de radiancia energética en el rango de longitud de onda comprendido entre los 380 nm y los 780 nm que se corresponde aproximadamente con el espectro visible por el ser humano, pudiendo operar en varias de estas bandas. La Tabla 21 recoge todas las bandas contempladas por el estándar indicándose en la cabecera PHY el pico de transmisión a través de los códigos de la última columna de la tabla. En el caso de transferencia en múltiples bandas, como por ejemplo para LEDs blancos, se utiliza el código de la banda más baja.

Wavelength (nm)		Spectral width (nm)	Code
380	478	98	000
478	540	62	001
540	588	48	010
588	633	45	011
633	679	46	100
679	726	47	101
726	780	54	110
<i>Reserved</i>			111

Tabla 21: Plan de bandas de longitud de ondas y codificación

4.5.2.2 Periodos mínimos de espaciado entre tramas

Para proporcionar el espacio entre tramas adyacentes se utiliza un mecanismo basado en prioridades llamado (IFS, Interframe Spacing). La separación mínima entre tramas depende del modo de transmisión de datos de la capa MAC (apartado 4.4.1), del modo PHY y de la velocidad de reloj elegida. El estándar define tres tipos de espaciado entre tramas utilizados para proporcionar diferentes prioridades: *largo* (LIFS, Long Inter Frame Spacing), *corto* (SIFS, Short Inter Frame Spacing) y *reducido* (RIFS, Reduce Inter Frame Spacing). La Tabla 22 recoge los periodos mínimos para cada modo PHY.

PHY	<i>macMinLIFSPeriod</i>	<i>macMinSIFSPeriod</i>	<i>macMinRIFSPeriod</i>	Units
PHY I	400	120	40	optical clocks
PHY II	400	120	40	optical clocks
PHY III	400	120	40	optical clocks

Tabla 22: Periodos LIFS, SIFS y RIFS mínimos

4.5.2.3 Gestión de oscurecimiento y mitigación de parpadeo

El estándar IEEE 802.15.7 define diferentes técnicas para dar soporte a la gestión del oscurecimiento (dimming) y mitigación del parpadeo (flicker). Cualquier dispositivo que quiera cumplir con el estándar debe implementar alguna de ellas, resumidas en la Tabla 23. Como se puede observar, el cumplimiento del estándar en cuanto a modulaciones soportadas por él nos asegura poder realizar una mitigación del parpadeo dentro de cada trama, es decir, en los periodos de transmisión de datos. En el sistema lifi presentado, esta gestión se realizará mediante la implementación de una modulación OOK con gestión de oscurecimiento, tal y como se describe en el apartado 4.5.2.4. En cuanto a la gestión del oscurecimiento en periodos de reposo, y por tanto mitigación de parpadeo entre Protocolo Completotramas, el estándar propone utilizar patrones de reposo/visibilidad, y serán descritos en el apartado 4.5.2.5.

Flicker mitigation	Data transmission (Intra-frame flicker)	Idle or RX periods (Interframe flicker)
OOK modulation	Dimmed OOK mode, RLL code	Idle/visibility patterns
VPPM modulation	VPPM guarantees no intra-frame flicker, RLL code	
CSK modulation	Constant average power across multiple light sources, scrambler, high optical clock rates (MHz)	

Tabla 23: Mitigación de parpadeo según el modo de modulación

4.5.2.4 Gestión del oscurecimiento en periodos de transmisión

El uso de modulación OOK con gestión del oscurecimiento debe ser indicado en la cabecera de la trama PHY. El estándar propone el uso de periodos de compensación dentro de la trama para ajustar la intensidad de luz media percibida, dividiendo la trama en subtramas. Esta inclusión puede provocar problemas de sincronización por lo que además se incorporan campos de resincronización para poder reajustar el reloj digital. Además, la modulación se implementa de tal manera que los símbolos bajos son transmitidos a mitad de potencia lumínica que los símbolos altos, no llegando nunca a apagar los LED. Un ejemplo de modulación OOK con gestión de oscurecimiento se muestran en la Figura 77.

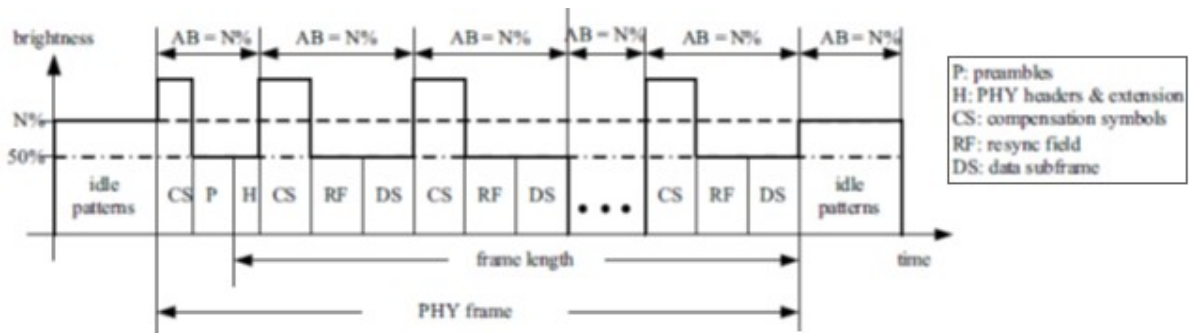


Figura 77: Ejemplo de modulación OOK con gestión de oscurecimiento

4.5.2.5 Gestión de oscurecimiento en periodos de reposo

El estándar propone la inserción de un patrón de reposo o de un patrón de visibilidad para la mitigación del parpadeo en periodos entre tramas. El estándar propone una serie de patrones de visibilidad para la codificación 8b10b, que se corresponde con la codificación del modo PHY que usaremos en el presente proyecto, y que por tanto usaremos en la implementación de nuestro protocolo de comunicaciones. La Tabla 24 muestra estos patrones y nosotros usaremos el equivalente a un porcentaje de visibilidad del 70%. Para ello, y tal y como define el estándar, alternaremos diferentes patrones de visibilidad de tal manera que de media se obtenga una visibilidad del 70%.

Visibility pattern	Percentage visibility
11111 11111	100%
11110 11111	90%
11110 11110	80%
11101 11100	70%
11001 11100	60%
10001 11100	50%
00001 11100	40%
00001 11000	30%
00001 10000	20%
00001 00000	10%
00000 00000	0%

Tabla 24: Periodos de visibilidad para la codificación 8b10b

4.5.2.6 Formato de trama PHY (PPDU)

El formato de la trama definida por el estándar IEEE 802.15.7 para la capa PHY se muestra en la Figura 78. Ésta se compone de un preámbulo (SHR) utilizado en el receptor para sincronización de reloj, una cabecera (PHR) con información acerca del modo de transmisión y la codificación y modulación empleadas, y por último el cuerpo de la trama o payload (PSDU) con la información

útil a transmitir convenientemente empaquetada por las capas superiores.

Preamble	PHY header	HCS	Optional fields	PSDU
SHR	PHR			PHY payload

Figura 78: Formato de trama de la capa PHY

La transmisión de la trama se realiza de izquierda a derecha, siendo el preámbulo lo primero en transmitirse, enviando cada octeto menos significativo en primer lugar y dentro de cada octeto también con el LSB (least significant byte) en primer lugar. En los siguientes apartados se describirán cada uno de los diferentes campos.

4.5.2.7 Preámbulo (SHR)

El estándar define un *patrón de seguimiento rápido* (FLP, Fast Locking Pattern) para sincronización de reloj seguido de cuatro *patrones dependientes de la topología* (TDP, Topology Dependent Patter) para distinguir entre topologías. El **preámbulo** será **transmitido** a una frecuencia de reloj soportada por el receptor, **sin ningún tipo de codificación** de línea o de canal, y con una **modulación OOK**. La misma secuencia preámbulo debe ser utilizada para todos los modos PHY.

La Figura 79 muestra el formato del preámbulo, que comienza con un FLP compuesto por una cadena de 1s y 0s alternados de una longitud de al menos 64 bits (y no más de 16.384 bits). Esta secuencia de máxima transición es usada para “engancharse” el circuito de recuperación de reloj (CDR, Clock and Data Recovery) en el receptor. El número de repeticiones del FLP puede extenderse por la capa MAC durante los periodos de reposo, durante diferentes modos de operación para obtener una mejor sincronización, o para mejorar la visibilidad.

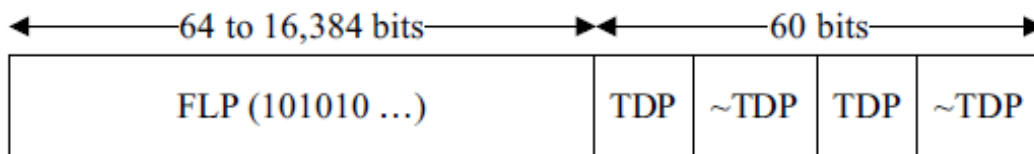


Figura 79: Formato del preámbulo (SHR) de la trama MAC

A continuación se envían cuatro repeticiones de uno de los cuatro TDPs mostrados en la Figura 80, que representan a las diferentes topologías tal y como se refleja en la Figura 80. Los TDPs tienen una longitud de 15 bits y de manera alternativa se envían de manera invertida (~) para balance DC.

P1	: 1 1 1 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0
P2	: 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0
P3	: 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1
P4	: 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1

Figura 80: Formatos del campo TDP

TDP	Topology
P1	Topology independent (visibility)
P2	Peer-to-peer
P3	Star
P4	Broadcast

Tabla 25: Asignación de TDPs por topologías

4.5.2.8 Cabecera PHY (PHR)

La **cabecera** de la trama PHY, definida en la Figura 78, debe ser **enviada utilizando modulación OOK**, a la **menor tasa de transferencia** definida para el reloj óptico elegido. Esto se traduce, en el caso del sistema lifi que pretendemos implementar, en una tasa de transferencia de 48 Mb/s pues la frecuencia de reloj elegida es 120 MHz (ver Tabla 19). Además, esta frecuencia de reloj debe ser mantenida durante toda la transmisión, tanto del preámbulo como de la cabecera y, por supuesto, del cuerpo de la trama.

PHY header fields	Bit-width	Explanation on usage
Burst mode	1	Reduce preamble and IFS
Channel number	3	Band plan ID
MCS ID	6	Provide information about PHY type and data rate
PSDU length	16	Length up to <i>aMaxPHYFrameSize</i>
Dimmed OOK extension	1	Information on compensation time, resync, and length of sub-frame
Reserved fields	5	Future use

Tabla 26: Descripción de campos de la cabecera (PHR) de la trama PHY

En el supuesto de que se quiera implementar soporte al oscurecimiento, como es recomendable y es nuestro caso, se deberá marcar el bit correspondiente de la cabecera (Dimmed OOK extension) a 1, y será necesario transmitir campos adicionales.

Modo ráfaga (Burst mode)

Un valor de 1 en este campo indica que la siguiente trama que se enviará es parte del modo ráfaga, 0 para el resto de modos.

Número de canal (Channel number)

El número de canal viene indicado por el código correspondiente al canal tal y como se muestra en la Tabla 21 y se describió en el apartado 4.5.2.1.

Identificador de modulación y codificación (MCS ID)

El estándar define un conjunto de combinaciones de modulación y esquema de codificación en la tabla 83 del documento del estándar [1], y cuya versión reducida centrada en el modo PHY II mostramos en la Tabla 26. El código de la primera columna para la combinación modulación/codificación usada es el que usaremos en la cabecera PHY.

MCS indication	PHY	Data rate	Unit
010000	II	1.25	Mb/s
010001		2	
010010		2.5	
010011		4	
010100		5	
010101		6	
010110		9.6	
010111		12	
011000		19.2	
011001		24	
011010		38.4	
011011		48	
011100		76.8	
011101		96	
others		reserved	

Tabla 27: Descripción del campo MCS ID para el modo PHY II (Tabla completa en [35])

Longitud del cuerpo de la trama (PSDU length)

Este campo especifica el número total de octetos contenidos en la PSDU, siendo un valor entre 0 y 65535.

Extensión para modulación OOK con soporte al oscurecimiento (Dimmed OOK extensión)

En caso de implementar el soporte al oscurecimiento en la modulación OOK este bit debe ser codificado a 1. Además, en este caso, es necesario incorporar campos adicionales a la cabecera de la capa PHY.

4.5.2.9 Secuencia de comprobación de cabecera (HCS)

Se define una protección para la cabecera PHY consistente en un código CRC de 16 bits (ver apartado 4.4.5 para una descripción de cómo obtener este código). Inicialmente todos los registros utilizados para el cálculo del CRC (Figura 74) deben ser inicializados a 1 y los bits del HCS deben ser procesados en orden de transmisión.

4.6 Campos adicionales

El estándar recoge la posibilidad de añadir una serie de campos adicionales antes del cuerpo de la trama PHY con diferente funcionalidad y utilidad según el modo de transmisión y el modo PHY. Para el caso del sistema lifi de nuestro proyecto utilizaremos los campos referidos a la modulación OOK con gestión del oscurecimiento, tal y como se describen en la Tabla 28, formateándolos de acuerdo a la Figura 81.

Extension fields	Bit-width	Explanation on usage
Compensation length	10	Compensation length in optical clocks
Resync length	4	Number of resync optical clocks
Subframe length	10	Length of subframe in optical clocks
OFCS	8	Optional field check sequence

Tabla 28: Campos adicionales para modulación OOK con gestión de oscurecimiento

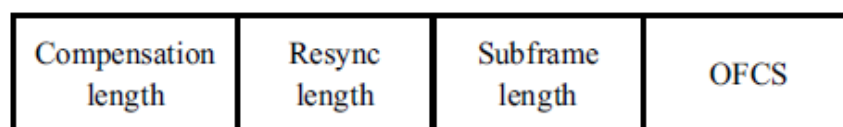


Figura 81: Estructura campos opcionales para modulación OOK con gestión de oscurecimiento

Longitud de la compensación (Compensation Length)

Tiene una longitud de 10 bits e indica el número de símbolos de compensación utilizados dada la frecuencia de reloj del sistema. La elección del valor de estos símbolos no forma del estándar y debe ser el diseñador del protocolo el que los elija. El valor de este campo será un número entre 0 y 1023.

Longitud de resincronización (Resync length)

Este campo, de 4 bits, indica el número de símbolos de resincronización utilizados dada la frecuencia de reloj del sistema. El patrón de resincronización es igual al FLP utilizado en el preámbulo (apartado 4.5.2.7). El valor de este campo será un número entre 0 y 15, siendo 15 el valor por defecto.

Longitud de la subtrama (Subframe length)

Con una longitud de 10 bits, este campo indica el número de bits no codificados dentro de la subtrama, siendo un valor entre 0 y 1023. Estas subtramas son generadas por el transmisor después de determinar la FCS y se ha aplicado la corrección de errores (FEC). Ni el FCS ni el FEC deben incluir los símbolos de resincronización o compensación. Todas las subtramas tendrán la misma longitud excepto la última que podrá estar truncada para cumplir con la longitud total de la trama.

Generación de la Secuencia de comprobación de los campos adicionales (OFCS)

La secuencia de comprobación de campos adicionales (OFCS, Optional Field Check Sequence) se calcula a partir de los campos de longitud de la compensación, longitud de la resincronización y longitud de la subtrama. El resultado es una secuencia de 8 bits (ITU-T I.432.1), obtenida como el resto de la división módulo 2 entre x^8 y el polinomio generador $x^8 + x^2 + x + 1$, y después multiplicado por el contenido de la cabecera excluyendo el OFCS. El contenido inicial del registro que calcula la secuencia es fijado a todo 1s.

4.6.1.1 Cuerpo de trama (PSDU)

El cuerpo de la trama, Figura 82, o PSDU tiene una longitud variable y transporta la información útil proveniente de las capas superiores, con el encapsulado introducido en cada capa. La Figura 82 muestra el encapsulado de la capa MAC del estándar, explicada a lo largo del apartado 4.4.2.

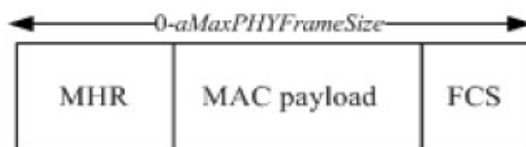


Figura 82: Estructura del cuerpo (payload) de la trama de la capa PHY (PSDU)

4.7 Trama final

Nuevamente, y por el mismo motivo que se hizo para la trama de la capa MAC en el apartado 4.4.6, presentamos un ejemplo de la trama de datos a utilizar, incluyendo las capas MAC y PHY. Continuaremos con el ejemplo presentado anteriormente, suponiendo que la trama de datos es enviada por el coordinador al dispositivo de usuario. La Figura 83 muestra un resumen de la estructura de la trama final según el estándar IEEE 802.15.7.

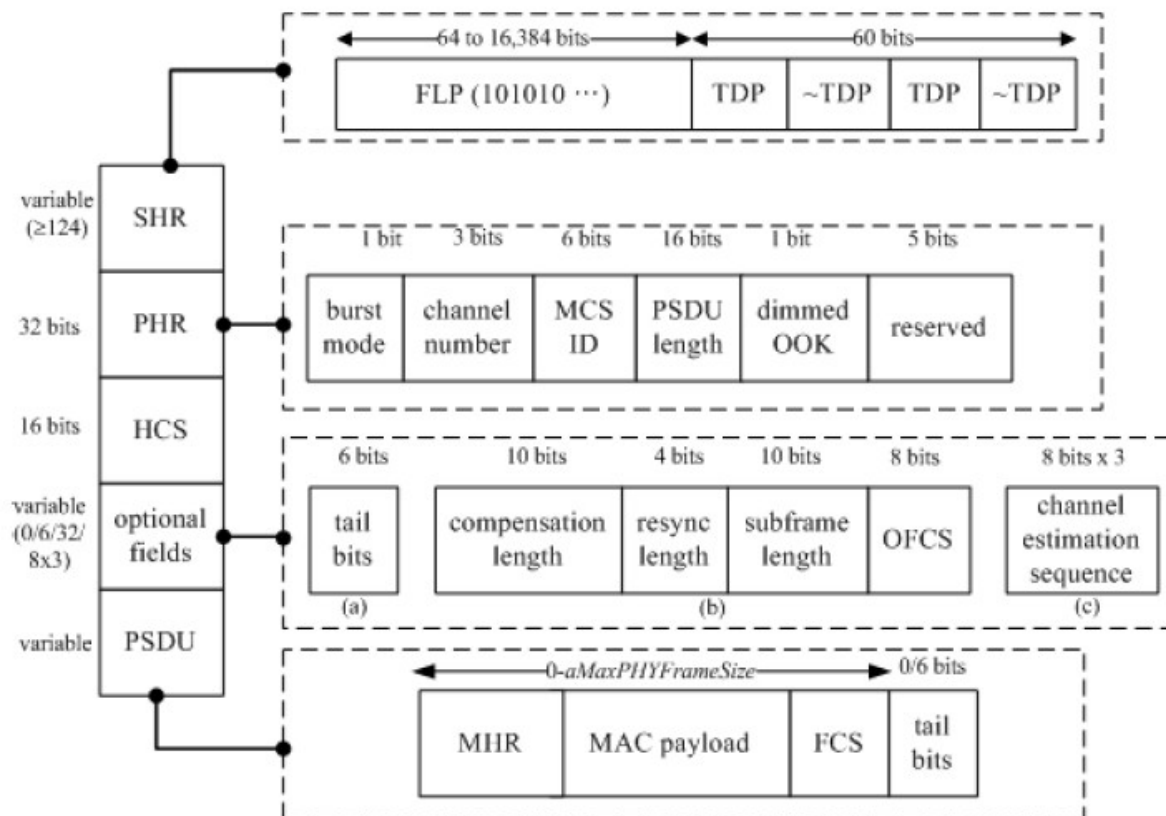


Figura 83: Resumen de la estructura de la trama final IEEE 802.15.7

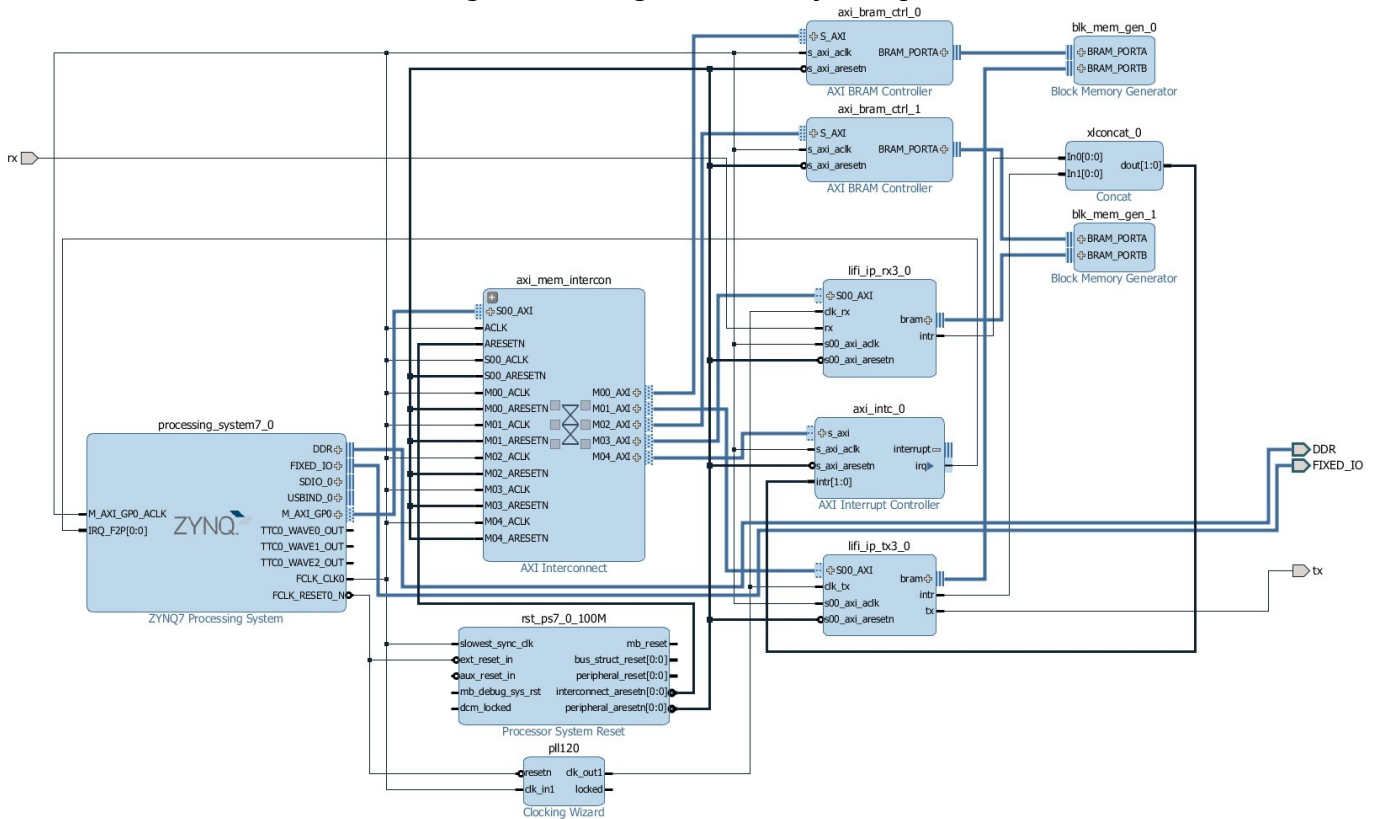
La Tabla 29 recoge los valores finales según el ejemplo que describiremos a continuación para una mejor comprensión:

- **Preámbulo:** Siguiendo las indicaciones del estándar utilizamos un FLP de 64 bits, considerando que con esa longitud será suficiente para sincronizar pero pudiendo incrementarse en caso necesario. En cuanto al TDP, utilizaremos la secuencia P2 (Tabla 25), indicada para topologías peer-to-peer.
- **PHR:**
 - **Cabecera:**
 - **Modo ráfaga:** 0, durante el *streaming* de vídeo usaremos este modo *packed*.
 - **Nº de Canal:** 000, ya que utilizaremos luz LED blanca y el estándar define que en caso de usar transmisión multicanal se utilice el código del pico de transmisión más bajo, y al transmitir en todas las bandas usaremos el menor posible.
 - **MCS ID:** 011101, modo PHY II, con una tasa de transferencia de 96, Mbps, velocidad de reloj de 120 MHz, sin codificación extra de corrección de errores (no se usa código Reed-Solomon), codificación externa 8b10b y modulación OOK.
 - **Longitud PSDU:** 16 bits cuyo valor dependerá de la longitud de la trama de datos que venga de la capa MAC, por lo que usaremos el valor: pppppppppppppppp⁴.
 - **Extensión OOK oscurecimiento:** 1, indicando que usaremos esta propiedad y además indicando que existirán campos adicionales en la trama.
 - **Reservado:** No definido por el estándar y fijado a 11111 por el consorcio.

división de las tramas en subtramas para evitar el oscurecimiento.

- **LC:** 10 bits, cccccccc⁴.
- **LR:** 4 bits, rrrr⁴.
- **LS:** 10 bits, llllllllll⁴.
- **OFCS:** 8 bits de CRC sobre el resto de los campos adicionales: oooooooo⁴.
- **PSDU:** El cuerpo de la trama está compuesto por la información útil proveniente de las capas superiores, en este caso de la MAC, y que es la que se obtuvo en la Tabla 16 como resultado de la descripción del ejemplo.
-

Figura 84: Diagrama de bloques capa PHY



4.8 Diagrama de bloques capa PHY

La capa PHY implementada se puede ver en la Figura 84, este diagrama de bloques representa nuestro SoC, en el hay un bloque principal, “Zynq7 Procesing system”, representa la placa que podemos ver en la Figura 85, el resto de bloques son bloques de control, memorias o de interconexión (colas FIFO para tener control del flujo de datos).



Figura 85: Placa Zybo, Zynq 7000

4.8.1 Memoria

Este HW, como ya se ha dicho, consta de poca memoria, pero necesaria para realizar el procesado. En el diagrama de bloques los encargados de esta función son los denominados “block memory generatos”, ayudados de los “BRAM Controller”, Figura 86. Durante una transmisión de datos tendremos que acumular paquetes en una cola FIFO mientras exista un paquete dentro de nuestro flujo datos. Una vez el paquete se haya procesado se guardara en una cola FIFO de salida y se cogerá otro paquete para comenzar el procesado. El flujo de datos expulsado de las colas FIFOs se por las peticiones que reciban los “BRAM Controller”

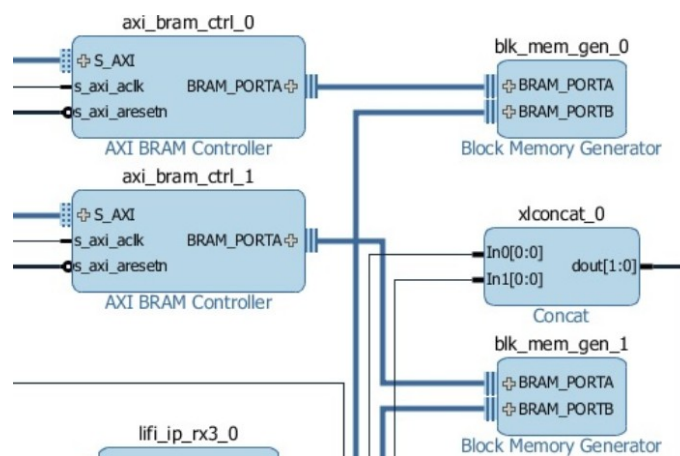


Figura 86: Bloques de memoria

4.8.2 Zynq7 Procesing system y AXI interconnect

Entre estos dos bloques se realizara toda la trama de la capa PHY, desde introducir los preámbulos acordes, hasta realizar un breve CRC para evitar fallos para cerciorar que los datos que se van a mandar son correctos. Este procesado es el explicado en el apartado 4.5 con pequeñas variaciones acordes con el proyecto. Estas variaciones son sensibles y por motivos de seguridad no se publican en el contenido de este trabajo.

4.8.3 Clock Wizard

Reloj del sistema, oscila a una velocidad de 120 Mhz. Esta velocidad de reloj, como se dijo en el apartado 4.5.1, y se puede ver en la Tabla 19, es la necesaria para llegar a una velocidad de transmisión de 96Mb/s. Por motivos que escapan al proyecto, tiempos de entrega, el HW encargado de suministrar la potencia a la lunaria, no se ha podido comprobar aun con este modulo del proyecto, por lo que no se pueden presentar estadísticas de velocidades de transmisión y comparativas con otros proyectos vistos y estudiados con el objetivo de realizarles mejora.

4.8.4 Resultados

A falta de realizar las comprobaciones con el hardware correspondiente a dar la potencia suficiente para poder iluminar el led que realiza al transmisión, los resultados que se han obtenido con la placa son satisfactorios tanto para la complutense como para la empresa Optiva Media, aunque no concluyentes. Esto es debido a que al no haberse podido realizar pruebas en el entorno real no se sabe si es necesario realizar partes adicionales o simples modificaciones, ya sean correspondientes a los protocolos de comunicación, como podría ser una mejora de los CRC para desechar de forma más rápida el paquete en caso de error, o fuera de los protocolos, una placa de adaptación de impedancias para evitar perdidas en las señales de transmisión.

5 Conclusiones y trabajo futuro

Como se ha mencionado durante todo el documento, estamos ante un proyecto que tiene como objetivo llegar a al usuario, para poder proporcionarle un sistema de comunicación inalámbrico alternativo al clásico, con mejores tasas de transferencia, con mayor seguridad, que sea inocuo para la salud y que no produzca contaminación electromagnética, facilitando acceder a sectores como el transporte o sanitario, sensible a este tipo de contaminación (aviones, hospitales..). El lifi cumple estas características ya que las velocidades de transmisiones son de 96Mb/s. La seguridad es innata a este tipo de comunicación, para poder “hackearla” el agresor debe encontrarse debajo de la luminaria. La luz es una componente con la cual se convive a diario, por lo que sabemos no produce ningún efecto nocivo en la salud por lo que no habría posibilidad de difamarlo, y por esta misma razón no se consideraría contaminación electromagnética.

En la duración de este proyecto el CDTI ha realizado dos revisiones del trabajo realizado, la primera revisión fue en la empresa, a nivel teórico del proyecto y diseños realizados durante la primera fase. La segunda revisión pretendía ver a que nivel se encontraba el software y el hardware del proyecto. En ambas visitas la técnico del CDTI salio ampliamente satisfecha de los diseños y resultados mostrados en las actividades en los que participo la Universidad Complutense. Por otro lado la propia empresa, Optiva Media, también a transmitido su satisfacción ante el proyecto y la colaboración en el proyecto con la Universidad Complutense en relación al diseño de los protocolos.

Por motivos de colaboración y contrato de confidencialidad firmado con la empresa una gran mayoría de los datos y resultados obtenidos son sensibles ante la publicación. Con los resultados mostrados y a falta de obtener nuevos se puede decir que la implementación de los protocolos ha sido un éxito, además y gracias al tipo de sistema que se ha utilizado para ello hay un gran margen de mejora ya se realizando modificaciones en el software/hardware que se ha visto en el documento y/o en hardware externo.

Aprovechando el tipo de tecnología que se ha utilizado, es posible cambiar ciertos sectores del sistema para aumentar la velocidad de transmisión. Actualmente, en el proyecto ,la modulación OOK se realiza sobre un led de luz blanca, si aplicáramos algunos cambios sobre los códigos y se aplicara la modulación sobre tres leds de colores básicos (RGB), estos producirían una luz blanca y cada uno de ellos estaría transmitiendo, llegando a poder triplicar la velocidad de transmisión, en este caso se estaría empleando una multiplexación en la frecuencia (MDF) de emisión.

Otro posibilidad para aumentar la velocidad de transmisión es cambiar el tipo de modulación. Como se ha visto la modulación OOK utiliza una frecuencia de reloj muy elevado comparada con otro tipo de modulaciones, por lo que si es posible realizar modulaciones como CS16 que necesitan velocidades de reloj más baja para llegar a los 96Mb/s, seria posible aumentar al menos en un orden de magnitud esta velocidad.

6 Referencias

- [1] S. Chen y J. Zhao, «The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, n.º 5, pp. 36-43, may 2014.
- [2] U. N. S. C. on the E. of A. R. (unscear), «Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1996 report to the General Assembly, with scientific annex», 1996.
- [3] C. K. Bomford y I. H. Kunkler, *Walter and Miller's Textbook of Radiotherapy: Radiation Physics, Therapy, and Oncology*. Churchill Livingstone, 2003.
- [4] L. K. Wagner, P. J. Eifel, y R. A. Geise, «Potential Biological Effects Following High X-ray Dose Interventional Procedures», *J. Vasc. Interv. Radiol.*, vol. 5, n.º 1, pp. 71-84, ene. 1994.
- [5] W. H. Organization y I. P. on C. Safety, «Ultraviolet radiation: an authoritative scientific review of environmental and health effects of UV, with reference to global ozone layer depletion», 1994. Diseño de los códigos de comunicaciones
- [6] J. M. Rovira, «NTP 234: Exposición a radiofrecuencias y microondas (I). Evaluación». Instituto Nacional de Seguridad e higiene en el trabajo.
- [7] G. Barué, *Microwave Engineering: Land & Space Radiocommunications*. John Wiley & Sons, 2008.
- [8] P. Simonson, J. Peck, R. T. Craig, y J. Jackson, *The Handbook of Communication History*. Routledge, 2013.
- [9] A. A. Huurdeman, *The Worldwide History of Telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [10] L. Coe, *Wireless Radio: A Brief History*. McFarland, 1996.
- [11] A. G. Bell, «The Photophone», *Sci. Am.*, vol. 10, pp. 3921-3923, 1880.
- [12] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, y S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®*. CRC Press, 2012.
- [13] F. R. Gfeller y U. Bapst, «Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation», *Proc. IEEE*, vol. 67, n.º 11, pp. 1474-1486, nov. 1979.
- [14] J. M. Kahn y J. R. Barry, «Wireless infrared communications», *Proc. IEEE*, vol. 85, n.º 2, pp. 265-298, feb. 1997.
- [15] J. B. Carruther y J. M. Kahn, «Angle diversity for nondirected wireless infrared communication», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, n.º 6, pp. 960-969, jun. 2000.
- [16] D. K. Borah, A. C. Boucouvalas, C. C. Davis, S. Hranilovic, y K. Yiannopoulos, «A review of communication-oriented optical wireless systems», *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2012, n.º 1, pp. 1-28, mar. 2012.
- [17] E. F. Schubert, T. Gessmann, y J. K. Kim, «Light Emitting Diodes», en *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [18] S. Dimitrov y H. Haas, *Principles of LED Light Communications*. Cambridge University Press, 2015.
- [19] G. Pang, K.-L. Ho, T. Kwan, y E. Yang, «Visible light communication for audio systems», *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 45, n.º 4, pp. 1112-1118, nov. 1999.
- [20] T. Komine y M. Nakagawa, «Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights», *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 50. Diseño de los códigos de comunicaciones
- [21] T. Q. Khan, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, y H. Winkler, *LED Lighting: Technology and Perception*. John Wiley & Sons, 2014.
- [22] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, y M. Nakagawa, «Indoor Visible Light Data Transmission System Utilizing White LED Lights», *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86-B, n.º 8, pp. 2440-2454, ago. 2003.
- [23] J. Grubor, S. Randel, K.-D. Langer, y J. Walewski, «Bandwidth-efficient indoor optical wireless communications with white light-emitting diodes», en *6th International Symposium*

- on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008. CNSDSP 2008, 2008, pp. 165-169.
- [24] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, y E. T. Won, «100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using a Postequalized White LED», *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, 1063 - 1065, 2009.
- [25] J. Vučić, C. Kottke, S. Nerreter, K.-D. Langer, y J. W. Walewski, «513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED», *J. Light. Technol.*, vol. 28, n.º 24, pp. 3512-3518, dic. 2010.
- [26] J. Vucic, C. Kottke, K. Habel, y K.-D. Langer, «803 Mbit/s Visible Light WDM Link based on DMT Modulation of a Single RGB LED Luminary», 2011, p. OWB6.
- [27] A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini, P. Choudhury, y E. Ciaramella, «1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation», *IEEE Photonics J.*, vol. 4, n.º 5, pp. 1465-1473, oct. 2012.
- [28] G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, y E. Ciaramella, «34 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED», *Opt. Express*, vol. 20, n.º 26, p. B501, dic. 2012.
- [29] A. H. Azhar, T. Tran, y D. O'Brien, «A Gigabit/s Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible-Light Communications», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, n.º 2, pp. 171-174, ene. 2013.
- [30] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, and J. D. McKendry, «A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride», *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, 637-640, 2014.
- [31] «Visible Light Communications Consotium (VLCC) - Greeting from Honorary Chairman». [En línea]. Disponible en: <http://www.vlcc.net/modules/xpage1/>.
- [32] «JEITA / JEITA Standards / AV&IT Technology Standardization / Visible Light Communications». [En línea]. Disponible en: http://www.jeita.or.jp/cgi-bin/standard_e/list.cgi?cateid=1&subcateid=50.
- [33] «The Infrared Data Association (IrDA) and Visible Light Communications Consortium...», *Reuters*, 04-sep-2008.
- [34] «Visible Light Communications Consortium (VLCC) Released Visible Light Communication Standard Based on IrDA Core Specification», *Reuters*, 12-mar-2009.
- [35] S. Rajagopal, R. D. Roberts, y S. K. Lim, «IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, n.º 3, pp. 72-82, mar. 2012.
- [36] S. Hranilovic y F. R. Kschischang, «Optical intensity-modulated direct detection channels: signal space and lattice codes», *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, n.º 6, pp. 1385-1399, jun. 2003.
- [37] V. Pohl, V. Jungnickel, y C. von Helmolt, «A channel model for wireless infrared communication», en *The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. PIMRC 2000, 2000*, vol. 1, pp. 297-303 vols.1.
- [38] K. Cui, G. Chen, Z. Xu, y R. D. Roberts, «Line-of-sight visible light communication system design and demonstration», en *2010 7th International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2010, pp. 621-625.
- [39] X. Zhang, K. Cui, M. Yao, H. Zhang, y Z. Xu, «Experimental characterization of indoor visible light communication channels», en *2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2012, pp. 1-5.
- [40] J. R. García, J. M. Virgós, y J. M. V. Rovira, *Fundamentos de óptica ondulatoria*. Universidad de Oviedo, 1999.
- [41] R. Küller, S. Ballal, T. Laike, B. Mikellides, y G. Tonello, «The impact of light and colour on psychological mood: a cross-cultural study of indoor work environments», *Ergonomics*, vol. 49, n.º 14, pp. 1496-1507, nov. 2006.

- [42] E. D. Adrian, «The electric response of the human eye», *J. Physiol.*, vol. 104, n.º 1, pp. 84-104, jun. 1945.
- [43] «A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part I - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/6901/en/>.
- [44] A. Moreira, R. Valadas, y A. O. Duarte, «Characterisation and modelling of artificial light interference in optical wireless communication systems», *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1995. PIMRC'95. Wireless: Merging onto the Information Superhighway., Sixth IEEE International Symposium on*, vol. 1, 326-331, 1995.
- [45] H. Haas, *Wireless data from every light bulb*. 2011.
- [46] BBC Mundo Tecnología, «LiFi: cien veces más rápido que el wifi», *BBC Mundo*, 02-nov-2015. [En línea]. Disponible en: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151125_tecnologia_lifi_mas_rapido_wifi_il.
- [47] E. E. País, «Una conexión a Internet 100 veces más rápida que el WiFi», *EL PAÍS*, 31-dic-2015. [En línea]. Disponible en: http://tecnologia.elpais.com/tecnologia/2015/12/22/actualidad/1450804305_172717.html.
- [48] J. L. Tazón, «El iPhone 7 además será LiFi», *ELMUNDO*, 19-ene-2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.elmundo.es/tecnologia/2016/01/19/569e5e0046163fe72a8b45e3.html>.
- [49] M. C. E. Boquera, *Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Ediciones Díaz de Santos, 2005.
- [50] D. Tsonev, S. Videv, y H. Haas, «Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking», 2013, vol. 9007, pp. 900702-900702-10.
- [51] E. Sarbazi, M. Uysal, M. Abdallah, y K. Qaraqe, «Ray tracing based channel modeling for visible light communications», 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 702-705, 2014.
- [52] A. A. Farid y S. Hranilovic, «Capacity Bounds for Wireless Optical Intensity Channels With Gaussian Noise», *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, n.º 12, pp. 6066-6077, dic. 2010.
- [53] B. Rahimzadeh Rofoee, Kostas katsalis, Y. Yan, Y. Shu, T. Korakis, L. Tassiulas, A. Tzanakaki, G. S. Zervas, y D. E. Simeonidou, «First Demonstration of Service-Differentiated Converged Optical Sub-Wavelength and LTE/WiFi Networks over GEANT», 2015, p. Th2A.35.
- [54] R. P. Gilliard, M. DeVincentis, A. Hafidi, D. O'Hare, y G. Hollingsworth, «Operation of the LiFi Light Emitting Plasma in Resonant Cavity», *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 39, n.º 4, pp. 1026-1033, abr. 2011.
- [55] R. Honick, *Software Piracy Exposed*. Syngress, 2005.
- [56] J. Cowley, *Communications and Networking: An Introduction*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [57] M. B. Rahaim, A. M. Vegni, y T. D. C. Little, «A hybrid Radio Frequency and broadcast Visible Light Communication system», en *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011, pp. 792-796.
- [65] «IEEE 802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)». [En línea]. Disponible en: <http://ieee802.org/15/index.html>.
- [66] G. Ntogari, T. Kamalakis, J. Walewski, y T. Sphicopoulos, «Combining Illumination Dimming Based on Pulse-Width Modulation With Visible-Light Communications Based on Discrete Multitone», *IEEEOSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, n.º 1, pp. 56-65, ene. 2011.
- [67] G. R. McClain, *Open systems interconnection handbook*. Intertext Publications, 1991.
- [68] E. Herrera, *Tecnologías y redes de transmisión de datos*. Limusa, 2003.
- [69] F. M. Navarro, J. D. Corrales, M. L. G. Villar, A. S. D. L. Torre, E. A. P. Cifredo, y L. M.

Olivas, *Técnicos de soporte informático de la comunidad de Castilla y León. Temario volumen i*. MAD-Eduforma, 2006.

- [70] C. P. Vega y J. M. Z. S. de la Maza, *Fundamentos de televisión analógica y digital*. Ed. Universidad de Cantabria, 2003.
- [71] M. Pelcat, S. Aridhi, J. Piat, y J.-F. Nezan, *Physical Layer Multi-Core Prototyping: A Dataflow-Based Approach for LTE eNodeB*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [72] L. Guzzella, *Analysis and Synthesis of Single-Input/Single-Output Control Systems*. vdf Hochschulverlag AG, 2011.
- [73] N. P. Mahalik, *Sensor Networks and Configuration: Fundamentals, Standards, Platforms, and Applications*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [74] IEEE Std. 802.15.7-2011, «IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light», *IEEE Std 802157-2011*, pp. 1-309, sep. 2011.
- [75] I. Demirkol, C. Ersoy, y F. Alagoz, «MAC protocols for wireless sensor networks: a survey», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, n.º 4, pp. 115-121, abr. 2006.
- [76] B. G. Lee y S. Choi, *Broadband Wireless Access and Local Networks: Mobile WiMax and WiFi*. Artech House, 2008.
- [77] R. Mesleh, H. Elgala, y H. Haas, «Optical Spatial Modulation», *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, n.º 3, p. 234, mar. 2011.
- [78] F. M. Wu, C. T. Lin, C. C. Wei, C. W. Chen, H. T. Huang, y C. H. Ho, «1.1-Gb/s White-LED-Based Visible Light Communication Employing Carrier-Less Amplitude and Phase Modulation», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, n.º 19, pp. 1730-1732, oct. 2012.
- [79] T. Komine, S. Haruyama, y M. Nakagawa, «Performance evaluation of narrowband OFDM on integrated system of power line communication and visible light wireless communication», en *2006 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, 2006, p. 6 pp.-pp.
- [80] M. Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala, y D. Knipp, «Visible light communication using OFDM», en *2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2006. TRIDED* Diseño de los códigos de comunicaciones
- [81] A. N. Barreto y S. Furrer, «Adaptive bit loading for wireless OFDM systems», en *2001 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2001, vol. 2, p. G-88-G-92 vol.2.
- [82] J. Armstrong y A. J. Lowery, «Power efficient optical OFDM», *Electron. Lett.*, vol. 42, n.º 6, pp. 370-372, mar. 2006.
- [83] S. D. Dissanayake y J. Armstrong, «Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems», *J. Light. Technol.*, vol. 31, n.º 7, pp. 1063-1072, abr. 2013.
- [84] S. D. Dissanayake, K. Panta, y J. Armstrong, «A novel technique to simultaneously transmit ACO-OFDM and DCO-OFDM in IM/DD systems», en *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011, pp. 782-786.
- [85] H. Elgala and D. C. Little, "Reverse polarity optical-OFDM (RPO-OFDM): dimming compatible OFDM for gigabit VLC links," *Opt. Express* 21, 24288-24299 (2013).
- [86] S. C. J. Lee, S. Randel, F. Breyer, y A. M. J. Koonen, «PAM-DMT for Intensity-Modulated and Direct-Detection Optical Communication Systems», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 21, n.º 23, pp. 1749-1751, dic. 2009.
- [87] Q. Wang, Z. Wang, y L. Dai, «Asymmetrical Hybrid Optical OFDM for Visible Light Communications With Dimming Control», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 27, n.º 9, pp. 974-977, may 2015.
- [88] M. S. A. Mossaad, S. Hranilovic, y L. Lampe, «Visible Light Communications Using OFDM and Multiple LEDs», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, n.º 11, pp. 4304-4313, nov. 2015.

- [89] N. Fernando, Y. Hong, y E. Viterbo, «Flip-OFDM for Unipolar Communication Systems», *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, n.º 12, pp. 3726-3733, dic. 2012.
- [90] D. Tsonev, S. Sinanovic, y H. Haas, «Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless», en *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012 IEEE 75th*, 2012, pp. 1-5. Diseño de los códigos de comunicaciones
- [91] D. Tsonev, S. Videv, y H. Haas, «Unlocking Spectral Efficiency in Intensity Modulation and Direct Detection Systems», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, n.º 9, pp. 1758-1770, sep. 2015.
- [92] M. Noshad y M. Brandt-Pearce, «Hadamard Coded Modulation for Visible Light Communications», *IEEE Trans. Commun.*, vol. PP, n.º 99, pp. 1-1, 2016.
- [93] E. Monteiro y S. Hranilovic, «Constellation design for color-shift keying using interior point methods», en *2012 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2012, pp. 1224-1228.
- [94] P. M. Butala, J. C. Chau, y T. D. C. Little, «Metameric modulation for diffuse visible light communications with constant ambient lighting», en *2012 International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*, 2012, pp. 1-3.
- [95] K. I. Ahn y J. K. Kwon, «Color Intensity Modulation for Multicolored Visible Light Communications», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, n.º 24, pp. 2254-2257, dic. 2012.
- [96] S. Bottacchi, *Theory and Design of Terabit Optical Fiber Transmission Systems*. Cambridge University Press, 2014.
- [97] P. Vandenameele, L. V. D. Perre, y M. Engels, *Space Division Multiple Access for Wireless Local Area Networks*. Springer Science & Business Media, 2001.
- [98] K. Kitayama, *Optical Code Division Multiple Access: A Practical Perspective*. Cambridge University Press, 2014.
- [99] E. Dahlman, C. Oestges, A. C. Bovik, B. A. Fette, K. Jack, F. Dowla, S. Parkvall, J. Skold, C. DeCusatis, E. da Silva, R. Olexa, B. Clerckx, L. M. Correia, P. A. Chou, M. van der Schaar, W. K. Ling, R. Kitchen, D. M. Dobkin, D. Bensky, D. Morgan, J. Ellis, C. Pursell, J. Rahman, L. Guibas, y F. Zhao, *Communications Engineering Desk Reference*. Academic Press, 2009.
- [100] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, y K. Higuchi, «Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access», en *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th*, 2013, pp. 1-5.
- [101] H. Marshoud, V. M. Kapinas, G. K. Karagiannidis, y S. Muhaidat, «Non-Orthogonal Multiple Access for Visible Light Communications», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 28, n.º 1, pp. 51-54, ene. 2016.
- [102] Z. Jiang, B. Han, P. Chen, F. Yang, Q. Bi, Z. Jiang, B. Han, P. Chen, F. Yang, y Q. Bi, «Design of Joint Spatial and Power Domain Multiplexing Scheme for Massive MIMO Systems, Design of Joint Spatial and Power Domain Multiplexing Scheme for Massive MIMO Systems», *Int. J. Antennas Propag. Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2015, 2015, p. e368463, nov. 2015.
- [110] Y. Tan y W. Chung, «Mobile health–monitoring system through visible light communication - IOS Press», *Bio-Medical Materials and Engineering*, vol. 24, no. 6, pp. 3529-3538, 2014.
- [111] J. Tan y F. C. Payton, *Adaptive Health Management Information Systems: Concepts, Cases, & Practical Applications*. Jones & Bartlett Learning, 2010.
- [112] H. Elgala, R. Mesleh, y H. Haas, «Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, n.º 9, pp. 56-62, sep. 2011.
- [113] I. H. Park, Y. H. Kim, y J. Y. Kim, «Interference mitigation scheme of visible light communication systems for aircraft wireless applications», en *2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2012, pp. 355-356.
- [114] L. C. Png, S. X. Lim, A. Rajamohan, B. W. Chan, y F. A. Hazman, «Designs of VLC

- transceiver circuits for reading light transmission of high-quality audio signals on commercial airliners», en *2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, 2014, pp. 97-98.
- [115] J. Shen y J. Chen, «A Visible Light Communication based Aircraft Cabin Wireless Network Demo System», 2015, p. AM1E.1.
- [116] V. M. Baeza, M. Sánchez-Fernández, A. G. Armada, y A. Royo, «Testbed for a LiFi system integrated in streetlights», en *2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2015, pp. 517-521.
- [117] M. Akanegawa, Y. Tanaka, y M. Nakagawa, «Basic study on traffic information system using LED traffic lights», *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 2, n.º 4, pp. 197-203, dic. 2001.
- [118] A. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, S. Topsu, Y. Alayli, y J. M. Blosseville, «Visible light communications: Application to cooperation between vehicles and road infrastructures», en *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2012, pp. 1055-1059.
- [119] F. Bai, D. D. Stancil, y H. Krishnan, «Toward Understanding Characteristics of Dedicated Short Range Communications (DSRC) from a Perspective of Vehicular Network Engineers», en *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, NY, USA, 2010, pp. 329-340.
- [120] T. Saito, S. Haruyama, y M. Nakagawa, «A New Tracking Method using Image Sensor and Photo Diode for Visible Light Road-to-Vehicle Communication», en *10th International Conference on Advanced Communication Technology, 2008. ICACT 2008*, 2008, vol. 1, pp. 673-678.
- [121] P. Luo, M. Zhang, X. Zhang, G. Cai, D. Han, y Q. Li, «An indoor visible light communication positioning system using dual-tone multi-frequency technique», en *2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*, 2013, pp. 25-29.
- [122] J. Armstrong, Y. A. Sekercioglu, y A. Neild, «Visible light positioning: a roadmap for international standardization», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, n.º 12, pp. 68-73, dic. 2013.
- [123] S.-H. You, S.-H. Chang, H.-M. Lin, y H.-M. Tsai, «Visible Light Communications for Scooter Safety», en *Proceeding of the 11th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, New York, NY, USA, 2013, pp. 509-510.
- [124] T. D. C. Little, A. Agarwal, J. Chau, M. Figueroa, A. Ganick, J. Lobo, T. Rich, y P. Schimitsch, «Directional communication system for short-range vehicular communications», en *2010 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2010, pp. 231-238.
- [125] S. H. Yu, O. Shih, H. M. Tsai, N. Wisitpongphan, y R. D. Roberts, «Smart automotive lighting for vehicle safety», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, n.º 12, pp. 50-59, dic. 2013.
- [126] P. Luo, Z. Ghassemlooy, H. L. Minh, E. Bentley, A. Burton, y X. Tang, «Fundamental analysis of a car to car visible light communication system», en *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2014, pp. 1011-1016.
- [127] P. Luo, Z. Ghassemlooy, H. L. Minh, E. Bentley, A. Burton, y X. Tang, «Performance analysis of a car-to-car visible light communication system», *Appl. Opt.*, vol. 54, n.º 7, p. 1696, mar. 2015.
- [134] C.-S. Wang, C.-H. Huang, Y.-S. Chen, y L.-J. Zheng, «An implementation of positioning system in indoor environment based on active RFID», en *2009 Joint Conferences on Pervasive Computing (JCPC)*, 2009, pp. 71-76.
- [135] J. Zhou, K. M. K. Chu, y J. K. Y. Ng, «Providing location services within a radio cellular network using ellipse propagation model», en *19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05) Volume 1 (AINA papers)*, 2005, vol. 1, pp. 559-564 vols.1.

- [136] Y. Liu y Y. Wang, «A novel positioning method for WLAN based on propagation modeling», en *2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC)*, 2010, vol. 1, pp. 397-401.
- [137] L. T. Son y P. Orten, «Enhancing Accuracy Performance of Bluetooth Positioning», en *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2007, pp. 2726-2731.[134] C.-S. Wang, C.-H. Huang, Y.-S. Chen, y L.-J. Zheng, «An implementation of positioning system in indoor environment based on active RFID», en *2009 Joint Conferences on Pervasive Computing (JCPC)*, 2009, pp. 71-76.
- [135] J. Zhou, K. M. K. Chu, y J. K. Y. Ng, «Providing location services within a radio cellular network using ellipse propagation model», en *19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05) Volume 1 (AINA papers)*, 2005, vol. 1, pp. 559-564 vols.1.
- [136] Y. Liu y Y. Wang, «A novel positioning method for WLAN based on propagation modeling», en *2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC)*, 2010, vol. 1, pp. 397-401.
- [137] L. T. Son y P. Orten, «Enhancing Accuracy Performance of Bluetooth Positioning», en *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2007, pp. 2726-2731.
- [138] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, y J. Liu, «Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems», *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 37, n.º 6, pp. 1067-1080, nov. 2007.
- [139] W. Zhang y M. Kavehrad, «A 2-D indoor localization system based on visible light LED», en *2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, 2012, pp. 80-81.
- [140] Z. Zhou, «Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications», *Opt. Eng.*, vol. 51, n.º 8, p. 85009, ago. 2012.
- [141] K. Panta y J. Armstrong, «Indoor localisation using white LEDs», *Electron. Lett.*, vol. 48, n.º 4, pp. 228-230, feb. 2012.
- [142] Y. U. Lee y M. Kavehrad, «Two hybrid positioning system design techniques with lighting LEDs and ad-hoc wireless network», *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 58, n.º 4, pp. 1176-1184, nov. 2012.
- [143] S. Y. Jung, S. Hann, y C. S. Park, «TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps», *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 57, n.º 4, pp. 1592-1597, nov. 2011.
- [144] T. Tanaka y S. Haruyama, «New Position Detection Method Using Image Sensor and Visible Light LEDs», en *Proceedings of the 2009 Second International Conference on Machine Vision*, Washington, DC, USA, 2009, pp. 150–153.
- [145] S. Hann, J. H. Kim, S. Y. Jung, y C. S. Park, «White LED ceiling lights positioning systems for optical wireless indoor applications», en *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2010, pp. 1-3.
- [146] Y. U. Lee, S. Baang, J. Park, Z. Zhou, y M. Kavehrad, «Hybrid positioning with lighting LEDs and Zigbee multihop wireless network», 2012, p. 82820L-82820L-7.
- [147] Z. Wang, D. Tsonev, S. Videv, y H. Haas, «On the Design of a Solar-Panel Receiver for Optical Wireless Communications With Simultaneous Energy Harvesting», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, n.º 8, pp. 1612-1623, ago. 2015.
- [148] I. Demirkol, C. Ersoy, F. Alagoz, y others, «MAC protocols for wireless sensor networks: a survey», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, n.º 4, pp. 115–121, 2006.
- [149] J. M. Kahn y J. R. Barry, «Wireless infrared communications», *Proc. IEEE*, vol. 85, n.º 2, pp. 265–298, 1997.
- [150] A. X. Widmer y P. A. Franzoszek, «A DC-balanced, Partitioned-block, 8B/10B Transmission Code», *IBM J Res Dev*, vol. 27, n.º 5, pp. 440–451, sep. 1983.