



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**Máster Universitario**  
en Tecnologías, Sistemas y  
Redes de Comunicaciones

# Sistemas VLC Para Comunicaciones e Iluminación Indoor

*Autor:* Diego Fernando Intriago Rodríguez

*Directora:* Beatriz Ortega Tamarit

*Fecha de comienzo:* 21/05/2018

*Lugar de trabajo:* Grupo de Sistemas Ópticos y Comunicaciones Inalámbricas

*Objetivos* — Este trabajo tiene como objetivo estudiar los diferentes componentes que son necesarios para implementar un sistema para comunicaciones e iluminación indoor, basados en tecnologías ópticas de comunicaciones inalámbricas en el visible, VLC. A partir de este estudio se realizarán varias propuestas viables apoyadas en esquemas previos publicados que se han estudiado con detalle a lo largo del trabajo.

*Metodología* — Ha sido necesario estudiar los diferentes tipos de componentes empleados en los sistemas de comunicación óptica inalámbrica en la región del VLC, así como los parámetros que caracterizan el enlace de comunicación e iluminación. Para lo cual se trabajó en la revisión y estudio de publicaciones orientadas hacia el VLC y de los productos del mercado.

*Desarrollos teóricos realizados* — Se estudiaron los parámetros, estructura de componentes, técnicas de comunicación, métodos de modulación, tecnologías empleadas en los dispositivos actuales, diseño y parámetros de las celdas, todo orientado a la capacidad de iluminación y transmisión. La propuesta basada en componentes actuales incluye el cálculo de iluminación en una red VLC para entorno indoor.

*Desarrollo de prototipos* — Se analizaron varios esquemas publicados, para posteriormente generar un esquema de planificación que permita implementar los componentes propuestos en las distintas alternativas, en un futuro demostrador experimental.

*Resultados* — Como resultado se han realizado varias propuestas, basado en componentes de distintos fabricantes que permiten implementar una red indoor de comunicaciones VLC.

*Líneas futuras* — Simulación-teórica de la cobertura de datos e iluminación, en la sala utilizando los parámetros experimentales que facilitan los fabricantes. Montaje experimental del sistema y medida de ancho de banda, cobertura e iluminación.

*Publicaciones* — Ninguna

*Abstract* — Visible Light Communication (VLC) is an emerging field in Optical Wireless Communication (OWC) which utilizes the direct modulation of Light Emitting Diodes (LEDs) to transmit data. In current communication systems, the most popular frequency band is Radio Frequency (RF) mainly due to little interference and good coverage. Visible Light Communications (VLC) is increasingly attracting not only the interest of researchers as a challenge to replace or complement WIFI in the future but also companies to remain positioned in the market and increase their capital. Several years ago, when LEDs were an interesting combination and variation of lighting, generating greater energy and economic savings, expectations were already created regarding the development and technological impact that can be developed on part of the spectrum, specifically on the visible. Technologies have been developed that make it possible to take advantage of this channel and variants of these technologies that are coupled to the chemical elaboration and photonic principles of the LEDs, allowing advanced modulations with higher bitrate efficiency. Based on this, we study schemes oriented towards power, coverage and bitrates, providing us the opportunity to study the current market in order to make a list of feasible components to employ in several proposals to implement in a converged scenario with multiple functionalities and the VLC system well known advantages.

Autor: Intriago Rodríguez, Diego email: [dieinrod@teleco.upv.es](mailto:dieinrod@teleco.upv.es)

Directora: Ortega Tamarit, Beatriz email: [bortega@dcom.upv.es](mailto:bortega@dcom.upv.es)

Fecha de entrega: 11-09

## ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>II. FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS VLC .....</b>	<b>5</b>
II.1. TRANSMISOR VLC .....	5
II.2. RECEPTOR VLC.....	6
II.3. TÉCNICAS DE COMUNICACIONES VLC.....	7
II.3.1 MÉTODOS DE MODULACIÓN .....	8
II.3.2 TECNOLOGÍA EMPLEADA PARA LA COMUNICACIÓN .....	12
II.4. MODELO DE PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL .....	13
II.4.1. POTENCIA TRANSMITIDA POR EL LED .....	14
II.4.2. RUIDO EN EL RECEPTOR Y SNR.....	17
II.5 DISEÑO DE LAS CELDAS .....	18
<b>III. ESTADO DEL MERCADO ACTUAL: COMPONENTES.....</b>	<b>20</b>
<b>IV. ANÁLISIS DE LAS DEMOSTRACIONES EXPERIMENTALES PREVIAS.....</b>	<b>32</b>
IV.1. INDOOR OPTICAL WIRELESS SYSTEMS: TECHNOLOGY, TRENDS, AND APPLICATIONS .....	32
IV.2 WIRELESS VISIBLE LIGHT COMMUNICATION EMPLOYING FEED- EQUALIZATION AND PAM-4 MODULATION.	FORWARD PRE- 34
IV.3. $\mu$ LED-BASED SINGLE-WAVELENGTH BI-DIRECTIONAL POF LINK DATE RATE	WITH 10 GB/S AGGREGATE 35
IV.4. HYBRID POF/VLC LINK WITH M-PAM AND MLP EQUALISER.....	36
<b>V. PROPUESTA DE SISTEMA VLC.....</b>	<b>37</b>
V.1. DEFINICIÓN DE ESCENARIO.....	37
V.2. SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	38
V.3. PLANIFICACIÓN .....	43
<b>VI. CONCLUSIONES.....</b>	<b>45</b>
<b>VII. REFERENCIAS .....</b>	<b>46</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>48</b>
ANEXO 1 COMPONENTES DEL QUE SE ENCUETRAN EN EL MERCADO ACTUAL .....	48
ANEXO 2 DISEÑO DE ESCENARIO .....	52

## I. INTRODUCCIÓN

La bombilla incandescente que ha sido largamente manejada para la iluminación en nuestro entorno desde que se inventó hace más de un siglo está siendo reemplazada paulatinamente debido a su extremada baja eficiencia energética. En las más moderna bombillas incandescentes, no más del 10% de la energía eléctrica se convierte en luz emitida útil. Por otra parte las bombillas fluorescentes compactas introducidas en la década de 1990 han ganado popularidad en la última década ya que proporcionan una mejor eficiencia energética (más lúmenes por watt). Sin embargo, los más recientes avances en la iluminación están basados en tecnología LED, esta tecnología ha permitido una eficiencia energética y una prolongación de la luminaria muy satisfactoria. La eficacia luminosa media (cuánta electricidad se utiliza para proporcionar la iluminación deseada) de los mejores LEDs en su clase es de hasta 113 lúmenes/watt en 2015, y se proyecta que sea de alrededor de 200 lúmenes/watt para el año 2020. De esta manera se proyecta un aumento muy significativo en comparación con las bombillas incandescentes y fluorescentes actuales, que proporcionan una eficacia luminosa media de 15 y 60 lúmenes/watt respectivamente. La vida útil de los LEDs oscila en el rango de 25 000 y 50 000 horas, significativamente superior a la de los fluorescentes compactos (10 000 horas). Además del ahorro de energía y las ventajas de duración, los LEDs también tienen otras ventajas; un menor uso de materiales nocivos en el diseño y una menor generación de calor incluso después de un largo período de uso continuo. Debido a estos beneficios, la decisión de optar por la tecnología LED está en constante aumento y se espera que casi el 75% de toda la iluminación sea proporcionada por LEDs para el año 2030.

Los LEDs son capaces de cambiar a diferentes niveles de intensidad de luz a un ritmo muy rápido a diferencia de las antiguas tecnologías de iluminación. La frecuencia de conmutación es lo suficientemente rápida lo que la hace imperceptible para un ojo humano. Esta funcionalidad se puede utilizar para la comunicación en la que los datos se codifican, permitiendo generar en este documento el estudio de las diferentes maneras de codificación en la luz emitida. Un fotodetector (también llamado sensor de luz o fotodiodo) ya sea PIN “Fig. 1” o APD “Fig. 2”, pueden recibir las señales moduladas y decodificar los datos. Esto significa que los LEDs pueden servir para proporcionar iluminación y comunicación como se detalla en la sección II. En los últimos dos años según los artículos estudiados en la sección IV, la investigación de VLC ha demostrado que es capaz de alcanzar velocidades de datos muy altas (casi 100 Mbps en el estándar IEEE 802.15.7, estándar para comunicaciones inalámbricas por el VLC a corta distancia). La comunicación a través de luz visible tiene especial importancia en comparación con las formas de comunicación inalámbrica existentes. Una de las principales ventajas es que se muestra como una solución para el aumento exponencial del tráfico de datos móviles en las últimas dos décadas, se han identificado las limitaciones de las comunicaciones móviles sólo de RF. Incluso con una frecuencia eficiente y una reutilización

espacial, el espectro de RF actual está demostrando ser escaso para satisfacer la creciente demanda de tráfico. [1]

Dentro de las secciones de este documento, hemos incluido los fundamentos de los sistemas VLC, que me permitan conocer los diferentes tipos de LED, características, composición química, modo de funcionalidad de acuerdo a su elaboración y estructura para la transmisión. De la misma manera la estructura de los fotodetectores que reciban y creen un enlace, considerando la configuración del receptor. Las técnicas de comunicaciones con sus diversas modulaciones y tecnologías, permitiéndonos elegir la más óptima para generar velocidades altas de transmisión. Los parámetros fotométricos y radiométricos, el diseño de sus celdas de acuerdo a la estructura de mi espacio a iluminar y transmitir. El estudio del mercado actual con los diferentes componentes ofertados por varias empresas, sus diferentes propuestas implementadas en diversos sectores y aun investigando la forma de acelerar el proceso de masificación y pronta llegada de este tipo de comunicación inalámbrica a niveles macro. El análisis de diversas publicaciones orientadas a demostrar capacidades de velocidades altas a consecuencia de modificaciones en las modulaciones, elementos de transmisión, recepción, enlaces híbridos y diferentes tecnologías empleadas para la comunicación. Facultando la elaboración de enlistar componentes seleccionados y concebir un escenario en los que se pueda aplicar y dotar de iluminación y transmisión; visualizando un escenario futurista descrito en una planificación.

## **II. FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS VLC**

### *II.1. TRANSMISOR VLC*

El transmisor de un sistema de comunicación por la luz visible es un LED, capaz de emitir luz LED, dentro de la capacidad de emitir datos y generar iluminación, a continuación detallaremos los tipos de LEDs, en los que se basan las bombillas LED:

- **Led azul con fósforo:** El diodo azul posee una capa amarilla de fósforo, el fósforo es un material que absorbe la luz de un color y emite luz de otro color. Parte de la luz azul de onda corta es absorbida por el fósforo, que emite luz amarilla. El color amarillo se combina con la porción de la luz azul que no se absorbe, para obtener la luz blanca, esto permite que los diodos a base de fósforo sean la elección predominante para aplicaciones que no requieren el cambio de color, su tonalidad puede variar dependiendo de la variación de su temperatura.
- **Multi-Chip LEDs:** El enfoque multi-chip utiliza 3 o más chips LED que emiten luz en diferentes colores, típicamente rojo, verde y azul (RGB), para producir luz blanca. Dependiendo de las intensidades de luz de los diferentes chips, se puede

lograr el control del color. Los multi-chip tienen una limitación de ancho de banda debido a la baja eficiencia de conversión de fósforo.

- Micro LEDs ( $\mu$ -LED): Elaborados a base de la composición química de nitruro de aluminio y galio (AlGaN), permiten la comunicación en fibra óptica de plástico (POF) y sistemas VLC, porque tienen la capacidad de utilizar el ancho de banda de 3 dB que alcanzan los 450 MHz de frecuencia, esto permite generar velocidades de comunicación de hasta 1.5 Gb/s.
- Diodo Emisor de Luz Orgánico (OLED): Generan luz usando una capa orgánica intercalada entre acarreos positivos y negativos, se utilizan principalmente en pantallas planas. La respuesta de frecuencia típica para los OLEDs es del orden de 100 segundos de KHz, mucho más baja que el LED inorgánico, lo que permite que los OLEDs sean menos adecuados para aplicaciones de alta velocidad. [1]

Considerando que depende de sus fabricantes, el material de sus componentes, su costo y los parámetros lumínicos, el generar una buena comunicación e iluminación mostramos la siguiente tabla comparativa:

Comparación entre los diferentes tipos de LED				
Parámetro	RGB LED	$\mu$ -LED	OLED	LED azul con fósforo
Ancho de Banda	10-20 MHz	$\geq 300$ MHz	$\leq 1$ MHz	30-40 MHz
Eficacia	65 lm/W	N/A	45 lm/W	30 lm/W
Costo	Alto	Alto	Muy Bajo	Bajo
Complejidad	Moderado	Muy Complejo	Complejo	Complejo
Aplicación	Iluminación	Bio-sensores	Monitor	Iluminación

Tabla 1: Comparación entre los diferentes tipos de LEDs.

## II.2. RECEPTOR VLC

En los sistemas de comunicación por la luz visible (VLC), los patrones constructivos y destructivos de interferencia ocurren en una escala micrométrica y son promediados por el receptor, que es mil veces mayor en tamaño, por lo tanto, en VLC no se muestra un desplazamiento que genere un efecto Doppler (cambio de frecuencia aparente de una onda, producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador), como resultado, no se necesita un sofisticado algoritmo de rastreo del receptor, permitiendo que un fotodetector se use simplemente como el receptor. Generalmente hay dos tipos de fotodetectores utilizados en los sistemas VLC. El diodo PIN PD como se muestra en la “Fig.1” y el diodo avalancha PD (APD) como se muestra en la “Fig.2”, este último tiene una ganancia mayor respecto al diodo PIN. La desventaja de usar un APD es el exceso de ruido generado por la mayor fotocorriente. [1]

El diodo PIN PD ha sido el PD predominante utilizado en el VLC, debido a la alta tolerancia a la temperatura, menor costo y es ideal en escenarios donde el receptor se inunda con luz de intensidad relativamente alta. Los APDs son más útiles con intensidad de luz incidente débil.

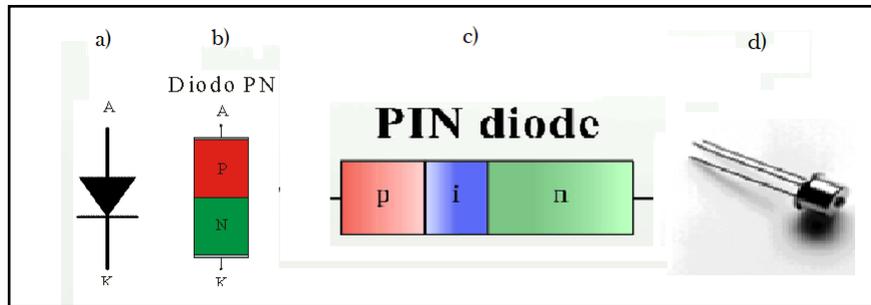


Fig.1. a) Símbolo del diodo, b) Composición de un diodo unión PN, donde P (silicio extrínseco tipo P) y N (silicio extrínseco tipo N), c) Composición de un diodo unión PIN, donde P (silicio extrínseco tipo P), I (material intrínseco) y N (silicio extrínseco tipo N) y d) Aspecto físico de un diodo PIN.

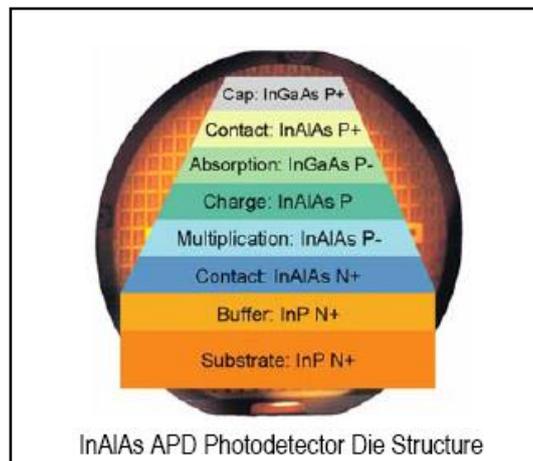


Fig.2. Estructura del fotodetector avalancha APD, del fabricante SPECTROLAB, composición química InAlAs (arseniuro de aluminio-indio o arseniuro de aluminio y aluminio “Aluminium indium arsenide”).

En general, hay tres tipos de configuración de receptor que se pueden usar en VLC, son los siguientes: receptor de elemento único, receptor de combinación selectiva y receptores de diversidad de imágenes.

### II.3. TÉCNICAS DE COMUNICACIONES VLC

Dentro de las técnicas de comunicaciones por el VLC, hablaremos sobre las diversas modulaciones que se emplean para generar una optimización del espectro, como también de la tecnología MIMO empleada para la transmisión inalámbrica en el VLC.

### II.3.1 MÉTODOS DE MODULACIÓN

Existen varios métodos de modulación cuando se trata de modulaciones IM/DD (Intensidad Modulada / Detección Directa). En esta sección, detallaremos las técnicas de modulación IM/DD utilizadas para la comunicación por medio de la luz visible. Como se emplea IM/DD su demodulación depende de la detección directa en el receptor. A continuación describimos cuatro tipos de modulación utilizados en VLC; (1) Activación de encendido-apagado (On-Off Keying, OOK), (2) Modulación por pulso, (3) Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) y (4) Modulación de cambio de color (CSK) [2], como se muestra en la “Tabla: 2”.

**On-Off Keying, OOK:** En (OOK), los bits de datos 1 y 0 se transmiten al encender y apagar el LED respectivamente. En el estado apagado, el LED no está completamente apagado, sino que la intensidad de la luz se reduce. Las ventajas de OOK incluyen su simplicidad y facilidad de implementación. En la mayoría de los primeros trabajos sobre el uso de la modulación OOK para VLC, muestran la utilización del LED que produce luz blanca y lo combina con el emisor azul de fósforo amarillo (como se explicó en el apartado de los transmisores VLC anteriormente). La principal limitación del LED blanco es su ancho de banda limitado (unos 35 MHz) como se indica en la “Tabla 1”, debido al tiempo lento de carga del fósforo amarillo. Para mejorar su velocidad se utiliza el NRZ (No-Return-Zero) con el LED blanco permitiendo obtener una velocidad de datos de 10 Mbps, a través de un enlace VLC. Otra alternativa es utilizar un filtro azul que elimine el componente amarillo de respuesta lenta, permitiendo alcanzar una velocidad de datos de 40 Mbps. Se puede combinar el filtrado azul con la ecualización analógica en el receptor para lograr velocidades de datos de 100 Mbps y 125 Mbps, respectivamente.

**Métodos de modulación por impulsos:** La modulación por impulsos como se describe a continuación en la “Fig.3.” nos proporciona varias alternativas para comunicaciones en el VLC.

Con respecto a OOK proporciona varias ventajas, como la simplicidad y la facilidad de implementación, a pesar de que una de las principales limitaciones es la menor velocidad de datos, especialmente cuando se soportan diferentes niveles de atenuación. Esto ha motivado el diseño de métodos de modulación alternativos basados en el ancho y la posición del impulso, los cuales mencionaremos y describiremos a continuación.

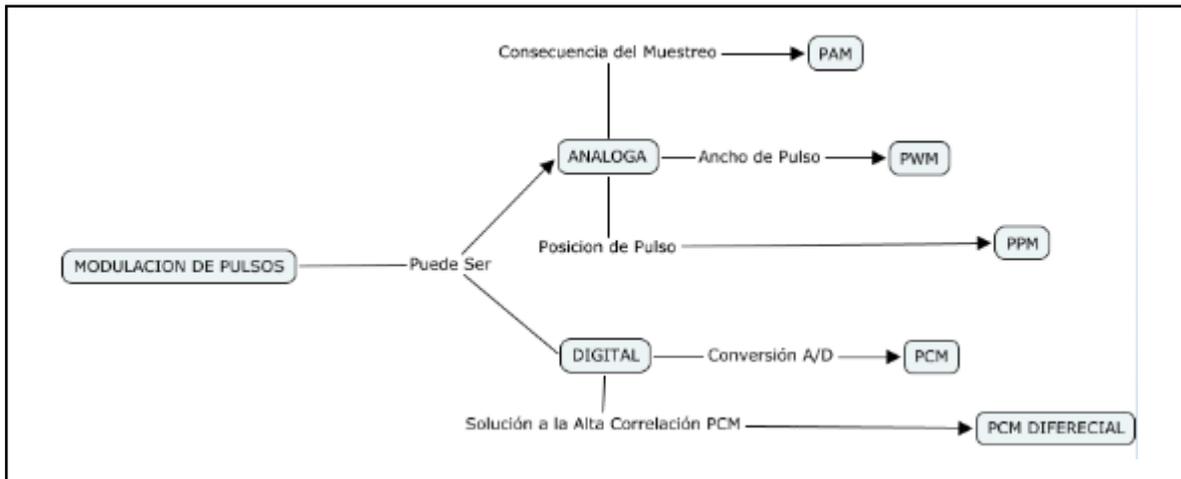


Fig.3. Clasificación de la Modulación por Pulsos

Modulación por ancho de pulso (PWM): Una forma eficiente de lograr modulación y atenuación es a través del uso de PWM. En PWM, los anchos de los pulsos se ajustan en función del nivel de atenuación deseado, mientras que los pulsos transportan la señal modulada en forma de onda cuadrada. La señal modulada se transmite durante el pulso y el LED funciona con el brillo completo durante el pulso. La velocidad de datos de la señal modulada se debe ajustar en función del requisito de atenuación. Una de las ventajas de PWM es que logra el oscurecimiento sin ajustar el nivel de intensidad de los pulsos, por lo tanto, no genera el cambio de color (como OOK con niveles redefinidos ON/OFF) en el LED. La desventaja de PWM es su velocidad de datos limitada (4.8 kbps). Para superar esta limitación, se puede combinar PWM con Multitono Discreto (DMT), permitiendo generar el control y la comunicación de atenuación conjunta. Usando la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM), se transmite en diferentes subportadoras de DMT, que están espaciadas por  $1/T$  en frecuencia, donde  $T$  es la duración de un símbolo. Cuando se utiliza QAM en subportadoras DMT para lograr una velocidad alta de enlace, por lo general sobre los 500 Mbps, se generan dos problemas, el oscurecimiento del LED y también la restricción de atenuación que limita el rendimiento alcanzado, debido a la alta tasa de errores de bit (BER).

Modulación por posición del pulso (PPM): Es otro método de modulación por pulso, se basa en la posición del pulso. Este es el caso de PPM, la duración del símbolo se divide en “ $t$ ” slots de igual duración y se transmite un pulso en una de las “ $t$ ” slots. La posición del pulso identifica el símbolo transmitido. Debido a su simplicidad, muchos diseños anteriores de sistemas ópticos inalámbricos adoptaron PPM para la modulación, e incluso en algunos de los trabajos iniciales de uso de PPM fueron para la comunicación por medio de infrarrojos. Cuando el canal posee condiciones peores, es posible utilizar la transmisión PPM de velocidad adaptativa, en base a códigos convolucionales repetidos y perforados, es decir códigos secuenciales de la misma forma y separados por un mismo espacio, esto permite lograr una tasa de bits más alta. Debido a las limitaciones de

menor eficiencia espectral y velocidad de datos de PPM (solo un pulso por duración de símbolo), se han propuesto otras variantes de modulación basada en la posición del pulso con respecto al tiempo.

PPM por superposición (OPPM): Permite que más de un pulso se transmita durante la duración del símbolo y el símbolo de pulso diferente puede superponerse, OPPM muestra que no solo puede lograr una mayor eficacia espectral en comparación con PPM y OOK, sino que puede lograr un amplio rango de niveles de atenuación junto con la alta velocidad de datos.

Multipulso PPM (MPPM). Al igual que OPPM, permite que se transmitan múltiples pulsos durante la duración del símbolo, sin embargo, los pulsos dentro de la duración de un símbolo no tienen que ser continuos. MPPM puede lograr una eficiencia espectral más alta en comparación con OPPM.

Existe la combinación de estas dos derivaciones de PPM, OPPM y MPPM llamada (Superposición de Multipulsos por Modulación de Posición de Pulso OMPPM), empleada en óptica para expandir el ancho de banda en el canal de recuento de fotones sin ruido lo que permite mejorar la eficiencia espectral.

PPM diferencial (DPPM): Es similar a PPM, excepto que el símbolo OFF, después del pulso en un símbolo PPM se elimina y aparece en el siguiente símbolo, justo después del pulso del símbolo anterior. DPPM requiere significativamente menos potencia promedio que PPM para un ancho de banda dado en un canal de comunicación óptica.

Expurgación PPM (EPPM): Donde los símbolos en el MPPM se expurgan (se equidistan) para maximizar la distancia entre símbolos. EPPM logra la misma eficacia espectral que PPM, sin embargo, puede usarse en VLC para proporcionar soporte de atenuación (tolerancia a la disminución de intensidad lumínica), ya que puede lograr un nivel de iluminación arbitrario al cambiar el número de pulsos por símbolo (código-peso) y la longitud del símbolo.

EPPM de múltiples niveles (MEPPM): Amplía el diseño de EPPM con soporte para múltiples niveles de amplitud, con el fin de aumentar el tamaño de la constelación y la eficiencia espectral, también puede ser compatible con el oscurecimiento y proporciona una comunicación sin parpadeos.

VPPM es una variación híbrida de PPM y PWM, los bits se codifican eligiendo diferentes posiciones de pulso como en PM, sin embargo, el ancho del pulso también se puede modificar según sea necesario. VPPM conserva la simplicidad y robustez de PPM al mismo tiempo que permite diferentes niveles de atenuación al alterar el ancho de pulso.

**Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM):** Una limitación de los esquemas de modulación de portadora única, es que sufren una alta interferencia entre símbolos debido a la respuesta de frecuencia no lineal de los canales de comunicación de luz visible. OFDM

ha sido ampliamente adoptado en la comunicación de RF debido a su capacidad para combatir eficazmente la interferencia entre símbolos y el desvanecimiento por trayectos múltiples. El uso de OFDM para la comunicación por medio de la luz visible, es consentido debido a que, en OFDM el canal se divide en múltiples subportadoras ortogonales y los datos se envían en sub-flujos paralelos modulados sobre las subportadoras. OFDM para VLC puede reducir la interferencia entre símbolos y no requiere un ecualizador complejo, sin embargo, existen múltiples desafíos para realizar su implementación. En primer lugar, las técnicas OFDM para RF deben adaptarse para su aplicación en sistemas IM/DD de VLC. Esto se debe a que OFDM genera señales de valores complejos. Esto se puede lograr aplicando la restricción de simetría hermética (el análisis matemático de una función Hermética, es una función compleja con la propiedad de que su conjugado complejo es igual a la función original con la variable modificada en el signo) en las subportadoras y luego convirtiendo las señales de dominio de tiempo en señales unipolares.

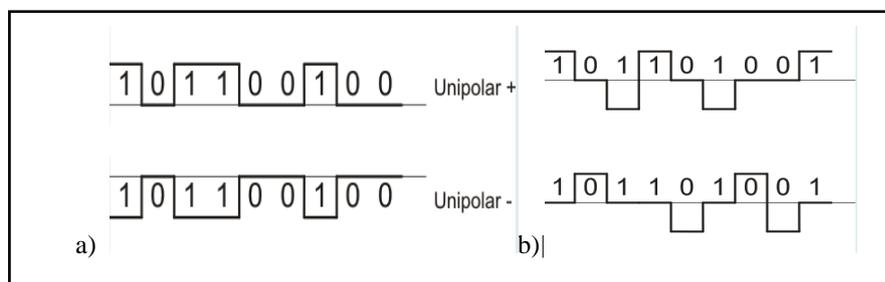


Fig.4. a) Señal Unipolar y b) Señal Bipolar

Dependiendo de cómo las señales bipolares se conviertan en unipolares, como se muestra en la “Fig.4”, existen dos tipos de técnicas en OFDM: 1) OFDM óptica recortada asimétricamente (ACO-OFDM) y 2) OFDM óptica polarizada en DC (DCO-OFDM). En ACO-OFDM, solo las subportadoras son moduladas, lo que conduce automáticamente a una señal de dominio de tiempo simétrico. Mientras que en DCO-OFDM, todas las subportadoras están moduladas, pero se agrega un cuadro directo positivo para hacer que la señal sea unipolar, si comparamos, nos damos cuenta que la distorsión en el LED es más significativa con DCO-OFDM, que con ACO-OFDM. El desafío más grande en el sistema OFDM VLC, es la no linealidad del LED, debido a la relación entre la corriente y la luz emitida del LED que no es lineal. Esto afecta especialmente a la relación de potencia pico a promedio (PAPR). A pesar de esto, OFDM para VLC tiene un gran potencial con velocidades de enlace alcanzables en la escala de múltiples Gbps usando solo un LED. [2]

**Color Shift Keying (CSK):** La modulación CSK está específicamente diseñada para superar la velocidad de datos más baja, en la comunicación por medio de la luz visible. Como mencionamos anteriormente (en el apartado de los transmisores VLC), el color blanco claro con el LED azul de fósforo amarillo, ralentiza la capacidad de conmutación rápida del LED, dificultando la comunicación de alta velocidad de datos. Una alternativa de generar luz blanca que recientemente se está volviendo cada vez más popular, es utilizar tres LED independientes: rojo, verde y azul (RGB).

Esta fuente combinada de LEDs RGB a menudo se denomina TriLED (TLED). CSK modula la señal usando la intensidad de los tres colores en la fuente TLED. La modulación CSK, se basa en el diagrama de cromaticidad del espacio de color, que mapea todos los colores perceptibles por el ojo humano, a dos parámetros de cromaticidad “X” y ”Y”. La modulación CSK se realiza de la siguiente manera:

- Determinando el triángulo de la constelación RGB
- Correlación de valores de cromaticidad de bits de datos
- Determinando las intensidades de los LEDs RGB

Modulación	Velocidad de Datos	Atenuación	Observaciones
OOK	Bajo-Moderado	si	Diseño de transceptor de baja complejidad
PPM	Moderado	si	Máxima eficacia espectral con MEPPM
OFDM	Alto	no	Diseño complejo debido a la no linealidad del LED, soporte MIMO
CSK	Alto	no	Requiere RGB tri-LED, acceso multi-usuario mejorado

Tabla 2: Esquemas de modulación principales y sus características

### II.3.2 TECNOLOGÍA EMPLEADA PARA LA COMUNICACIÓN

El camino que se emplea para la comunicación por el VLC, debe ser capaz de tolerar una transmisión con velocidades altas, a pesar de tener rutas menos diversas, a continuación detallaremos la tecnología y técnicas MIMO, que se emplean para desarrollar una transmisión por el VLC.

Entradas Múltiples y Salidas Múltiples (MIMO): Para proporcionar suficiente iluminación, la mayoría de las luminarias generalmente contienen múltiples LEDs. Estos LEDs múltiples se pueden tratar como transmisores múltiples que pueden permitir la comunicación por medio de la luz visible empleando MIMO. En las comunicaciones de RF, los sistemas MIMO se usan comúnmente para obtener velocidades de datos más altas. De manera similar, se pueden usar LEDs múltiples para una mayor eficiencia espectral en VLC.

Los sistemas MIMO en VLC son difíciles de realizar en comparación con las comunicaciones de RF. En los sistemas RF MIMO, las ganancias de rendimiento se atribuyen en gran parte a la diversidad espacial (existencia de múltiples rutas espaciales que son de naturaleza diversa). Sin embargo, tales ganancias de diversidad están limitadas en VLC MIMO, porque las rutas entre el transmisor y el receptor son muy similares (menos diversas) especialmente en escenarios de

interior. Esto limita la diversidad espacial disponible de los sistemas VLC MIMO. El otro desafío en VLC MIMO es el diseño del receptor que mencionaré a continuación. [3]

**Receptor MIMO:** Puede haber dos tipos de receptores en los sistemas VLC MIMO.

1. El fotodiodo (engloba PIN y APD) en los sistemas MIMO es un conjunto de fotodiodos independientes, cada uno con su óptica de concentrador individual (como se explicó anteriormente en la sección de receptores VLC). La ventaja de dicho receptor es que se puede lograr una ganancia muy alta, sin embargo, el receptor puede lograr esta ganancia muy alta debido al FOV (campo visual) estrecho de cada fotodiodo. La desventaja, es que tal receptor requiere una alineación cuidadosa con el transmisor debido al FOV (campo visual) estrecho, y la capacidad puede reducirse drásticamente incluso con una mala alineación.
2. Receptor de imágenes: Dado que un sensor de imagen contiene una lente de proyección y una gran matriz de fotodiodos, tiene el potencial de crear un enlace MIMO de alta velocidad de datos. La lente de proyección asegura un gran campo de visión que casi elimina los requisitos de alineación.

**Técnicas VLC MIMO:** Existen tres tipos de técnicas VLC MIMO, que utilizan los DONGLE USB como se muestra en la “Fig.16” y se describe en la “Tabla 7” en el mercado actual.

1. Codificación de Repetición (RC): Esta es la técnica más simple, se transmite la misma señal desde todos los transmisores. La señal transmitida desde todos los LED se encuentra de forma constructiva en los receptores, aumentando la ganancia global.
2. Multiplexación Espacial (SMP): En SMP, se transfieren diferentes datos desde cada fotodiodo transmitido a un receptor. Con múltiples transmisores y receptores, este tipo de MIMO crea múltiples secuencias SISO (Single-Input and Single-Output) paralelas.
3. Modulación espacial (SM): En esta técnica MIMO, se propone un solo transmisor que transmite datos en cualquier punto del tiempo. El receptor estima qué LED se activó en función de la señal recibida y lo usa para decodificar los datos transmitidos. Dado que los datos están codificados tanto en el dominio espacial como de la señal, SM logra una eficacia espectral mucho mayor en comparación con otras técnicas. [3]

#### *II.4. MODELO DE PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL*

En esta sección, describimos el modelo del canal, para la propagación de la luz visible en un ambiente interior. Considerando que no es nuestra principal aportación el modelado de un sistema, pero siendo necesario definir un modelo de propagación, que permita según el modelo de canal, elegir un LED con las especificaciones y las características adecuadas descritas en los catálogos correspondientes

dentro del mercado actual, definiremos conceptos que permitan estimar el rendimiento del enlace de comunicación.

En VLC dicha comunicación, no solo debería alcanzar una velocidad de datos más alta, también debe cumplir los requisitos de iluminación en un ambiente “indoor”, estos requisitos sobre la luz percibida se pueden caracterizar en base a la atenuación.

Para la atenuación se requieren diferentes niveles de iluminancia cuando se realizan diferentes tipos de actividades. Como ejemplo, una iluminancia en el rango de 30 - 100 lux. Suele ser suficiente para realizar tareas visuales sencillas en la mayoría de los lugares públicos. Por otro lado, en ambientes de oficina o interiores de casa, se requiere un mayor nivel de iluminancia en el rango de 300 a 1000 lux. Con los avances en los circuitos de controlador LED, se ha posibilitado atenuar un LED a un nivel arbitrario dependiendo de los requisitos de la aplicación para ahorrar energía. Si un LED se puede controlar a un nivel arbitrario, también es necesario comprender su impacto en la luz percibida por el ser humano. El ojo humano se adapta a una iluminación más baja ampliando la pupila para permitir que entre más luz al ojo, pero al no poder permanecer de este modo continuo generamos unos pequeños parpadeos en fracciones de los milisegundos. Esto significa que una lámpara que está atenuada al 1% de su luz medida se percibe como un 10% atenuada por el ojo humano. Esto es importante en términos de VLC porque un usuario puede elegir un nivel arbitrario de atenuación o de ahorro de energía, pero la comunicación no debe modularse de tal forma que se admita cualquier nivel deseado de atenuación.

#### II.4.1. POTENCIA TRANSMITIDA POR EL LED

Esta sección abarca dos propósitos; iluminación y transmisión, para analizarlo y describirlo debemos dividir su estudio en dos parámetros; fotométricos y radiométricos, por lo tanto utilizaremos el espectral integral, que nos permite hallar el flujo luminoso (en magnitud correspondiente a radiometría se le conoce como flujo radiante o potencia radiante) [4], como se muestra en la “Tabla 3”, en base a la distribución de potencia espectral, mientras que el espacial integral, nos permite llegar al flujo luminoso (magnitud en fotometría) [4], utilizando la intensidad luminosa y la intensidad axial.

Magnitud Radiométrica	Símbolo	Unidad	Magnitud correspondiente en Fotometría
Energía Radiante	$Q_e$	Julio (J)	
Flujo Radiante o Potencia Radiante	$\Phi_e$	Vatio (W)	Flujo Luminoso
Intensidad Radiante Espectral	$I_e$	$W/(m^2 \mu m sr)$	Intensidad luminosa
Exitancia Radiante Espectral o Emitancia Radiante (fuente)	$M_e$	$W/(m^2 \mu m)$	

Incidencia Radiante Espectral o Irradiancia (sobre un detector)	$E_e$	$W/(m^2 \mu m)$	Iluminancia
Radiancia Espectral o Radiancia, o Esterancia Radiante Espectral	$L_e$	$W/(m^2 \mu m sr)$	Luminancia

Tabla 3: Magnitudes fundamentales en radiometría y fotometría [4]

**Parámetros fotométricos:** Referencia a cuantificar las características de la luz visible tal como: brillo, nitidez, color, etc. Es decir, estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular el sistema visual, lo que sea percibido por el ojo humano.

**Parámetros radiométricos (watts/nm):** Este parámetro muestra la medición de la energía electromagnética radiada por la luz (potencia). Es útil porque nos permite determinar propiedades relativas de comunicación del LED en términos de potencia absoluta, ya que tenemos que enumerar y posteriormente seleccionar LEDs dentro del mercado actual que cumplan con los parámetros y viabilicen una transmisión de datos, sin descuidar los rangos que permitan generar una iluminación adecuada en ambientes interiores.

El flujo luminoso o flujo radiante: Es la cantidad de energía (potencia), en forma luminosa, emitida por una fuente "Fig.5". Su unidad de medida es el lumen (lm) y su símbolo es F. Una bombilla LED por lo general transmite en el rango de los 250 lm hasta los 1000 lm, mientras que la luz que entra por la ventana puede oscilar entre 2.000 y 20.000 lm. Esta magnitud es característica de cada bombilla y por lo tanto es un dato facilitado por los fabricantes en cada catálogo.

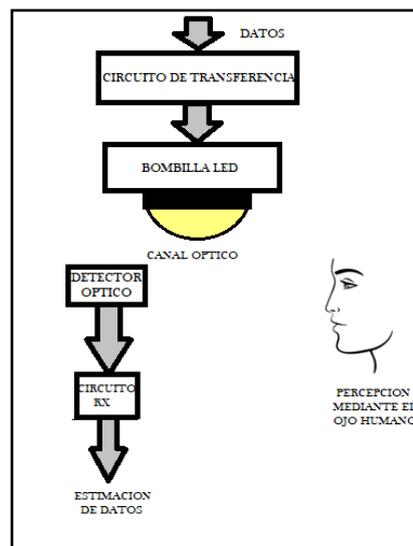


Fig.5. Debido a la doble funcionalidad de VLC, uno debe considerar tanto el detector óptico como el ojo humano. El detector óptico seguido por el circuito del receptor estima los datos transmitidos, mientras que el

sistema visual humano construye una imagen, necesariamente percibiendo el color y el brillo de la luz incidente.

Método espectral (radiométrico) para llegar al flujo luminoso:

**Espectral Integral:** Este método utiliza la función luminosa, es decir la percepción del ojo humano hacia la luz visible y también la distribución de potencia espectral del LED. [4]

Distribución de potencia espectral  $S_T(\lambda)$ : Representa la potencia del LED en toda la longitud de onda en el espectro de luz visible. Este parámetro es muy importante en los sistemas de sensores ópticos, pues generan la respuesta del sensor (cantidad percibida de potencia), típicamente dependen de la longitud de onda incidente.

Método espacial (fotométrico) para llegar al flujo luminoso:

**Espacial Integral:** Esta es la otra forma o manera de calcular el flujo luminoso, utilizando las propiedades de emisión espacial del LED. Dentro de estas propiedades del LED necesitamos conceptualizar la función de luminosidad. Para hallar el flujo luminoso, necesitamos conocer los conceptos sobre la intensidad luminosa y la intensidad axial. [4]

Función de luminosidad  $V(\lambda)$ : Representa la relación entre la sensación de luz humana (percepción del ojo humano) y el concepto físico de luz, que es la magnitud a la cual los instrumentos de medida reaccionan, como por ejemplo los luxómetros. Esta función es diferente dependiendo de que el ojo se encuentre adaptado a condiciones de buena iluminación (visión fotópica) o de mala (visión escotópica). [4] Así, en condiciones fotópicas, la curva alcanza su pico para 555 nm, mientras que en condiciones escotópicas lo hace para 507 nm, como se muestra en la “Figura.6”.

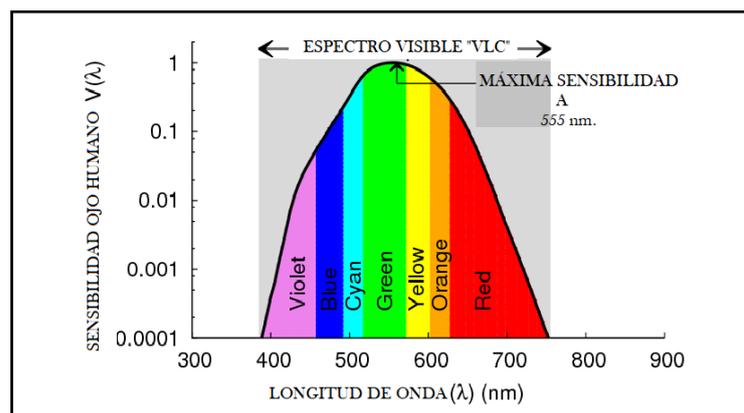


Fig.6. Función luminosidad

Intensidad luminosa  $g_t(\Theta)$ : Es la cantidad de luz brillante o brillo que emite el LED en una dirección específica, su unidad de medida es Candela (cd); El flujo luminoso con respecto a la intensidad luminosa es determinado por la dirección radiada (que está formado por radios divergentes) por unidad de ángulo sólido, y este ángulo sólido, es el ángulo espacial que se encuentra en el espacio

VLC, limitado por las rectas proyectantes desde el LED transmisor hacia el fotodiodo receptor con su respectiva inclinación, como se muestra en la “Fig.7”.

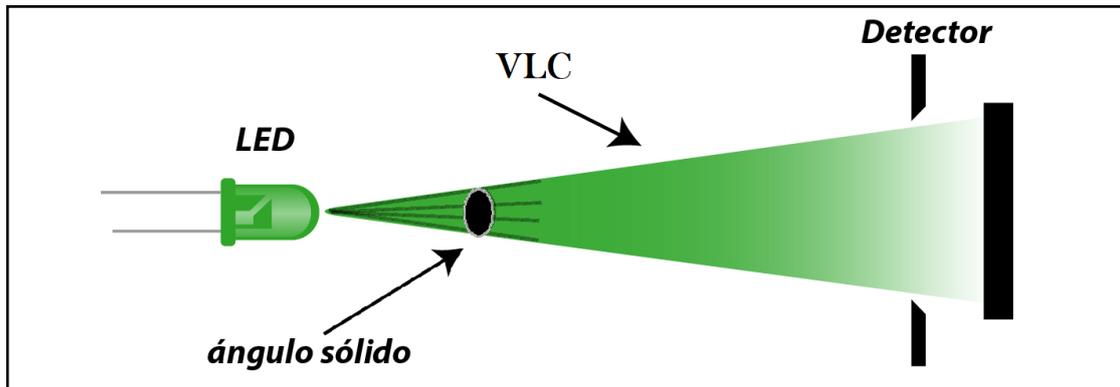


Fig.7. Ilustración del ángulo sólido en un sistema VLC.

Intensidad axial  $I_0$ : Está definida por la intensidad luminosa en Candela (cd) y el ángulo sólido “Fig.7”, al trabajar dependiendo del valor máximo de la eficiencia luminosa y este valor, al ser una constante 683 (lm/W), como es máxima y está en función del ángulo sólido, es decir, mientras más se aproxime al origen, más se aproximará a  $0^\circ$ , cumpliendo estas condiciones, la intensidad axial es de 987 Candela, como se muestra en la “Fig.8”, por lo general siempre oscila sobre ese valor. [2]

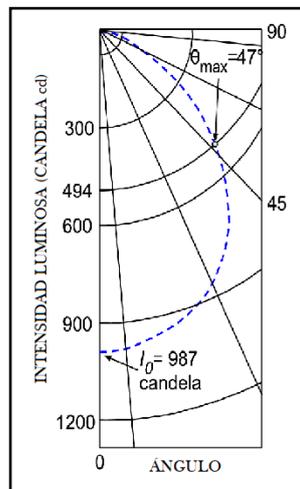


Fig.8. Distribución de la intensidad luminosa.

#### II.4.2. RUIDO EN EL RECEPTOR Y SNR

Para el caso del ruido en el receptor tenemos tres maneras de identificarlos:

**Ruido de luz ambiental:** Generado por la radiación solar que se introduce al interior por medio de las ventanas, puertas, etc. Y también generado por otras iluminaciones incandescentes ocasionadas por la proximidad de lámparas fluorescentes.

**Ruido de disparo:** El ruido de disparo o ruido shot, se originan por las fluctuaciones de los fotones detectados que se transporta mediante la energía lumínica (potencia), los fotones están en los

dispositivos ópticos, estas fluctuaciones son estadísticamente apreciables en mediciones. El nivel de este ruido puede ser mayor o menor dependiendo del valor promedio de la intensidad luminosa, sin embargo, mientras el nivel de señal crece más rápido, mayor es su nivel promedio, a menudo el ruido de disparo sólo es un problema si se trabaja con intensidades luminosas bajas.

Ruido generado por el pre-amplificador eléctrico: Aunque en principio compartan el origen de su generación con el ruido de disparo, es decir que se origina por la misma señal del fotodetector (al ser un dispositivo óptico), a este ruido se le añadirá el ruido generado por el propio pre-amplificador, de la misma manera que amplifica la señal por principio básico también amplificará el ruido.

Shadowing: Es el fenómeno acontecido por la interrupción u obstrucción de la luz, generando un sombreado e impidiendo la comunicación formada por línea de vista del enlace entre el transmisor y el receptor. Cualquier enlace óptico por un medio inalámbrico puede ser un tema de sombreado y a veces de bloqueo, causado por movimiento u objetos estacionarios, ejemplo, si un fotodiodo receptor se coloca en un escritorio, es posible que el movimiento de la silla cercana pueda dar lugar a un sombreado en el receptor, o a su vez la incidencia de otras iluminaciones naturales o por la cercanía de otras bombillas. Los efectos del sombreado dependen de los objetos dentro de una oficina o sala (interior). Es extremadamente difícil generalizar estos efectos, debido a las restricciones impuestas por el tamaño de la celda de comunicación (como se define en la sección siguiente). El shadowing acontece en mayor porcentaje en las comunicaciones móviles y radioenlaces, es decir en ondas de radio y transmisiones vía microonda.

## II.5 DISEÑO DE LAS CELDAS

Como toda tipología de red es necesario contemplar los requerimientos para desarrollar en base a estos una celda que nos permita cubrir su área y recibir tanto datos como iluminación mitigando interferencias. Expuesto esto dividiremos en dos partes a estas celdas de no más de 10 metros las llamaremos ATTOCELL y de no más de 5 metros las llamaremos ZEPTOCELL, tal como se demuestra en la “Fig.9”. [2]

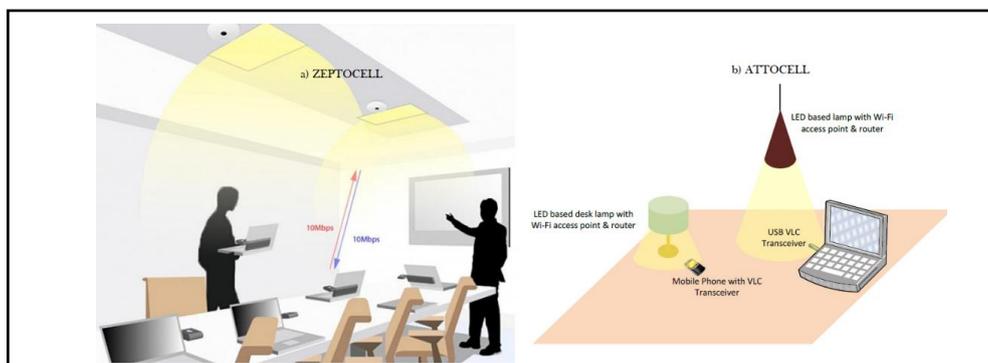


Fig.9. a) Diseño de celda zeptocell y b) diseño de celda attocell

Dado que múltiples ATTOCELLs se usan típicamente para la iluminación de espacios interiores grandes, la interferencia entre celdas es más severa para ATTOCELLs. Para ZEPTOCELL, cada luminaria tiene un brillo menor en comparación con la luminaria de una ATTOCELL. Además, las ZEPTOCELLs se despliegan de forma relativamente escasa, lo que significa que la interferencia entre celdas no es tan grave. Se lidia cuando se trata del diseño de la celda para escenarios al aire libre. En los espacios interiores el panorama no es tan conflictivo, se genera un escenario común, que surge cuando se implementan múltiples ZEPTOCELLs, generalmente en las redes celulares de hoy en día, donde se implementan muchas femtocélulas dentro del rango que permite una macro celda, esto permite cumplir con los requisitos para soportar el tráfico. Los problemas importantes en ese escenario de red, es la gestión de la interferencia entre ATTOCELL y ZEPTOCELL. Además, dado que el propósito principal de la instalación de luminarias es proporcionar iluminación y transmisión de datos, no está claro si la topología de celda resultante es óptima o no para interferencia. Varios estudios recalcan que aún se necesita más investigación para determinar la topología de celda óptima de interferencia, que pueda maximizar el rendimiento mientras cumple los requisitos de iluminación y transmisión.

**Celdas de Coordinación:** Proporciona sugerencias para administrar el diseño de la celda y las técnicas para reducir la interferencia entre ellas. El transmisor LED en un entorno interior está conectado a una entidad controladora central que puede coordinar las operaciones de la célula y la movilidad del dispositivo. Es decir se puede controlar la configuración, permitiendo acceder a dos tipos de coordinación: 1) punto simple y 2) Joint Transmisson.

Punto simple: El LED que utilizemos se centra únicamente en la proporción de la celda que hayamos escogido fijando un punto simple, para trazar el área de su celda solo es necesario revisar las características de transmisión del LED, dentro de las cuales, el cono de emisión de luz es importante (cono de emisión detallado en las características de los componentes del mercado actual en la “Sección III”), estos datos se obtienen del catálogo de cada producto.

Multipunto Joint Transmission: Esta técnica permite sincronizar las múltiples señales emitidas por LEDs y asociarlas, generando una red multipunto; otra forma de utilizar el Joint Transmission (JT), es desplegando múltiples receptores consecuentemente se generan múltiples puntos de acceso. [2] La interferencia entre células produce degradación en el rendimiento de la comunicación (tal como se estudió en la sección de diseño de las celdas), el sector más vulnerable es el borde de la celda, debido a la potencia de transmisión similar entre las inter-células. Una solución para este problema de interferencia entre células, es utilizar Joint Transmission, permitiendo mitigar esta interferencia mediante el principio de asociar un dispositivo con una celda, permitiendo comparar visualmente la intensidad de la señal máxima entre todas las celdas cercanas, se deshace

de la interferencia entre células y proporciona un alto rendimiento al usuario del borde de la célula, como se muestra en la “Fig.10”.

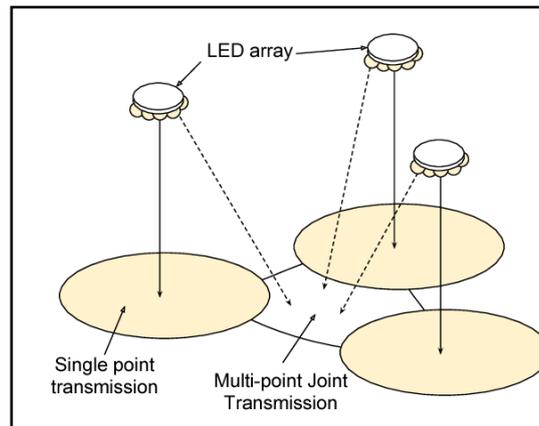


Fig.10. Múltiples transmisores LED pueden transmitir conjuntamente a los receptores ubicados en la región de transmisión de puntos múltiples [2]

### III. ESTADO DEL MERCADO ACTUAL: COMPONENTES

Dentro del estudio del mercado actual, destacó la campaña recientemente creada (lanzada a inicios del mes de abril del 2018) por la empresa Philips, apostando por la comunicación mediante la luz visible y la iluminación ya sea exterior o interior, prueba de aquello es su plan piloto implementado con Icade, una compañía de inversiones inmobiliarias francesa, asentada en París.

La compañía Philips apuesta por ofrecer una alternativa a la conexión de internet utilizando el concepto de Light Fidelity, también conocido como Lifi. Su andadura en este campo comenzó a fines del año 2016, cuando la empresa holandesa adquirió la pequeña empresa francesa Toric y Luciom, especializada en LiFi. Este sistema moderno se basa en aprovechar la luz LED como medio para transmitir las ondas y permitir conectar los dispositivos a internet. Philips pretende ser el pionero dentro de las grandes compañías para posicionarse como referente de esta tecnología. Con este nuevo producto al que han bautizado como Philips LiFi Systems, quieren aumentar la funcionalidad de sus bombillas LED para que, además de ofrecer iluminación, también sean capaces de emitir datos a través de una conexión Ethernet. Aunque su funcionamiento pueda parecer complicado, realmente no lo es. Las bombillas poseen un modem que se activa cuando los LEDs están iluminados y, a través de la luz, transmiten la señal por conexión Ethernet. La información vuelve a través de un DONGLE USB que debe comprarse por separado “Fig.11”.

Al sustituir las ondas de radio por las de luz se obtienen algunos beneficios como: conexiones más rápidas, es más segura y que los problemas de salud que generan las ondas de radio, no los tiene la luz, puede llegar a ser 10 veces más rápido que la conectividad por fibra óptica WiFi. La velocidad puede llegar a los 500 Mbps, la compañía afirma que, con este sistema se puede dar cobertura simultánea a 15 usuarios, con un servicio óptimo y sin que se colapse la información.

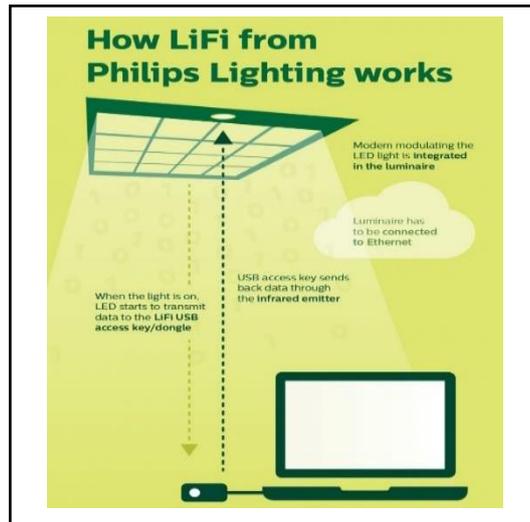


Fig.11. Ilustración de cómo funciona Lifi de Philips

También es más económico, ya que se estima que puede llegar a ser diez veces más barato, cualquier bombilla LED puede convertirse en emisor con un simple chip LiFi (modem), que equivale a un simple mando a distancia. La aplicación de la conexión LiFi puede ser útil para diferentes campos. Un ejemplo es la salud, ya que en determinadas zonas de los hospitales está prohibido el uso de las ondas por radio. Los wearable con el Internet de las cosas, también tienen una oportunidad para explotar. Desventajas: no es utilizable con luz solar, no atraviesa paredes y requiere que los dispositivos tengan el chip específico.

Cuando se trata de Lifi, Philips asume la denominación de Signify, como se muestra en la “Fig.12”, empresa creada el 4 de junio del 2018, bajo esta denominación se obtienen beneficios como; la calidad de la luz LED de bajo consumo de energía y una conexión de banda ancha segura, altamente estable, robusta y rápida. Proporcionando, desde fuentes de luz y módems hasta llaves de acceso USB (dongle).

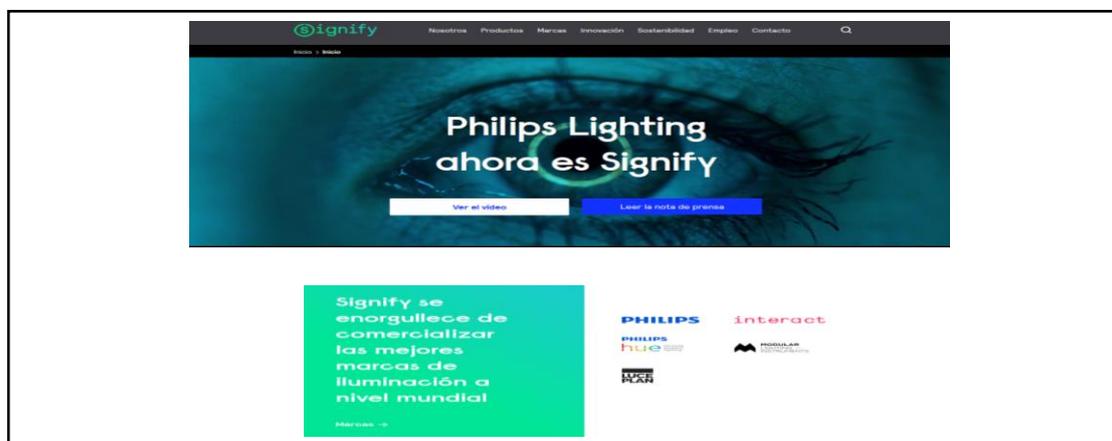


Fig.12. Página web de Signify

Existen varias empresas orientadas al potencial desarrollo de las comunicaciones utilizando el VLC, realizo una tabla comparativa entre ellas “Tabla: 5”, que me permita tener un panorama sobre las plataformas y el impacto dentro del mercado actual.

Elementos	Solicitudes			
	Quartier Camille Claudel	E. leclerc	Aswaaq	Carrefour Lille
Fabrica	Oledcomm	Oledcomm y E.leclerc store	Philips, Aisle411, Value Labs, AlphaData y Aswaaq	Philips, IBA y Carrefour
Plataforma	Android & IOS	Android & IOS	Android & IOS	Android & IOS
Idioma	Francés	Francés	Árabe e Inglés	Francés
Categoría	Smart City	Smart Building	Smart Building	Smart Building
Cuenta de usuario	X	✓	✓	✓
Administrar el contenido	✓	✓	✓	✓
Administrar información LED	✓	✓	✓	✓
Ver estadísticas sobre LEDs	X	✓	✓	✓
Elementos para el administrador				
Ver contenido	✓	✓	✓	✓
Guardar contenido	X	✓	✓	✓
Subir contenido	X	X	X	X
Ver el contenido cargado por los usuarios	X	X	X	X
Explorar el mapa visual de la ubicación de LEDs	X	✓	✓	✓

Tabla 4: Características del impacto

Componentes: Al ser una tecnología muy nueva, existen pocos dispositivos lanzados al mercado; muchas de estas luminarias habilitadas con LiFi pueden integrarse completamente dentro de un sistema de iluminación total con controles, sin comprometer la calidad de la luz o el rendimiento. Las luminarias Philips habilitadas con LiFi tienen un módem “Fig.15” de bajo perfil integrado en la luminaria con conectividad plug-and-play, habilitando LiFi en algunas luminarias más populares, incluidas Philips PowerBalance gen2 y Philips LuxSpace downlight. Philips PowerBalance gen2 habilitado para LiFi es ideal para oficinas y escuelas debido a su amplia zona de cobertura, mientras que el downlight LuxSpace de Philips es el más adecuado para crear zonas LiFi seguras y discretas, perfectas para hospitales, salas y dormitorios.

Modem: Este es el dispositivo que permite a las luminarias LED (registradas en el mercado como LEDLiFi), poder conectarse y generar una comunicación por el VLC.

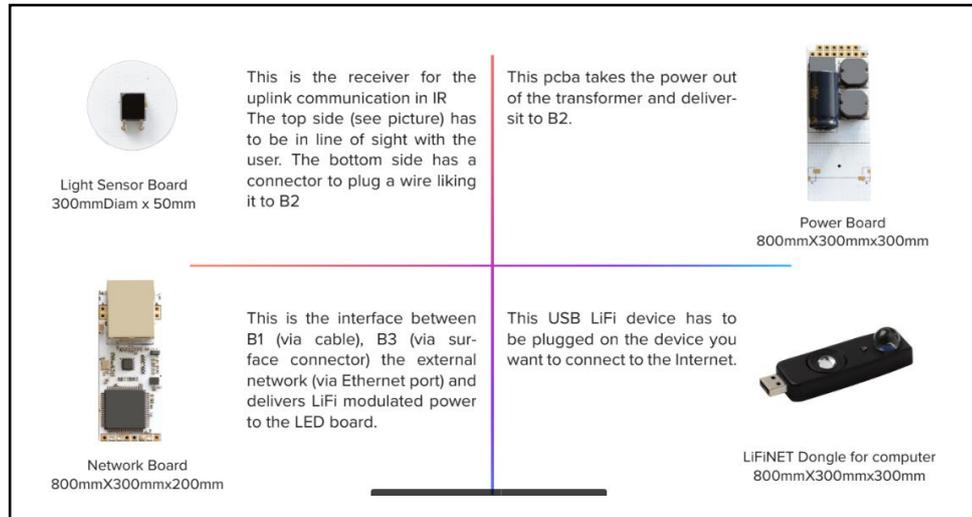


Fig.13. Componentes y descriptiva del modem. Este es el receptor que permite la comunicación de enlace ascendente en IR, en el lado superior de la “Fig.13”, tiene que estar en línea de vista con el usuario. El lado inferior tiene un conector para conectar un cable a B2. Esta PCBA elimina la energía del transformador y la entrega a B2. Esta es la interfaz entre B1 (por cable), B3 (a través de sur-conector de cara) y el externo red (a través del puerto Ethernet) que brinda potencia modulada LiFi a la placa LED. Este dispositivo USB LiFi tiene que estar conectado en el dispositivo que quiere conectarse a internet.



TX	Características	Precio
	<b>Velocidad Transmitida</b>	€ 24,95
<b>EFICIENCIA</b>	50 Mbit/s	
<b>LUMINARIA</b>	<b>Formato De Modulación</b>	
<b>90 LM/W LED</b>	OFDM	
<b>LUMINOSIDAD</b>	<b>Ancho de Banda</b>	
<b>1000 LM</b>	30 Mb/s.	
<b>CONO DE</b>	<b>Potencia Transmitida (Densidad Espectral de Potencia)</b>	
<b>EMISIÓN 90°</b>	34 dBm. / 3 W.	
	<b>Canal De Entrada</b>	
	Ethernet	

Tabla 5: Características del LED Philips Slim Ledinaire 11 W



<b>TX</b>	<b>Características</b>	<b>Precio</b>
	<b>Velocidad Transmitida</b>	€ 34,95
<b>EFICIENCIA LUMINARIA</b>	50 Mbit/s	
<b>87 LM/W LED</b>	<b>Formato De Modulación</b>	
<b>LUMINOSIDAD</b>	OFDM	
<b>2000 LM</b>	<b>Ancho de Banda</b>	
<b>CONO DE EMISIÓN 90°</b>	30 Mb/s.	
	<b>Potencia Transmitida (Densidad Espectral de Potencia)</b>	
	34 dBm. / 3 W.	
	<b>Canal De Entrada</b>	
	Ethernet	

Tabla 6: Características del LED Philips Slim Ledinaire 23 W

Para este tipo de tecnología implementada por Philips, es necesario que los dispositivos conectados en red utilicen un DONGLE USB para el intercambio de datos. En el futuro se espera que, a medida que más fabricantes vayan apostando por el LiFi, estén disponibles dispositivos con este receptor ya integrado. Porque además, este DONGLE USB supone también cierta limitación en la tasa máxima de transferencia y en el ‘retraso’ en el intercambio de paquetes.

Antes de describir el comportamiento del DONGLE USB para LiFi, primero explicaremos que es la estructura DONGLE y su funcionamiento.

**DONGLE:** La palabra DONGLE se originó en dispositivos de seguridad, para referirse a las llamadas mochilas o llaves de seguridad en español, para luego extenderse a todos los dispositivos USB personales. Las llaves de seguridad llevan cifrados los datos de activación sin los cuáles un determinado software no funciona o funciona con limitaciones. En la arquitectura LiFi hace referencia al Transceptor, como se muestra en la “Fig.13”. Este transceptor es el dispositivo que transmite y recibe datos de Internet basados en la luz como portador del medio. Este dispositivo convierte el cuadro de Ethernet al marco OFDM compatible que se transmite y recibe utilizando los diodos apropiados. El fotodiodo Si-PIN se usa en la parte receptora mientras que el LED se usa en la parte transmisora como se muestra en la “Fig.14”. El transceptor LiFi o el dongle LiFi se utiliza para navegar por internet con tecnología LiFi por el VLC.

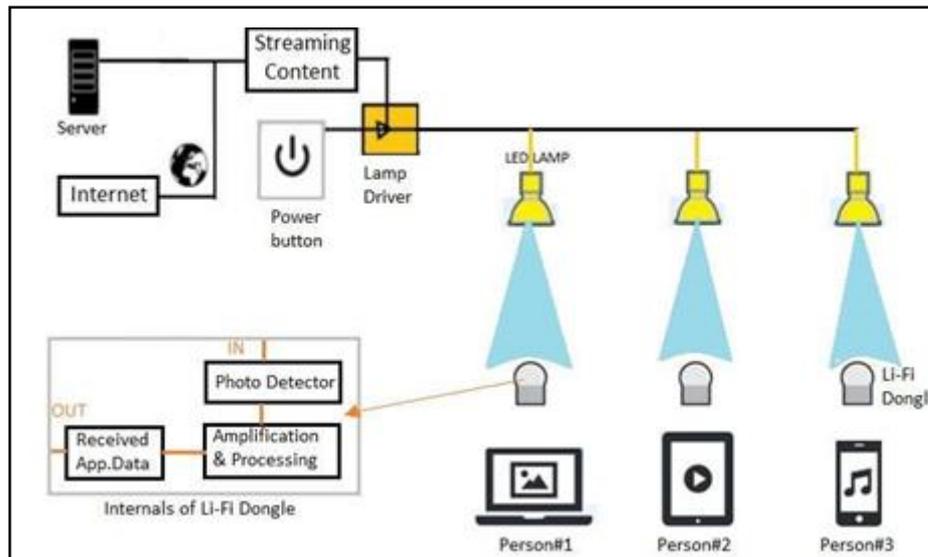


Fig.13. Arquitectura LiFi, con LiFi Dongle.

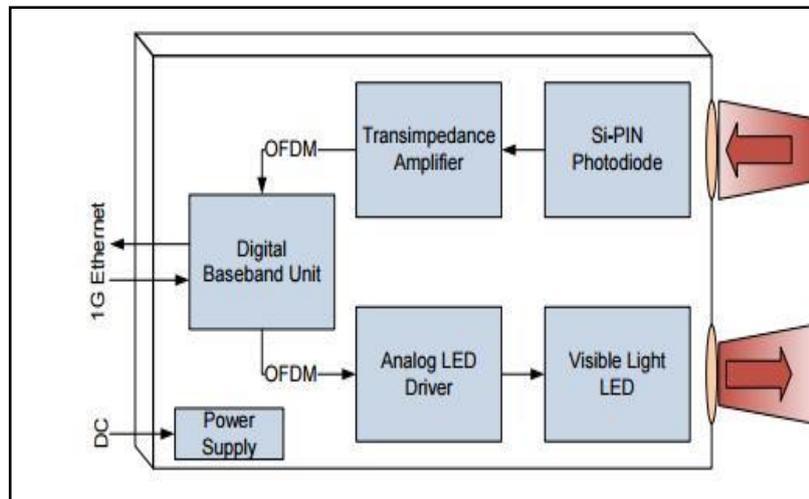


Fig.14. Arquitectura interna de un Transceptor Dongle

**DONGLE USB:** Es la adaptación del DONGLE para puertos USB, funciona como una llave que detecta la luz, (llave USB LiFi) conectada al puerto USB de una computadora portátil o tableta, Los dispositivos deben emplear un DONGLE USB para recibir y decodificar datos del enlace descendente, esto se realiza mediante un decodificador interno que posee, convirtiendo los datos fotónicos a electrónicos y para enviar la información del enlace ascendente a través del VLC lo realiza a través del LED infrarrojo, que permite a la señal de carga modulada ser devuelta a las luminarias de la red, como se muestra en la “Fig.15”.



## LZ4-00MA00

LED ENGIN



LONGITUDES DE ONDA TX	Características	Precio
<b>EFICACIA LUMINOSA 10 W RGB LED</b>  <b>RED 621 NM. GREEN 525 NM. BLUE 460 NM.</b>  <b>CONO DE EMISIÓN 115°</b>	<b>Velocidad Transmitida</b>	€ 16,08
		1.2 Gbit/s
	<b>Formato De Modulación</b>	
		PAM-8
	<b>Ancho de Banda</b>	
	De 100 Hasta 260 MHz	
	<b>Potencia Transmitida (Densidad Espectral de Potencia)</b>	
		33 dBm. / 2 W.

Tabla 8: Características del LED LZ4-00MA00 [5]

## LZ4-20MC00

LED ENGIN



LONGITUDES DE ONDA TX	Características	Precio
<b>EFICACIA LUMINOSA 10 W RGB LED</b>  <b>RED 624 NM. GREEN 525 NM. BLUE 457 NM</b>  <b>CONO DE EMISIÓN 60°</b>	<b>Velocidad Transmitida</b>	€ 19,10
		2.93 Gbit/s OFDM y 3.22 Gbit/s CAP en WDM
	<b>Formato De Modulación</b>	
		OFDM (desde 4 Q-AM hasta 512 Q-AM) y CAP (64-CAP)
	<b>Ancho de Banda</b>	
	Tanto para OFDM y CAP 230 MHz	
	<b>Potencia Transmitida (Densidad Espectral de Potencia)</b>	
		30.5 dBm. / 1 W

Tabla 9: Características del LED LZ4-20MC00 [6]



LONGITUD DE ONDA TX	Características	Precio
<b>ULTRA WHITE</b> <b>CX= 0.32, CY=0.32</b> <b>ACC. Y <math>\lambda = 750</math> NM.</b> <b>EFICIENCIA</b> <b>ÓPTICA 61 LM/W</b> <b>CONO DE</b> <b>EMISIÓN 45°</b>	<b>Velocidad Transmitida</b> 10 a 40 Mbit/s <b>Formato De Modulación</b> PAM y OFDM <b>Ancho de Banda</b> 720 MHz <b>Potencia Transmitida (Densidad Espectral de Potencia)</b> 27 dBm. / 500 mW.	€ 2,95

Tabla 10: Características del LED LUW CN7M-HYJY-EMKM [7]

SFH 2505-Z



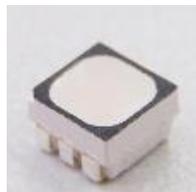
LONGITUDES DE ONDA TX	Características	Precio
<b>LAMBDA 870 NM.</b> <b>CONO DE</b> <b>EMISIÓN 40°</b>	<b>Velocidad Transmitida</b> 3 Gbit/s <b>Formato De Modulación</b> M-PAM <b>Ancho de Banda</b> 17 MHz <b>Potencia Transmitida (Densidad Espectral de Potencia)</b> 0 dBm. / 1 mW.	€ 0,88

Tabla 11: Características del LED OSRAM SFH 2505-Z [8]



LONGITUDES DE ONDA TX	Características	Precio
LAMBDA 650 NM.	<b>Velocidad Transmitida</b> 100 Mbit/s	€ 9,35
	<b>Formato De Modulación</b> M-PAM	
	<b>Ancho de Banda</b> 17 MHz	
	<b>Frecuencia de Datos</b> 100 Mb/s	
	<b>Potencia Transmitida (Densidad Espectral de Potencia)</b> -12.5 dBm a -16 dBm. / 56μW a 55μW.	

Tabla 12: Características del LED BROADCOM SP000063871 [8]

Cree® PLCC6 3 in 1 SMD LED  
CLX6A-FKB

LONGITUDES DE ONDA TX	Características	Precio
RED 620 NM.	<b>Velocidad Transmitida</b> 3.4 Gbit/s	€ 15,51
GREEN 520 NM.	<b>Formato De Modulación</b> OFDM o DMT (desde 4 Q-AM hasta 512 Q-AM)	
BLUE 470 NM.	<b>Ancho de Banda</b> 512 subportadoras a 280 MHz	
CONO DE EMISIÓN 45°	<b>Potencia Transmitida (Densidad Espectral de Potencia)</b> 29 dBm / 500 mW	

Tabla 13: Características del LED Cree PLCC6 CLX6A-FKB [9]

Componentes para la recepción:



RX	Características	Precio
<p><b>HAMAMATSU</b> PHOTON IS OUR BUSINESS</p> <p><b>Si APD</b></p> <p>S12053-02/-05/-10 S9075, S5344, S5345</p> <p>Short wavelength type APD, for 600 nm band</p>	<p><b>Velocidad Tx (Ancho de Banda)</b> 280 MHz</p> <p><b>Responsividad</b> 620 nm. a 0.42 A/W</p> <p><b>Potencia del Detector (Sensibilidad):</b> -30 dBm. / 1 <math>\mu</math>W.</p> <p><b>Tecnología MIMO Soportada</b> Codificación de Repetición (RC) Multiplexación Espacial (SMP)</p>	<p>€ 20,66</p>

Tabla 14: Características del APD S9075 [9]

Si PIN photodiode  
S10784



High-speed detector with plastic package

The S10784 is a high-speed APC (auto power control) detector developed for monitoring laser diodes with a peak wavelength of 660 nm or 780 nm.

RX	Características	Precio
<p><b>HAMAMATSU</b> PHOTON IS OUR BUSINESS</p>	<p><b>Velocidad Tx (Ancho de Banda)</b> 250-300 MHz</p> <p><b>Responsividad</b> 650-780 nm. a 0.40 Hasta 0.52 A/W</p> <p><b>Potencia del Detector (Sensibilidad):</b> -50 dBm. / 0,1 <math>\mu</math>W.</p> <p><b>Tecnología MIMO Soportada</b> Codificación de Repetición (RC) Modulación espacial (SM)</p>	<p>€ 6,40</p>

Tabla 15: Características del Fotodiodo PIN S10784 [5], [6]



### SFH213

Photodiode PIN Chip 850nm 0.62A/W Sensitivity 2-Pin T-1 3/4 T/R

Manufacturer Part #: SFH213

Avnet Manufacturer Part #: SFH213

RX	Características	Precio
	<b>Velocidad Tx (Ancho de Banda)</b>	€ 0,33
	17 MHz	
	<b>Responsividad</b>	
	0.62 A/W	
	<b>Potencia del Detector (Sensibilidad):</b>	
	-60 dBm. / 0,001 $\mu$ W.	
	<b>Tecnología MIMO Soportada</b>	
	Codificación de Repetición (RC)	
	Modulación espacial (SM)	

Tabla 16: Características del Fotodiodo PIN SFH213 [8]

AD800-11-TO52S1.3

First Sensor



RX	Características	Precio
	<b>Velocidad Tx (Ancho de Banda)</b>	€ 2,56
	650 MHz	
	<b>Responsividad</b>	
	0.28 A/W	
	<b>Potencia del Detector (Sensibilidad):</b>	
	-47 dBm. / 0,2 $\mu$ W.	
	<b>Tecnología MIMO Soportada</b>	
	Codificación de Repetición (RC)	

Tabla 17: Características del Fotodiodo Avalanche APD AD800-11 [10]

SFH250 / SFH250V  
Plastic Fiber Optic Photodiode Detector  
Plastic Connector Housing



RX	Características	Precio
	<b>Velocidad Tx (Ancho de Banda)</b>	€ 9,41
	650 MHz	
	<b>Responsividad</b>	
	0.44 A/W	
	<b>Potencia del Detector (Sensibilidad):</b>	
	-33 dBm. / 0,05 μW.	
	<b>Tecnología MIMO Soportada</b>	
	Codificación de Repetición (RC)	
	Modulación espacial (SM)	

Tabla 18: Características del Fotodiodo SFH 250 [8]

**IV. ANÁLISIS DE LAS DEMOSTRACIONES EXPERIMENTALES PREVIAS**

**IV.1. INDOOR OPTICAL WIRELESS SYSTEMS: TECHNOLOGY, TRENDS, AND APPLICATIONS**

T. Koonen, “Indoor Optical Wireless System: Technology, Trends and Applications”, IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 36, No. 8, Apr 15, 2018. [11]

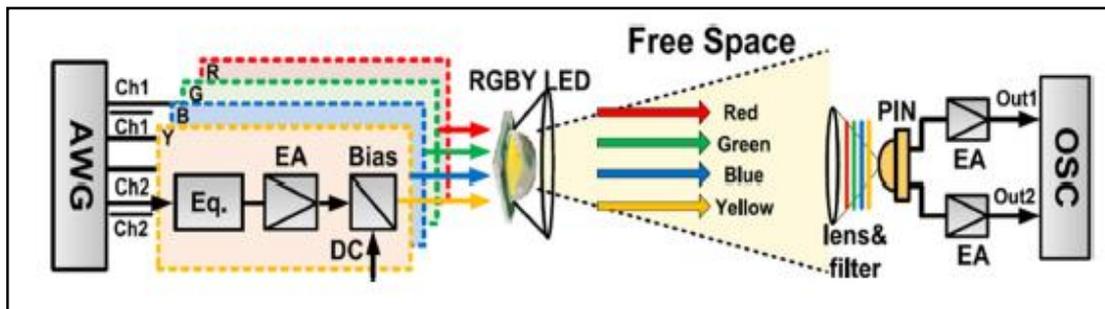


Fig.17. Sistema VLC de cuatro colores de 8 Gbit/s que usa modulación CAP

Al utilizar en este sistema la multiplexación por división de longitud de onda (WDM), es adecuado emplear un generador de forma de onda arbitraria (Arbitrary Waveform Generator AWG) para multiplexar en gran número y entregar varias señales a los correspondientes canales, que en este caso son:  $\lambda$  red = 640 nm,  $\lambda$  green = 530 nm y  $\lambda$  blue = 420 nm.

Los LEDs que están diseñados principalmente para fines de iluminación por lo general tienen implementado un chip LED azul más un recubrimiento de fósforo, permitiendo generar la luz blanca. El tiempo de disminución lenta del fósforo limita severamente el ancho de banda a solo unos pocos MHz, (como se describió en la sección de los transmisores VLC en este trabajo). Se pueden obtener algunas mejoras al filtrar la luz LED azul en el receptor, pero el ancho de banda sigue siendo restringido (típicamente menos 20 MHz) como se muestra en la “Tabla 1”. En este esquema se emplea la modulación NRZ-OOK de filtro azul básico (como se muestra en la sección métodos modulaciones, en el apartado de On-Off Keying), logrando una transmisión de 40 Mbit/s, con un nivel de iluminación de 700 lx. (En áreas de oficina e interiores se requieren 200-800 lx).

Al tratarse de un espectro eficiente modulado con OFDM con 256 subportadoras necesitamos utilizar un ecualizador que permita modificar el volumen del contenido de las frecuencias y para lograrlo modifica sus amplitudes, posteriormente carga los bits y los “encamina”, al tener ya los datos listos para transmitir pasa por el led RGBY y son desplegados hacia el lente y filtro. La aplicación de OFDM con 256 subportadoras y carga de bits, junto con un filtro de pre-ecualización antes del controlador del LED y un filtro azul antes de un receptor PIN-TIA, arroja una velocidad de datos neta de 2.0 Gbit/s. a un nivel de iluminación de 700 lx (estando en el rango de iluminación de interiores) y una potencia de salida de 5.7 mW.

A pesar de que todos los elementos del LED tienen un ancho de banda limitado, típicamente algunos sobre los 15 MHz, al haberlos modulado por separado la capacidad se puede triplicar. Estas variaciones de color instantáneas no deberían ser perceptibles por el ojo humano, por lo que deberían ser más rápidas (menores a 10 ms) que el umbral crítico de fusión de parpadeo. La transmisión por el LED multicolor debe ajustarse de modo que se promedia el tiempo y se perciba un color constante específico, lo que requiere algoritmos de conducción de LED adecuados. Otro enfoque más, es aplicar una matriz de  $\mu$ LED en cada uno, debido a su pequeña área activa puede tener un gran ancho de banda. Usando una matriz de LED azul  $\lambda = 420$  nm, cada uno con un diámetro de área activa de solo 42  $\mu$ m, ancho de banda de 400 MHz y 5.7 mW de potencia de salida, con modulación PAM-4 entrega una velocidad de 3.8 Gbit/s (excluyendo 7% FEC) sobre la distancia de 0.75 m.

También se puede lograr la velocidad de 5.37 Gbit/s. (5 Gbit/s excluyendo FEC), cuando se utiliza DCO-OFDM con subportadoras cargadas de 512 bits. (Como se indicó en la sección métodos de modulación en el apartado de OFDM, óptica polarizada en DC con señales bipolares).

La multiplexación espacial puede abrir otra ruta hacia una mayor capacidad de VLC. En una configuración de sistema MIMO con una matriz bidimensional de 9 direccionables individualmente,  $\mu$ LEDs azules de 39  $\mu$ m, que emiten a  $\lambda = 450$  nm y con 9 APDs (cada uno de 200 x 200  $\mu$ m<sup>2</sup> y un ancho de banda mayor a 90 MHz) realizados en un proceso CMOS de 0,18  $\mu$ m, con PAM-8 se logró

una modulación de aproximadamente 890 Mbit/s por canal, en un enlace de espacio libre de 50 cm y una velocidad agregada de 6,95 Gbit/s (excluyendo el 7% de FEC).

Los sistemas bidireccionales punto a punto ofrecen una conectividad de 1 Gbit/s, con baja latencia (menor a 2 ms), llamadas LiFi, las técnicas de VLC (que básicamente son de punto a punto) se extienden a un sistema totalmente conectado a la red, en una arquitectura de red atto-cells, como se muestra en la “Fig.9”, que admite el traspaso continuo entre estas células y el funcionamiento bidireccional.

#### IV.2 WIRELESS VISIBLE LIGHT COMMUNICATION EMPLOYING FEED-FORWARD PRE-EQUALIZATION AND PAM-4 MODULATION.

X. Li, N. Bamiedakis, X Guo, J.J.D. McKendry, E. Xie, R. Ferreira, E. Gu, M. D. Dawson, R. V. Penty, and I. H. White, “Wireless Visible Light Communications Employing Feed-Forward Pre-Equalization and PAM-4 Modulation”, IEEE JOURNAL OF LIGHWAVE TECHNOLOGY, Vol. 34, No. 8, Apr. 15, 2016. [10]

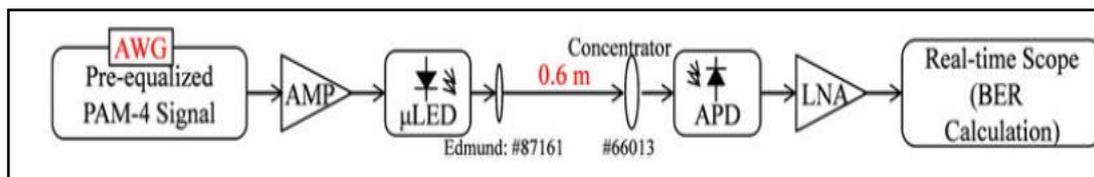


Fig.18. Configuración experimental del VLC utilizando pre-equalización

Analizaremos bloque a bloque esta comunicación con distancia de 5 m, entre transmisor y receptor.

Como primer bloque tenemos un pre-equalizador que permite ecualizar una señal modulada PAM-4, otorgando el enfoque de mitigar las interferencias entre símbolos (ISI) dentro del sistema, siendo realizable la mejoría de la tasa de transferencia de datos, generando un bit error rate (BER) por debajo de  $10^{-6}$  y logrando 80 Mb/s de velocidad de transmisión de datos.

La señal PAM generada se amplifica a los niveles de tensión apropiados a través del amplificador RF SFH-826H, modula un cuadrado de  $20 \times 20 \mu m^2$  (siendo esta el área del  $\mu LED$ ), con 450 nm de  $\lambda$  del  $\mu LED$ , que permite apropiadamente elevar voltaje (amplitud) y ganancias (modulación generada por PAM).

Para la transmisión de luz y datos lo realiza un  $\mu LED$  elaborado a base de nitruro de galio (GaN), teniendo como parámetro y requerimiento transmitir a una potencia de 1 mW. Tomando en consideración un ancho de banda de modulación relativamente grande, más grande que los 100 MHz, como se muestra en la “Tabla 1”, trabaja con un diámetro de 800  $\mu m$ , generando una mejor orientación de la luz, utiliza un diminuto lente (Edmund #87-161) con una apertura de 0.64 NA (apertura numérica), mejorando el enlace.

Para la recepción utilizamos otro lente de dimensiones un poco más grandes que el de transmisión (Edmund #66-013), funciona como colimador y permite concentrar la luz, enfocando la luz en el fotodetector APD (AD800-11) que posee una responsividad de 0.28 A/W y puede trabajar en un ancho de banda de 650 MHz, como se muestra en la “Tabla 17”.

Para la recepción de la señal eléctrica se utiliza un amplificador de bajo ruido (LNA, ZFL-1000LN), para obtener las formas de onda y los diagramas se necesita un osciloscopio digital con capacidad de almacenar datos y gráficas. Cabe recalcar, aunque en el diagrama indique una distancia 0.6 m, este sistema está diseñado para alcanzar una distancia máxima de enlace aproximadamente de hasta 5 metros.

#### IV.3. $\mu$ LED-BASED SINGLE-WAVELENGTH BI-DIRECTIONAL POF LINK WITH 10 GB/S AGGREGATE DATA RATE

X. Li, N. Bamiedakis, J. Wei, J. McKendry, E. Xie, R. Ferreira, E. Gu, M. Dawson, R. V. Pentyl, I. White, “ $\mu$ LED-Based-Single-Wavelength Bi-directional POF Link With 10Gb/s Aggregate Data Rate”, IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 33, No. 17, Sep. 1, 2015. [12]

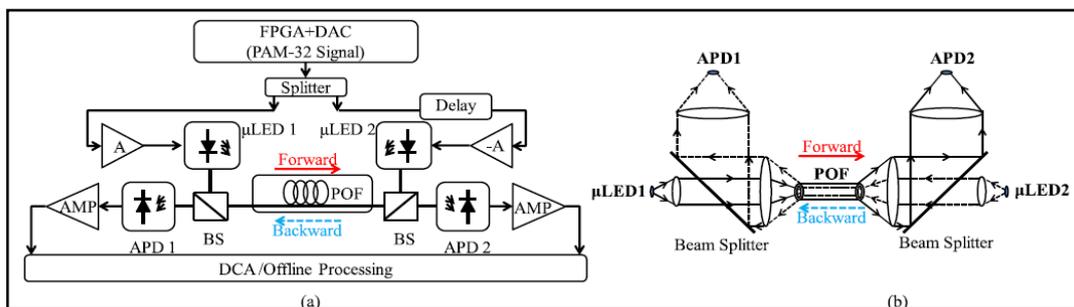


Fig.19. a) Configuración experimental para implementar el enlace BiDi SI-POF; b) esquema de acoplamiento óptico en cada extremo de POF

Dividiremos en dos bloques, a y b respectivamente, haciendo énfasis en el bloque de los  $\mu$ LED. Analizando la parte a, si bien este esquema posee un arreglo de índice de paso mediante fibra óptica de plástico (SI-POF), es útil porque utilizan  $\mu$ LEDs, que consienten este tipo de enlace (como se describe en el la sección de transmisores VLC), permitiéndonos entender la capacidad de transmitir a altas velocidades minimizando pérdidas y descubriendo los fotodiodos avalancha (APDs), que podemos utilizarlos para generar una comunicación mediante VLC.

Centrándonos en el funcionamiento observamos que al tener un FPGA-DAC, que aparte de ser programable es un convertidor digital-análogo, a su salida está conectado a un splitter, que permite separar y repartir a los bloques que añadirán amplitud mediante el amplificador (SHF-826 H), con ancho de banda de 70 KHz - 25GHz, esto permitirá a las señales creadas por el FPGA, ser transmitidas por los  $\mu$ LED 1 y  $\mu$ LED 2, llegarán a los fotodiodos avalancha (APDs), los cuales

recibirán las señales y darán paso a los beam splitter (BS), posteriormente serán amplificados mediante el amplificador (LNA, ZFL-1000L N) que permite trabajar con un ancho de banda de 0.1-1000 MHz, para luego terminar con el proceso mediante un convertidor análogo-digital.

En la parte b, dentro del acoplo de fibra óptica de plástico (POF), analizamos los parámetros de transmisión y de recepción de los  $\mu$ LEDs y los fotodiodos avalancha (APDs); los  $\mu$ LEDs tienen la capacidad de transmitir y manejar velocidades de hasta 5 Gb/s. así como potencias de -24.5 dBm y dentro de sus características físicas posee un diámetro de 20  $\mu$ m, los APDs que poseen una cavidad de manera vertical de fábrica que permiten una mejor recepción de los datos transmitidos y un acoplo en el rango de los 2.4 dB a los 2.8 dB. Esto genera un bit error rate (BER) en una transmisión de 10 metros (distancia de la fibra óptica de plástico) menor a  $10^{-3}$ , una potencia de recepción en el rango de los 13.8 dBm a -14.4 dBm y una transmisión de tasa de datos de velocidad de 5 Gb/s por enlace, al ser con agregado (bidireccional) genera el total de 10 Gb/s. de velocidad.

#### IV.4. HYBRID POF/VLC LINK WITH M-PAM AND MLP EQUALISER

I. N. Osahon, E. Pikasis, S. Rajbhandari, W. O.Popoola, “Hybrid POF/VLC link with M-PAM and MLP Equaliser ”, IEEE ICC SAC Symposium Access System and Networks Track, 2017. [8]

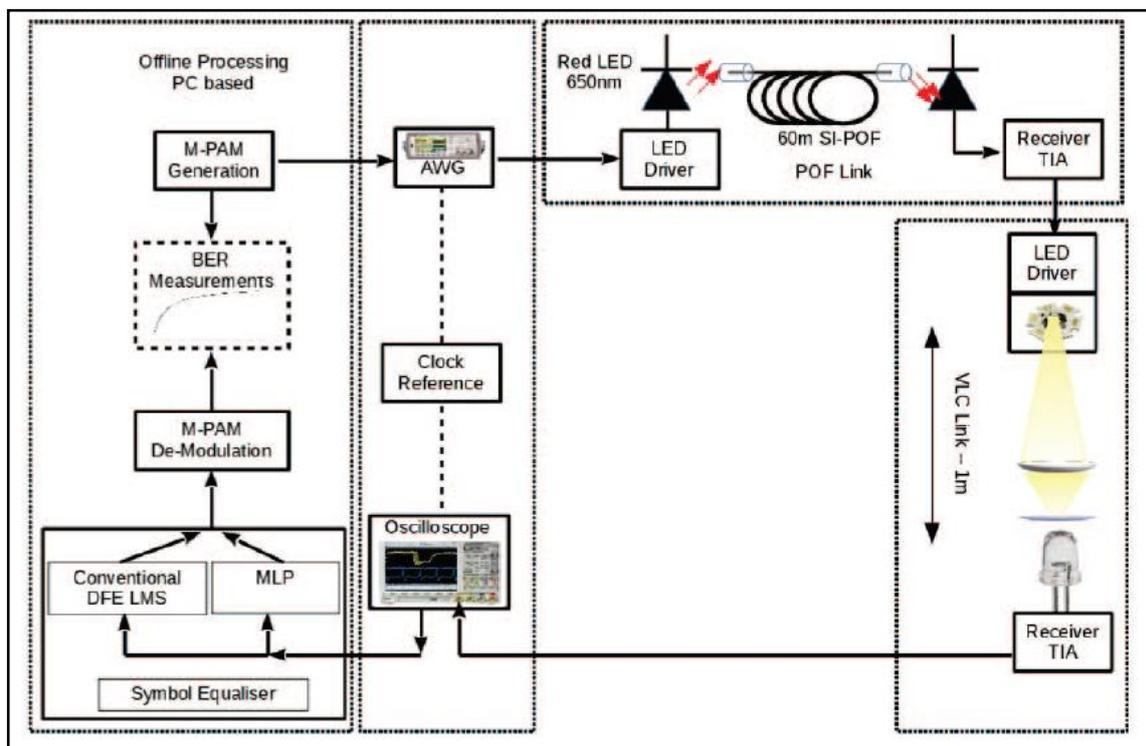


Fig.20. Diagrama de bloques de la configuración experimental para el sistema POF-VLC

Este enlace está diseñado con 60 metros de fibra óptica de plástico, posteriormente la transmisión VLC tal como indica la “Fig.20” está a una distancia de 1 metro, dado los componentes empleados y resultados es posible transmitir a una distancia aproximada de 3 m.

Este primer bloque indica la generación de la señal con las variaciones de modulación en PAM (modulación por amplitud de pulso) “Fig.3”, presenta la utilización del MPL ecualizador (de percepción multicapa), que reduce la interferencia entre símbolos (ISI) en el canal, pues se está utilizando una fibra óptica de plástico con índice de paso (SI-POF) y es un parámetro requerido para generar una transmisión híbrida, este ecualizador posee mejores prestaciones que un ecualizador convencional, da paso al proceso de demodulación, luego a las mediciones que permitan determinar el bit error rate (BER), para seguir por el bloque de AWG.

Al tener ya la modulación, pasa por el bloque AWG de numeración #33622A, donde a través de la rejilla guiada de guía onda genera la multiplexación de las longitudes de onda, llegará al LED driver que permitirá mediante el LED Red (SFH 757) como se muestra en la “Tabla 12”, que está trabajando con una  $\lambda = 650$  nm, transmite la señal de potencia óptica por el enlace basado en fibra óptica de plástico, que al pasar el trayecto de 60 m. será recibido por el fotodiodo (SFH 250) “Tabla 18” que trabaja con una responsividad de 0.44 A/W a 650 nm.

Por último, la recepción de la señal eléctrica, que el final del enlace POF conduce directamente al LED (OSRAM LED de OSRAM), este led maneja un límite de ancho de banda en el rango de 3 MHz hasta los 17 MHz, transmite los datos a través de la luz visible a un lente que focalizará y canalizará esta luz hacia el fotodiodo PIN (SFH 213) “Tabla 16” y recibirá una potencia de ruido equivalente por debajo de 0.028 pW/Hz. Para luego ser analizado todos los datos por el osciloscopio (MSO7104B), con un convertidor análogo-digital (ADC), con resolución de 8 bit, que permita verificar datos simulados con los implementados.

## ***V. PROPUESTA DE SISTEMA VLC***

Nuestro estudio se basa en dar a conocer los componentes del mercado actual, orientados hacia la iluminación de interiores y transmisión de datos por el VLC (descritos en la sección III). Al tratarse de iluminación, tomaremos en cuenta los rangos establecidos en iluminación de interiores (detallado en la sección II); en cuanto a transmisión de datos, será su potencia (descrita en la sección II y analizados en la sección IV).

### ***V.1. DEFINICIÓN DE ESCENARIO***

Para realizar nuestro escenario, tomaremos en cuenta los parámetros del tamaño y geometría de una sala.

Proporciones de la sala: Hemos tomado una medida estándar de sala, como se muestra en la “Fig.21”. En esta sala el LED tendrá una distancia de enlace (entre el transmisor y el receptor) de 2,20 m, es decir hasta la mesa “Fig.22”.

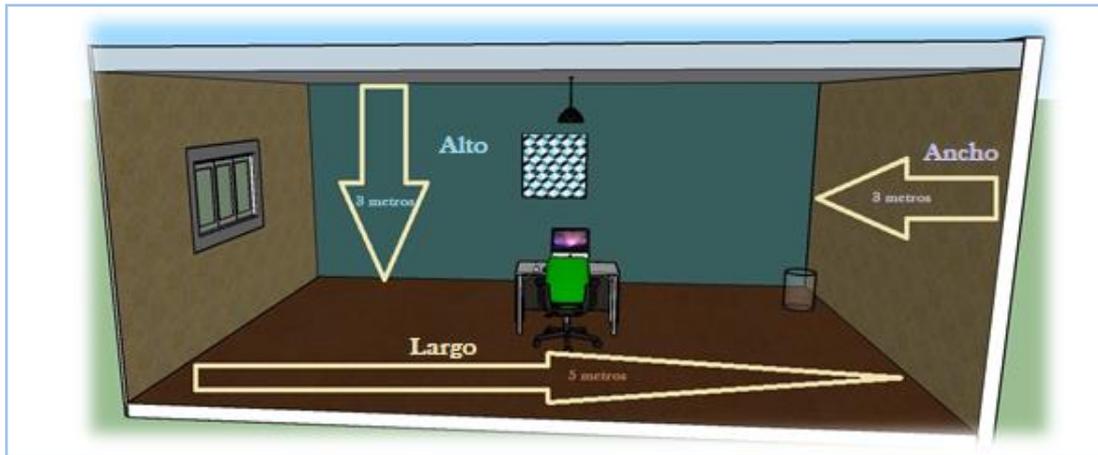


Fig.21. Proporciones de la sala

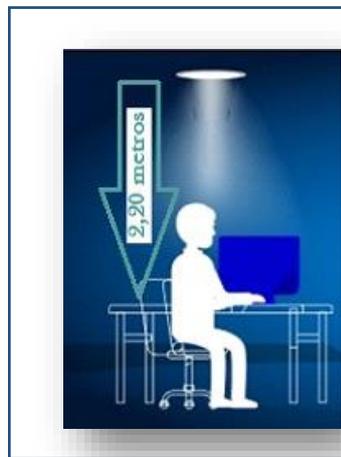


Fig.22. Distancia del LED hasta la mesa

## V.2. SELECCIÓN DE COMPONENTES

Al haber realizado un estudio sobre las características científicas y técnicas de los componentes, podemos realizar una selección de transmisores y receptores, sin descuidar los parámetros antes descritos, para generar alternativas de transmisión por el VLC. Para posteriormente realizar la respectiva comparación y establecer alternativas de sistemas VLC para comunicaciones e iluminación indoor.

Para los parámetros lumínicos nos referenciaremos en la UNE 12464.1 Norma europea sobre la iluminación para interiores “Fig.23” [16], Para poder elaborar alternativas que me permitan cumplir con rangos de iluminación de acuerdo al espacio y al nivel de actividad, “Fig. 24”, [13] es necesario sacar una media en lux.

Es necesario realizar los cálculos que me permitan realizar una comparación entre los valores que me otorgan las luminarias led estudiadas y los niveles requeridos para poder crear alternativas.

NORMATIVA					
UNE 12464.1–Norma europea sobre la iluminación para interiores					
<b>OFICINAS</b>					
<p>Un buen alumbrado de un edificio de oficinas será aquel que proporcione la luz adecuada, durante el tiempo adecuado y en el lugar adecuado. Esto hará que los trabajadores que se encuentran en él, puedan realizar su trabajo eficientemente y sin grandes esfuerzos o fatigas visuales. Además, un buen alumbrado puede crear un ambiente agradable y contribuir a la creación de atmósferas diferentes, adecuadas a las múltiples tareas que hoy día se llevan a cabo en las oficinas.</p> <p>Estudios científicos nos demuestran que la luz no sólo mejora el ambiente de la oficina, sino que también influye en la realización de las tareas, puesto que determina el estado de ánimo de los empleados ayudándoles a concentrarse y a mejorar la productividad.</p> <p>La nueva normativa de la UE "Iluminación de interiores" (UNE 12464-1) ha entrado en vigor para mejorar la iluminación teniendo en cuenta las necesidades de los empleados. Según esta normativa, aquellas lámparas con un índice de reproducción del color menor a 80 no deben utilizarse en interiores donde las personas trabajan durante largos períodos.</p>	<p>Además de la reproducción del color, la normativa UNE 12464-1 también regula normas para el deslumbramiento y los parpadeos. Con el uso de un equipo electrónico, los molestos parpadeos de las lámparas fluorescentes se reducen significativamente, y se consigue disminuir el cansancio visual.</p> <p>Durante las dos últimas décadas, la ciencia médica ha demostrado los efectos estimulantes de una buena iluminación en el ambiente de trabajo. Si se diseña correctamente, el ambiente general de la oficina (incluida la iluminación) contribuye positivamente a la sensación de salud y al rendimiento profesional de la gente que trabaja en ella.</p> <p>Una buena iluminación tendrá a la larga efectos en la productividad de todo su negocio, ya que sus empleados:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Desempeñarán sus tareas correctamente y estarán en general más motivados y serán productivos.</li> <li>Estarán más atentos y serán más precisos, lo que producirá menos errores y accidentes.</li> <li>Experimentarán una sensación general de bienestar, con la consiguiente reducción del absentismo.</li> </ul>				
<b>TABLA DE OFICINAS</b>					
<b>1. OFICINAS</b>					
Nº REF	TIPO DE INTERIOR, TAREA ACTIVIDAD	$E_m$ lux	UGR <sub>L</sub>	R <sub>a</sub>	OBSERVACIONES
1.1	ARCHIVO, COPIAS, ETC.	300	19	80	
1.2	ESCRITURA, ESCRITURA A MÁQUINA, LECTURA Y TRATAMIENTO DE DATOS	500	19	80	
1.3	DIBUJO TÉCNICO	750	16	80	
1.4	PUESTOS DE TRABAJO DE CAD	500	19	80	
1.5	SALAS DE CONFERENCIAS Y REUNIONES	500	19	80	- La iluminación debería ser controlable.
1.6	MOSTRADOR DE RECEPCIÓN	300	22	80	
1.7	ARCHIVOS	200	25	80	

Fig.23. UNE 12464.1 Norma europea sobre la iluminación para interiores, sección oficinas [16]

LUGAR O FAENA	ILUMINACION
Pasillos, bodegas, salas de descanso, comedores, servicios higiénicos, salas de trabajo con iluminación suplementaria sobre cada maquina o faena, salas donde se efectúen trabajos que no exigen discriminación de detalles finos o donde hay suficiente contraste.	150
Trabajo prolongado con requerimiento moderado sobre la visión, trabajo mecánico con cierta discriminación de detalles, moldes en funciones y trabajos similares.	300
Trabajo con pocos contrastes, lectura continuada en tipo pequeño, trabajo mecánico que exige discriminación de detalles finos, maquinarias, herramientas, cajistas de imprenta, monotipias y trabajos similares.	500
Laboratorios, salas de consulta y de procedimientos de diagnóstico y salas de esterilización.	500 a 700
Costura y trabajo de aguja, revisión prolija de artículos, corte y trazado.	1000
Trabajo prolongado con discriminación de detalles finos, montaje y revisión de artículos con detalles pequeños y poco contraste, relojería, operaciones textiles sobre género oscuro y trabajos similares.	1500 a 2000
Sillas dentales y mesas de autopsias.	5000
Mesa quirúrgica	20000

Fig.24. Cuadro de iluminación según el lugar y la actividad de trabajo [13]

Desarrollo del cálculo de iluminación:

$$\Phi_T = \frac{E_m * S}{C_u * C_m} \quad (1)$$

Donde:

$\Phi_T$ = Flujo luminoso que un determinado local o zona necesita (en lúmenes): Este dato viene dado por el fabricante en los catálogos.

$E_m$ = Nivel de iluminación del medio (en lux): Parámetro que se calcula para comparar con el parámetro medio de iluminación (en lux).

$S$ = Superficie a iluminar (en  $m^2$ ), para la superficie no utilizamos el dato total del escenario, porque necesitamos la iluminación hasta la altura de la mesa como se muestra en la “Fig.25.”



Fig.25. Distribución de la altura respecto a la mesa

Y para calcular su superficie tendremos que definir el alto, el largo y el ancho de la mesa como se muestra en la siguiente “Fig.26.”

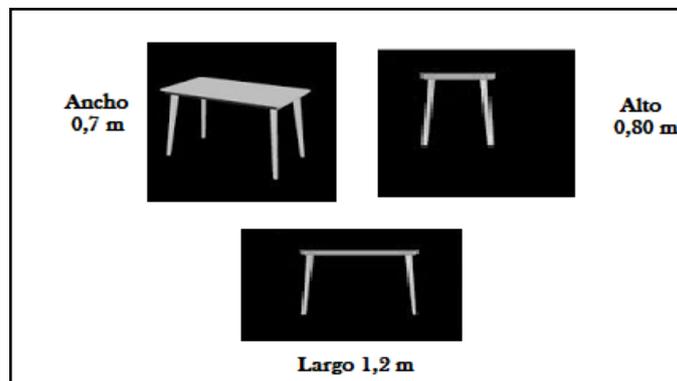


Fig.26. Dimensiones y medidas de la mesa a utilizar

$$S_{\text{mesa}} = \text{largo} * \text{ancho} \quad (2)$$

$$S_{\text{mesa}} = 1,2 * 0,7 = 0,84 \text{ m}^2$$

Este flujo luminoso se ve afectado por dos coeficientes de utilización  $C_u$  y  $C_m$ :

$C_u$ = Coeficiente de utilización: Es la relación entre el flujo luminoso recibido por un cuerpo y el flujo emitido por la fuente luminosa. Lo proporciona el fabricante de la luminaria. Y al tratarse de

iluminación LED están en el rango de 0,91 a 0,97. [16] Nosotros trabajaremos con la media entre estos dos valores:

$$C_u = \frac{0,91+0,97}{2} = 0,94. \tag{3}$$

$C_m$ = Coeficiente de mantenimiento: Es el cociente que indica el grado de conservación de una luminaria, al ser nuevas para este caso de estudio trabajaremos con el valor asignado en la “Fig.27.”

Ambiente	Coeficiente de mantenimiento ( $C_m$ )
Limpio	0.8
Sucio	0.6

Fig.27. Valores del coeficiente de mantenimiento [16]

Parámetro generado por la suma del nivel de luz recomendado en el espacio interior y su trabajo, dividido para 2, (en lux).

$$\frac{E_{tabla\ sitio}+E_{tablaactividad}}{2} \tag{4}$$

Ahora que tenemos definido nuestros parámetros dentro de la fórmula del cálculo de iluminación, procedemos a desarrollar las alternativas.

**ALTERNATIVA 1:**

**ALTERNATIVA 1**

FABRICANTES	TX - RX	PRESUPUESTO EN EUROS
	Tabla 5 + Tabla 7 + Modem	24,95 + 45,00 +112, 50 = 182,45

Tabla 19: Descripción de la alternativa 1

Comparativa con el nivel de iluminación del medio:

$$\Phi_T = \frac{E_m * S}{C_u * C_m} \text{ Despejando } E_m = \frac{\Phi_T * C_u * C_m}{S} \geq \frac{E_{tabla\ sitio} + E_{tablaactividad}}{2} \tag{5}$$

$$E_m = \frac{1000 * 0,94 * 0,8}{0,84} \geq \frac{300 + 500}{2}$$

$$E_m = 895,24 \text{ lux} \geq 400 \text{ lux}$$

Resultado: ALTERNATIVA 1 CUMPLE.

**ALTERNATIVA 2:****ALTERNATIVA 2**

FABRICANTES	TX - RX	PRESUPUESTO EN EUROS
	Tabla 6 + Tabla 7 + Modem	34,95 + 9,41 + 112,50 = 156,86

Tabla 20: Descripción de la alternativa 2

$$E_m = \frac{\Phi_T * C_u * C_m}{S} \geq \frac{E_{\text{tabla sitio}} + E_{\text{tabla actividad}}}{2}$$

$$E_m = \frac{1000 * 0,94 * 0,8}{0,84} \geq \frac{300 + 500}{2}$$

$$E_m = 895,24 \text{ lux} \geq 400 \text{ lux}$$

Resultado: ALTERNATIVA 2 CUMPLE.

**ALTERNATIVA 3:****ALTERNATIVA 3**

FABRICANTES	TX - RX	PRESUPUESTO EN EUROS
	Tabla 8 + Tabla 17	16,08 + 75 = 91,08

Tabla 21: Descripción de la alternativa 3

Comparativa con el nivel de iluminación del medio:

$$E_m = \frac{\Phi_T * C_u * C_m}{S} \geq \frac{E_{\text{tabla sitio}} + E_{\text{tabla actividad}}}{2}$$

$$E_m = \frac{450 * 0,94 * 0,8}{0,84} \geq \frac{300 + 500}{2}$$

$$E_m = 626,6 \text{ lux} \geq 400 \text{ lux}$$

Resultado: ALTERNATIVA 3 CUMPLE.

### V.3. PLANIFICACIÓN

Después de haber estudiado y verificado las alternativas, podemos planificar un escenario donde se proyecte la transmisión y la iluminación basada en los componentes y diseños de celdas. (Descritos en las secciones II y III respectivamente).

Para desarrollar una planificación de escenario, es necesario el cálculo del número de luminarias, para lo cual lo desarrollaremos en base a la siguiente fórmula. [16]

$$N_L = \frac{\Phi_T}{n * \Phi_L} \quad (6)$$

Donde:

$N_L$  = Número de luminarias

$\Phi_T$  = Flujo luminoso total necesario en la zona o local

$\Phi_L$  = Flujo luminoso de una lámpara (dada por el catálogo)

$n$  = Número de lámparas que tiene la luminaria

Para hallar el flujo luminoso total necesario en la zona o local, es necesario calcularlo en base a toda la capacidad física del escenario "Fig.21". Para lo cual necesitaremos el valor de toda la superficie.

$$S_{TOTAL} = largo * ancho$$

$$S_{TOTAL} = 5 m * 3 m = 15 m^2$$

Ahora procedemos a calcular con los valores de la bombilla LED seleccionada la capacidad máxima que tiene de iluminación.

$$\Phi_T = \frac{E_m * S}{C_u * C_m} = \frac{400 * 15}{0,94 * 0,8} = 7\,978,72 \text{ lm}$$

Este es el valor requerido para cumplir con la iluminación 7 978,72 lm.

$$N_L = \frac{\Phi_T}{n * \Phi_L} = \frac{7978,72}{2 * 1000} = 3,98$$

Aproximo ese valor  $3,98 \approx 4$  luminarias LED necesito, para cubrir toda la superficie de iluminación. Ahora promedio las 4 luminarias con respecto al ancho y al largo de mi escenario, como se muestra en la "Fig.28".

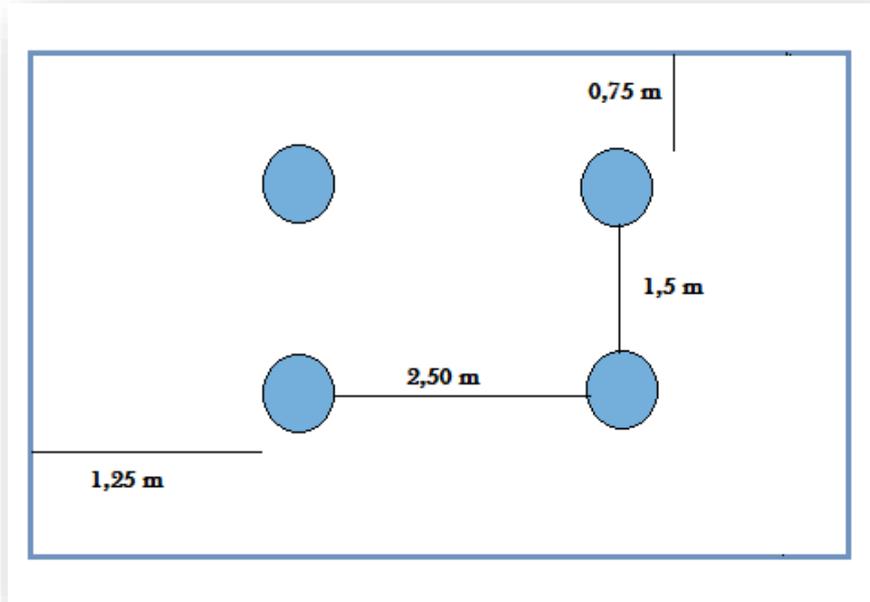


Fig.28. Esquema de la distribución de las luminarias de planificación

PLANIFICACIÓN		
FABRICANTES	TX - RX	PRESUPUESTO EN EUROS
  	Tabla 4 + Tabla 7	19,95*(4) + 45,00*(4) = 259,80

Tabla 24: Descripción de la Planificación

Basta con realizar un solo cálculo de la iluminación, pues el escenario de planificación planteado “Fig.28” es equidistante y se plantea la misma mesa “Fig.26”.

$$E_m = \frac{\Phi_T * C_u * C_m}{S} \geq \frac{E_{\text{tabla sitio}} + E_{\text{tabla actividad}}}{2}$$

$$E_m = \frac{1000 * 0,94 * 0,8}{0,84} \geq \frac{300 + 500}{2}$$

$$E_m = 895,24 \text{ lux} \geq 400 \text{ lux}$$

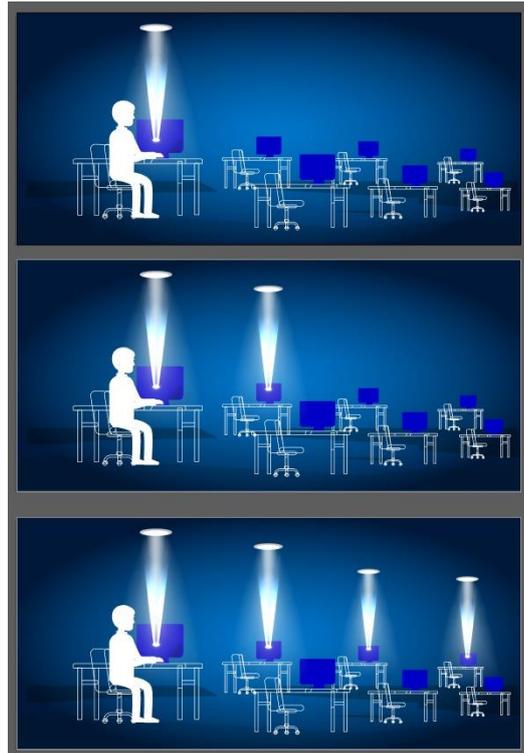


Fig.29. Visualización de la evolución del escenario de Planificación.

## VI. CONCLUSIONES

Sin duda una de las conclusiones más destacadas que permite obtener este trabajo es la progresión exponencial de los dispositivos encontrados en el mercado a lo largo del mismo, que evolucionan proporcionalmente a las necesidades del mercado y a la evolución de las tecnologías de comunicaciones e iluminación. Todos los esfuerzos que se están desarrollando en la actualidad por estudiar tanto técnicas de modulación como tecnologías que nos permitan aprovechar los sistemas VLC permiten afirmar que esta alternativa de comunicación e iluminación pronto tendrá el impacto comercial y será el hito que marque las comunicaciones inalámbricas indoor.

Al ser este una parte del espectro poco saturada, libre, fiable y generar velocidades altas de transmisión, debido a que su información se puede transmitir empleando multiplexación espacial, llama altamente la atención de gigantes tecnológicos, que apuestan por esta tecnología que permite la convergencia de servicios de comunicación e iluminación para ofertarlas en un solo producto que les permita seguir posicionados en el mercado.

Empleando la recomendación de iluminación estándar de 400 lux, según las normas de iluminación europeas para interiores estandarizadas y la media de acuerdo al trabajo que se pueda desempeñar dentro del espacio físico, se realiza una propuesta basada en componentes comerciales que permite garantizar la iluminación y la transmisión de datos en el interior.

Las empresas que más destacan por la aportación tecnológica e impacto comercial son: Philips, Oledcomm, Pure LiFi, VLNCComm, destacando Philips y Pure LiFi; Philips en la actualidad a diferencia de las otras posee bombillas LED que transmiten a velocidades más altas y tiene un rango mayor de iluminación, pero aun no lanza un Dongle USB receptor y es en este panorama que sucede la aparición de Pure LiFi, generando un Dongle USB con capacidad de generar una transmisión bidireccional, permitiendo un enlace con velocidades altas.

Entre los componentes estudiados, destaca el DONGLE USB, que se muestra en los mercados actuales como el dispositivo de recepción que permite realizable la comunicación bidireccional por el VLC.

Las demostraciones experimentales previas que se estudiaron fueron de vital importancia, potenciando el estudio, asimilación y conocimiento de principios básicos para generar una transmisión por el VLC, los  $\mu$ LED, son tendencia en enlaces híbridos de fibra óptica de plástico, permitiendo mitigar la interferencia entre símbolos, así como la tecnología MIMO es la más utilizada para aprovechar el espectro en el rango del visible, además si se trata de velocidades, OFDM esta entre las favoritas en transmisiones IM/DD de VLC.

En el mundo de las comunicaciones inalámbricas Li-Fi se convertirá en algo asequible para todas las personas, aunque ahora no tenga precios muy bajos en un futuro con la masificación del mismo sin duda abaratará costos y tendrán una demanda elevada.

## VII. REFERENCIAS

[1] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, "LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 17, No. 3, Third Quarter 2015.

[2] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 17, No. 4, Fourth Quarter 2015.

[3] [http://www.homepages.ed.ac.uk/hxh/Li-Fi\\_PAPERS/13\\_fath\\_1.pdf](http://www.homepages.ed.ac.uk/hxh/Li-Fi_PAPERS/13_fath_1.pdf)

[4] <http://laplace.us.es/campos/optica/general/opt-guia2.pdf>

[5] N. Chi, M Zhang, J Shi, and Y. Zhao "Spectrally efficient multi-band visible light communication system based on Nyquist PAM-8 modulation", *PHOTONICS Research*, Vol. 5, No. 6, pp 5591-595, Dec. 2017.

[6] ] F. M. Wu, C. T. Lin, C. C Wei, C. W. Chen, H. T. Huang, S. Chi, "Performance Comparison of OFDM Signal and CAP Signal Over High Capacity RGB-LED-Based WDM Visible Light Communication", *IEEE Photonics Journal*, Vol. 5, No. 4, Aug. 2013.

- [7] Ch. Xi, A. Mirvakili, V. Koomson, "A Visible Light Communication System Demonstration Based on 16-level Pulse Amplitude Modulation of an LED Array", *IEEE*, 2012.
- [8] I. N. Osahon, E. Pikasis, S. Rajbhandari, W. O. Popoola, "Hybrid POF/VLC link with M-PAM and MLP Equaliser ", *IEEE ICC SAC Symposium Access System and Networks Track*, 2017
- D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A. E. Kelly, G. Faulkner, M. D. Dawson, H. Haas, D. O'Brien, "A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride  $\mu$ LED", *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, Vol. 26, No. 7, Apr. 1, 2014.
- [9] G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella "3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED", *OSA Publishing*, Vol.20, No. 26, December 2012.
- [10] X. Li, N. Bamiedakis, X Guo, J.J.D. McKendry, E. Xie, R. Ferreira, E. Gu, M. D. Dawson, R. V. Penty, and I. H. White, "Wireless Visible Light Communications Employing Feed-Forward Pre-Equalization and PAM-4 Modulation", *IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, Vol. 34, No. 8, Apr. 15, 2016.
- [11] T. Koonen, "Indoor Optical Wireless System: Technology, Trends and Applications", *IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, Vol. 36, No. 8, Apr 15, 2018.
- [12] X. Li, N. Bamiedakis, J. Wei, J. McKendry, E. Xie, R. Ferreira, E. Gu, M. Dawson, R. V. Penty, I. White, " $\mu$ LED-Based-Single-Wavelength Bi-directional POF Link With 10Gb/s Aggregate Data Rate", *IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, Vol. 33, No. 17, Sep. 1, 2015.
- [13] [https://www.noao.edu/education/QLTkit/es/Safety\\_Activity\\_Poster/LightLevels\\_outdoor+indoor\\_es.pdf](https://www.noao.edu/education/QLTkit/es/Safety_Activity_Poster/LightLevels_outdoor+indoor_es.pdf)
- [14] <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12833>.
- [15] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90486/fichero/AnalisisPrestacionesLIFI.pdf>
- [16] <https://www.saltoki.com/iluminacion/docs/03-UNE-12464.1.pdf>
- [17] L. Albraheem, L. Alhudaithy, A. Afnan, A. Aljaser, M. R. Aldhafian, and G. M. Bahliwah, "Toward Designing a LiFi-Based Hierarchical IoT Architecture", *IEEE Access*, Vol. 6, Ago. 15 2018
- [18] L. Albraheem, L. Alhudaithy, A. Afnan, A. Aljaser, M. R. Aldhafian, and G. M. Bahliwah, "Toward Designing a LiFi-Based Hierarchical IoT Architecture", *IEEE Access*, Vol. 6, Ago. 15 2018
- [19] <https://purelifi.com/case-study/a-partnership-creating-lifi-history/>
- [20] <https://www.oledcomm.com/out-iot-platform/chipset-modules>
- [21] <https://www.lifi.eng.ed.ac.uk/li-fi-research-publications>
- [22] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A. E. Kelly, G. Faulkner, M. D. Dawson, H. Haas, D. O'Brien, "A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride  $\mu$ LED", *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, Vol. 26, No. 7, Apr. 1, 2014.

[23] J. Gancarz, H. Elgala, and T. Little, "Impact of Lighting Requirements on VLC Systems", *IEEE Communications Magazine*, December 2013.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1 COMPONENTES DEL QUE SE ENCUENTRAN EN EL MERCADO ACTUAL

#### GEOLiFi® Street Lighting with TECHNILUM

Referencia: Tx-GL-15300-SL-TN1

Fabrica: OLEDCOMM

Este alumbrado público está equipado con la tecnología OLEDCOMM GEOLiFi®, convirtiendo su iluminación en una infraestructura inteligente para servicios geo localizados.

Cumple con la comunicación internacional de luz visible LiFi.

Principales características técnicas

- 3000K o 4000K
- 24W o 72W
- 100lm/W aprox.



#### LUDICLiFi Floor Lamp for Offices

Referencia: TxRx-LN-1M-IP-OF

La lámpara LED de pie LUDICLiFi le permite obtener una conexión a Internet de alta seguridad en su oficina. Nuestro kit LiFiNET® (ref. TxRx-LN-1M-IP-3B) integrado en el panel garantiza la comunicación bidireccional punto a punto entre la lámpara y una llave USB LiFiNET® conectada al portátil.

Fabrica: Oledcomm

En colaboración con RADIAN

Principales características técnicas

- 50W
- Compatible con Linux, Windows, MacBook con puerto USB tipo A



- 3000°K

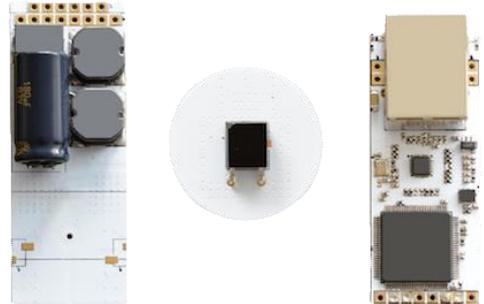
### LiFiNET® Kit

Referencia: TxRx-LN-1M-IP-3B

El LiFiNET® Kit pertenece a la gama de productos LiFiNET® de OLEDCOMM.

Este kit fue diseñado específicamente para fabricantes de iluminación que deseen integrar LiFi bidireccional a sus propios productos.

Una vez integrada, la luminaria tiene una doble función: iluminación + conexión a Internet mediante luz.



- Se mantiene la calidad de la iluminación
- Integración fácil y discreta
- Acceso seguro y fiable a Internet
- Sin ondas de radio

El LiFiNET® Kit es compatible con la comunicación internacional con luz visible.

Principales características técnicas

- Fuente de luz compatible: LED
- Voltaje de entrada: de 12 a 55VDC
- Corriente de entrada: 750mA máximo
- Potencia de la luz: de 15 a 40W

### MyLiFi®

**Precio:** £ 699

#### Características de la iluminación

Fuente de luz: LED

Potencia nominal: 13W

Lumen: 800lm para 4000K



Temperatura de color: 2200K (blanco cálido) a 6500K (blanco frío)

Vida útil del LED: 50.000h

Iluminación programable para despertar y dormir

Ambiente personalizable (temperatura de color y atenuación)

### **Características Mecánicas**

Uso en interiores

Protección contra la entrada: IP20

Cabezal giratorio y brazo de equilibrio

Material principal: aluminio pintado de blanco

Colores del alambre: rojo (estándar); amarillo y azul (a petición)

Dimensiones: cabeza y base 200mm / 355 a 700mm de alto / 600mm de ancho / base 200mm.

Peso neto: 4,4 kg (sin embalaje)

### **Características de la comunicación**

Conexión LiFi entre MyLiFi y su ordenador

Enlace descendente de velocidad de datos LiFi (IEEE 802.15.7r1): 13Mbps

Enlace ascendente de velocidad de datos LiFi (IEEE 802.15.7r1): 10Mbps

Modo luz apagada (conexión sin luz visible)

Alimentación a través de Ethernet (IEEE 802.3af) y (IEEE 802.3at)

Control remoto de la luz a través de una web o aplicación móvil

### **Características eléctricas**

Alimentación a través de Ethernet (IEEE 802.3af)

Longitud del cable Ethernet: 2m - con conector RJ45 macho

Compatible con módulos PLC e inyectores PoE

Producto	Empresa	Velocidad de transferencia de datos	Técnica de modulación	Espectro receptor	Rango de cobertura	Espectro de enlaces de comunicación	Otras notas
LiFi- XC	Pure LiFi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 43 downlink</li> <li>• 43 uplink</li> </ul>	OFDM	Li-Fi dongle como receptor downlink con conector USB dotado de infrarrojos para comunicación	2.8 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dúplex completo</li> <li>• Bidireccional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inter-AP handover</li> <li>• Múltiples usuarios soportan hasta 8 estaciones</li> </ul>
LiFi- X	Pure LiFi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Downlink 42 Mbps</li> <li>• Uplink 42 Mbps</li> </ul>	OFDM	uplink	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dúplex completo</li> <li>• Bidireccional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inter-AP handover</li> <li>• Múltiples usuarios</li> </ul>
My LiFi	Oledcomm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 13 Mbps downlink</li> <li>• 10 Mbps uplink</li> </ul>	-	USB Li-Fi dongle	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dúplex completo</li> <li>• Bidireccional</li> </ul>	-
LUDICLiFi Lamp [26]	Oledcomm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Mbps downlink</li> <li>• 1 Mbps uplink</li> </ul>	-	USB Li- Fi dongle	1.8 m en line of sight	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bidireccional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un usuario conectado a la vez</li> </ul>
GEOLiFi Street Lighting [	Oledcomm y Technilum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Mbps downlink</li> <li>• 1 Mbps uplink</li> </ul>	-	Entrada para auriculares Li-Fi dongle o modulación de cámara. Depende del chip transceptor equipado	Detección li-fi de hasta 4 m de altura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidireccional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un usuario conectado a la vez</li> </ul>
LumiNet Pad	VLNCComm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Downlink 108 Mbps</li> <li>• Uplink 53 Mbps</li> </ul>	HCM	USB Li-Fi dongle dotado de infrarrojos para comunicación uplink. Banda de longitud de onda:	48 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dúplex completo</li> <li>• Bidireccional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Múltiples usuarios soportan hasta 15 estaciones</li> </ul>
LumiNet Desktop	VLNCComm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Downlink 23 Mbps</li> <li>• Uplink 23 Mbps</li> </ul>	HCM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Downlink 420-680 nm</li> <li>• Uplink 800-875 nm</li> </ul>	1 m <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dúplex completo</li> <li>• Bidireccional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Múltiples usuarios soportan hasta 7 estaciones</li> </ul>

## ANEXO 2 DISEÑO DE ESCENARIO

