

Unión Internacional de Telecomunicaciones

**UIT-R**

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Informe UIT-R SM.2422-1**  
(06/2019)

**Luz visible para las comunicaciones  
de banda ancha**

**Serie SM**  
**Gestión del espectro**



Unión  
Internacional de  
Telecomunicaciones

## Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

## Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

### Series de los Informes UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REP/es>)

Series	Título
<b>BO</b>	Distribución por satélite
<b>BR</b>	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
<b>BS</b>	Servicio de radiodifusión sonora
<b>BT</b>	Servicio de radiodifusión (televisión)
<b>F</b>	Servicio fijo
<b>M</b>	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
<b>P</b>	Propagación de las ondas radioeléctricas
<b>RA</b>	Radio astronomía
<b>RS</b>	Sistemas de detección a distancia
<b>S</b>	Servicio fijo por satélite
<b>SA</b>	Aplicaciones espaciales y meteorología
<b>SF</b>	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
<b>SM</b>	<b>Gestión del espectro</b>

*Nota: Este Informe UIT-R fue aprobado en inglés por la Comisión de Estudio conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.*

Publicación electrónica  
Ginebra, 2022

© UIT 2022

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

## INFORME UIT-R SM.2422-1

**Luz visible para las comunicaciones de banda ancha**

(2018-2019)

**1 Introducción**

El Grupo de Trabajo del UIT-R sobre gestión del espectro puso en marcha la Cuestión UIT-R 238/1, que la Asamblea de Radiocomunicaciones adoptó en 2015. El presente Informe tiene por objeto analizar el modo, la forma y el grado en que la utilización de las comunicaciones con luz visible (cercana), o lo que sería más correcto denominar «comunicaciones inalámbricas ópticas», puede contribuir a la descongestión del espectro radioeléctrico. La combinación del desarrollo de nuevas tecnologías con la utilización de las comunicaciones con luz visible (*visible light communication* o VLC) podría resultar interesante y constituir una opción de cara al uso eficaz del espectro radioeléctrico.

En el presente Informe se abordan las siguientes cuestiones:

- características distintivas (técnicas y operativas) de la utilización de la luz visible (cercana) para las comunicaciones de banda ancha en términos de su utilización del espectro;
- ventajas e inconvenientes de la utilización de las VLC (cercana) (por ejemplo, en materia de eficiencia, interferencia, riesgos sanitarios y ciberseguridad);
- nuevas aplicaciones asociadas a la luz visible utilizada para las comunicaciones de banda ancha;
- obstáculos al desarrollo de las comunicaciones de banda ancha, a fin de proceder a la implantación mundial de las VLC (cercana) (véanse normativos, culturales y/o económicos);
- métodos de conexión de las VLC (cercana) a los actuales sistemas de telecomunicaciones (fijos y móviles).

**2 Historia de las VLC**

Desde la antigüedad hasta el siglo XIX, todos los sistemas de VLC dependían del ojo humano como receptor. La invención del fonógrafo por Alexander Graham Bell y Charles Sumner Tainter transformó la naturaleza de este tipo de comunicaciones. Ambos aprovecharon que la resistencia del selenio varía en función de la intensidad de la luz y aplicaron dicha propiedad en el marco de un receptor al que conectaron un teléfono, con el objetivo de transmitir señales de audio. Estos sistemas fueron objeto de numerosas mejoras hasta la década de 1950, no obstante, la mayor parte de los materiales utilizados para la detección eran más sensibles a las radiaciones infrarrojas, lo que impedía el uso de la luz visible como medio de transmisión.

La introducción de los diodos emisores de luz (LED) renovó el interés por la utilización de las VLC. Más concretamente, la introducción de los LED de arseniuro de galio (GaN) [1] y los fósforos emisores de luz blanca [2] proporcionó fuentes de luz visible, que podían modularse a velocidades superiores sin perjuicio de su función lumínica principal. En 2004, Japón fue el escenario de las primeras pruebas de comunicación de alta velocidad con LED, en cuyo marco se utilizaron fotodiodos. La proliferación de teléfonos celulares con cámara permitió su utilización como receptores de VLC. Los investigadores comenzaron a usar pantallas LCD y otros elementos de visualización como transmisores.

Uno de los primeros organismos de normalización que abordó las VLC fue el Consorcio de Comunicaciones con Luz Visible (VLCC) de Japón, que amplió la norma de la Asociación de Datos de Infrarrojos (IrDA) en materia de comunicación por infrarrojos con espectro de luz visible en 2008.

### 3 Luz visible y banda ancha

#### 3.1 Posibilidades de utilización de la banda ancha a través de la luz visible

Con niveles de iluminación de interiores normales, es posible alcanzar velocidades binarias de acceso inalámbrico óptico con luz visible que oscilan entre unos pocos b/s hasta más de 10 Gbit/s. Las VLC pueden contribuir a la descongestión de las bandas inferiores del espectro de radiofrecuencias, ya que el espectro de luz puede utilizarse como recurso espectral adicional para las comunicaciones de banda ancha.

#### 3.2 Ganancias en eficiencia derivadas de la utilización de la luz visible para las comunicaciones de banda ancha

Las VLC establecen un enlace inalámbrico óptico direccional. Por ejemplo, una lámpara de techo orientada hacia el suelo puede originar un enlace óptico, que más de un usuario puede compartir. En ese sentido, cabe la posibilidad de integrar diversos dispositivos VLC, sin causar interferencia, mediante un proceso de reutilización espacial.

#### 3.3 Utilización del espectro

Las VLC utilizan el espectro visible (con longitudes de onda de entre 390 y 750 nm) y pueden proporcionar comunicaciones inalámbricas utilizando elementos de iluminación y visualización.

Las comunicaciones inalámbricas ópticas (OWC) pueden contribuir a la descongestión de las bandas inferiores del espectro de radiofrecuencias, ya que la luz puede utilizarse como recurso espectral adicional para las comunicaciones de banda ancha.

#### 3.4 Aplicaciones y/o servicios que podrían beneficiarse de las VLC

Las comunicaciones con luz visible pueden clasificarse en tres grupos:

- comunicaciones por sensor de imagen (ISC);
- comunicaciones por receptor de fotodiodos de baja velocidad (LR-PC); y
- comunicaciones por receptor de fotodiodos de alta velocidad (HR-PC).

Con respecto a la definición de «baja velocidad» y «alta velocidad», la velocidad binaria del umbral de caudal, medida en la salida de la capa física del receptor, se sitúa en 1 Mbit/s. Los caudales cuya velocidad sea inferior a 1 Mbit/s se consideran de baja velocidad y aquellos cuya velocidad supera 1 Mbit/s se consideran de alta velocidad.

#### Comunicaciones por sensor de imagen

En el marco de las ISC, las OWC pueden utilizar fuentes de luz como transmisores y sensores de imágenes como receptores. Entre sus posibles aplicaciones figuran:

- servicios basados en la ubicación o navegación y posicionamiento en interiores;
- aplicaciones para entornos interiores de oficina u hogar (salas de conferencias, centros comerciales, museos, salas de exposiciones, etc.);
- comunicaciones a bordo de vehículos;
- aplicaciones basadas en etiquetas LED;
- comunicaciones punto a (multi)punto o de retransmisión;
- asistencia sanitaria;
- señalización digital y distribución de contenidos con arreglo a la ubicación;
- servicios de datos en vehículos (aviones, trenes, buques, autobuses, etc.);

- automóviles conectados y vehículos autónomos;
- comunicaciones subacuáticas o costeras; e
- Internet de las cosas (IoT).

Las ISC deben observar una serie de requisitos en materia de control de la atenuación, control del consumo energético, coexistencia con la luz ambiental, coexistencia con otros sistemas de iluminación, comunicación simultánea con múltiples transmisores y receptores (MIMO), fuentes de datos de imágenes casi puntuales, identificación de fuentes de luz modulada, transmisión repetitiva con baja tara, compatibilidad con sensores de imagen y localización.

Para las comunicaciones MIMO, cabe la posibilidad de incorporar un protocolo MIMO MAC, de tal manera que los dispositivos receptores dotados de una cámara puedan procesar los datos recibidos. Las ISC deben soportar la comunicación cuando la fuente de luz aparece como una fuente casi puntual, es decir, cuando solo ilumina un número reducido de píxeles de imagen.

Las ISC pueden soportar varios canales de comunicación entre múltiples transmisores coordinados o descoordinados y múltiples receptores coordinados o descoordinados.

Las ISC deben soportar comunicaciones compatibles con una amplia variedad de cámaras con velocidades de muestreo de detección de imágenes (tiempo de lectura), resoluciones y velocidades de trama distintas. Concretamente, se admitirán velocidades de trama constantes o variables, así como resoluciones constantes o variables.

### **Comunicaciones por fotodiodos de baja velocidad**

Las comunicaciones por fotodiodos de baja velocidad requieren fuentes de luz como transmisores y fotodiodos de baja velocidad como receptores. En este caso, las aplicaciones principales son similares a las de las comunicaciones por sensor de imagen.

Las LR-PC utilizan principalmente fuentes de etiquetas de luz (véanse etiquetas LED y luces de flash de teléfonos inteligentes, entre otros) como transmisores y pueden comprender mecanismos para soportar el traspaso entre fuentes de luz, lo que permite a los usuarios mantener una conexión de red continua.

Las LR-PC pueden comprender mecanismos útiles con miras al desarrollo y la provisión de técnicas de coordinación de interferencias en capas superiores y pueden soportar mecanismos de recuperación de enlaces, a fin de mantener la conexión en canales no fiables y reducir los retardos en términos de conectividad.

### **Comunicaciones por fotodiodos de alta velocidad**

El uso de receptores de fotodiodos de alta velocidad permitirá establecer comunicaciones inalámbricas de alta velocidad, bidireccionales, interconectadas y móviles. Entre sus aplicaciones principales figuran:

- aplicaciones para entornos interiores de oficina u hogar (salas de conferencias, centros comerciales, museos, salas de exposiciones, etc.);
- centros de datos o establecimientos industriales inalámbricos seguros (células de producción, fábricas, etc.);
- comunicaciones a bordo de vehículos;
- redes de retroceso por enlace inalámbrico (redes de retroceso de células pequeñas, redes de retroceso de vigilancia, conexión en puente LAN);
- asistencia sanitaria;
- servicios de datos en vehículos (aviones, trenes, buques, autobuses, etc.);
- automóviles conectados y vehículos autónomos;

- comunicaciones subacuáticas o costeras; e
- Internet de las cosas (IoT).

En el marco de las HR-PC, la transmisión continua de datos para todas las aplicaciones debería apoyarse en una funcionalidad bidireccional, así como en una serie de transmisiones de paquetes cortos, en cuyo marco se requiere una latencia baja. En este caso, cabe incluir mecanismos para dar soporte a la transmisión adaptativa y a múltiples usuarios que se comunican con distintos flujos de datos desde la misma fuente de luz (acceso múltiple).

#### 4 Aspectos de gestión del espectro relativos a la luz visible

Las VLC están sujetas a una serie de características de propagación sustancialmente distintas a las que revisten las frecuencias del espectro de radiofrecuencias. En consecuencia, la probabilidad de interferencia es reducida y los reguladores del espectro no necesitan reglamentarlas.

El IEEE 802 considera que las operaciones de comunicación con luz deberían catalogarse como exentas de licencia y abstenerse de todo régimen de licencia exclusiva. Un estudio encargado por el Organismo de Radiocomunicaciones de los Países Bajos [18] refrenda este punto de vista. En dicho estudio se concluye, entre otras cosas, que aún es preciso superar varios desafíos antes de proceder a la implantación comercial. En ese sentido, se recomienda priorizar las iniciativas de normalización de la UIT o el IEEE, en lugar de las normas gubernamentales, y restringir la reglamentación gubernamental especialmente a los límites relacionados con los riesgos para la salud, la huella de carbono y la competencia comercial. A través de la normalización, se incrementará la compatibilidad entre los productos industriales y las tecnologías existentes. Resulta esencial observar las normativas locales en materia de seguridad y salud relacionadas con la seguridad y la sensibilidad del ojo humano. Los dispositivos que utilizan VLC u OWC deben observar la normativa local en materia de radiación de radiofrecuencias no esenciales y evitar causar interferencia en las bandas del espectro de radiofrecuencias.

Las frecuencias para las comunicaciones ópticas suelen expresarse en términos de longitud de onda. Si bien la longitud de onda más utilizada para las comunicaciones de fibra óptica se sitúa en 1 550 nm, debido a las características de absorción y dispersión del vidrio, este límite no se aplica a las VLC en condiciones aéreas normales. Por tanto, puede utilizarse la gama de frecuencias 1,4-2,5 THz o 400-700 nm.

##### 4.1 Tema 1: Oportunidades de aprovechamiento y atribución del espectro

A fin de aumentar las oportunidades de aprovechamiento del espectro combinando las radiocomunicaciones, por ejemplo 2,4/5/60 GHz, con la fibra óptica en entornos tanto interiores como exteriores, cabría aprovechar las posibles sinergias entre las tecnologías Wi-Fi y Li-Fi y atender a la mitigación debida a la niebla y a la luz solar en entornos exteriores (véanse las referencias [9] y [10]). En el documento de referencia [18] se afirma que la implantación de las comunicaciones inalámbricas ópticas puede resultar particularmente interesante en entornos en los que numerosos usuarios que requieren un amplio ancho de banda acceden a la red dentro de un espacio confinado, o en los que las tecnologías de radiocomunicaciones convencionales no pueden utilizarse o no son capaces de proporcionar el nivel de servicio necesario. Las reuniones de representantes de grupos de usuarios potenciales, empresas de los sectores de la construcción y la comunicación, fabricantes de dispositivos y proveedores de soluciones facilitarán la consecución de avances en cuanto a los casos de uso y los requisitos atinentes a normas y desarrollos ulteriores, así como la identificación de nichos de mercado donde la introducción de las OWC será sumamente beneficiosa.

## 4.2 Tema 2: Principios relativos a la planificación del espectro

La implantación de sistemas VLC suele llevarse a cabo utilizando el sistema de iluminación LED (existente), en cuyo marco la intensidad de la luz visible de los LED se modula con miras a la transmisión inalámbrica de información de datos a dispositivos. Dichos sistemas de iluminación suelen estar diseñados para abarcar zonas extensas y, de esta forma, proporcionar conexiones de datos a múltiples dispositivos en esa zona concreta. Así pues, los dispositivos en cuestión requieren un protocolo que les permita compartir la capacidad del sistema LED, es decir, un protocolo de control de acceso al medio (MAC). Normalmente, el protocolo MAC divide la capacidad de comunicación total del sistema LED en partes más pequeñas, por las que cada dispositivo activo compite, lo que implica que cuando un dispositivo desea más capacidad, otro obtiene menos. Al trabajar con un protocolo MAC y, por tanto, compartir recursos, es difícil garantizar un nivel de capacidad a los dispositivos. A fin de crear un enlace a un dispositivo a través de un protocolo MAC, es preciso establecer una conexión a través de un proceso de negociación con otros dispositivos. Este proceso requiere tiempo y el resultado no está garantizado. A su vez, el tiempo de negociación reduce el tiempo neto disponible para la transmisión de datos y, por tanto, el caudal de datos de la red. Además, para soportar la transferencia de datos, el sistema de iluminación LED debe estar encendido. Existen circunstancias en las que no es deseable tener las luces encendidas, por ejemplo, cuando el sol ya ilumina la habitación o cuando el usuario prefiere atenuar la luz o apagarla. De esta forma, los sistemas VLC pueden dar lugar a un consumo energético adicional no deseado en los casos en que no se requiere iluminación, sino simplemente comunicación.

Como alternativa, cabe la posibilidad de utilizar múltiples haces de luz confinados con objeto de transmitir información de datos (véase la referencia [4]). Cada haz presta servicio a un único dispositivo y ha de ser orientado con suficiente precisión hacia el mismo. Por consiguiente, toda la capacidad del haz va destinada al mismo dispositivo y no es necesario aplicar un protocolo MAC ni compartir la capacidad disponible con otros dispositivos. De este modo, es posible garantizar un cierto nivel de capacidad a los dispositivos, no se pierde tiempo en la aplicación de un proceso MAC y se mejora el caudal neto de la red. Además, el hecho de que el haz de luz sólo se ofrezca a los dispositivos que lo necesitan y se confine en esos espacios permite optimizar el uso de la energía el haz en cuestión y minimizar el consumo energético necesario para la comunicación de datos. Los haces de luz utilizan preferentemente luz cuya longitud de onda supera 1,4  $\mu\text{m}$ , para poder utilizar potencias de haz de hasta 10 mW sin riesgos para la seguridad ocular. A fin de orientar el haz de infrarrojos, se requieren procesos de control que registren si el dispositivo precisa algún servicio, localicen el correspondiente dispositivo y, con esa información de localización, orienten el haz en la dirección adecuada y establezcan el enlace de comunicación. De este modo, el sistema de orientación del haz de infrarrojos proporciona capacidad de comunicación en los lugares y en el momento en que se necesita y, por consiguiente, optimiza el consumo energético.

Los modelos de canal conforman un método común para la gestión «interna» del espectro de luz disponible, que puede regirse por las normas técnicas aplicables a las aplicaciones particulares. La referencia [17] contiene más información al respecto.

## 4.3 Tema 3: Armonización internacional y regional

El espectro de luz visible observa o cumple preferiblemente normas internacionales (por ejemplo, del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones o ETSI) y, como todo dispositivo o sistema, está sujeto a las leyes y los reglamentos nacionales. Sin embargo, es importante que los dispositivos de comunicación con luz visible no supongan riesgo alguno para la salud. Conviene asimismo instalarlos de forma correcta y segura, para no causar interferencias electromagnéticas (EMI) perjudiciales.

## 5 Características técnicas y operativas de las comunicaciones con luz visible a corta distancia en banda ancha

La presente sección comprende fragmentos de textos relativos a productos y prototipos extraídos de la referencia [16]. Si bien no todos guardan relación con aplicaciones de banda ancha, se incluyen a fin de ilustrar la tecnología disponible.

### 5.1 Transmisores de comunicación con luz visible

**Frecuencia de la portadora:** La frecuencia de la portadora se verá limitada en las bandas de frecuencias de luz visible.

**Modo de transferencia:** El UIT-R puede elaborar diversos métodos de funcionamiento relacionados con los dispositivos de luz visible física para comunicaciones de alta y baja velocidad binaria, que permitan una utilización óptima del ancho de banda óptico disponible en una luminaria determinada, a fin de soportar comunicaciones por sensor de imagen, fotodiodo de baja velocidad y fotodiodo de alta velocidad.

**Seguridad ocular y parpadeo:** La frecuencia y la intensidad de la luz modulada será segura para el ojo humano. Además, la luz modulada no desencadenará enfermedades de la índole de la epilepsia fotosensible.

**Control de la atenuación:** La tecnología normalizada soportará el control de la atenuación para todas las aplicaciones.

**Gama de comunicación:** La gama de comunicación depende de múltiples factores externos (ampliación de la señal, colimación de la señal, potencia de la fuente, etc.). En este caso, se trata de aspectos relacionados con la aplicación, que se evocan únicamente a título orientativo. El comité acordará utilizar el mismo modelo de canal para evaluar las capacidades de funcionamiento de los sistemas propuestos.

**Coexistencia con la luz ambiental:** La tecnología normalizada coexistirá con luz ambiental que puede reflejarse en la superficie de un transmisor y con tres grupos de servicios de comunicaciones con luz visible clasificados.

**Coexistencia con otros sistemas de iluminación:** La tecnología normalizada coexistirá con otros sistemas de iluminación.

**Identificación del transmisor:** La tecnología normalizada soportará un esquema que permita identificar transmisores cuando los receptores o transmisores sean trasladados a otra ubicación. Los receptores podrán rastrear la identificación del transmisor de los dispositivos emisores.

### 5.2 Receptores de comunicación con luz visible

Los receptores de VLC miden la intensidad de la luz visible y decodifican la información transmitida, en función de las necesidades de uso de la aplicación.

Al formar parte de un dispositivo de usuario, los receptores de OWC deben ser compactos y de bajo coste, no requerir una armonización tediosa y capturar suficiente potencia óptica para permitir una elevada capacidad de transmisión de datos en sentido descendente. Por tanto, deben contar con un amplio ángulo de visión y una gran abertura. Sin embargo, la ampliación de la zona de actividad de un fotodetector suele ir acompañada de una reducción de su ancho de banda, y el principio de extensión o «étendue», que caracteriza el modo en que la luz «se dispersa» en términos de ángulo y zona, implica que no es posible reducir el ángulo sólido del periodo de apertura. Los objetivos de ojo de pez pueden utilizarse con objeto de aumentar la apertura del receptor, junto con elementos ópticos anidólicos tales como espejos concentradores parabólicos compuestos, que suelen emplearse con objeto de concentrar energía solar. Un conjunto 2D de fotodetectores rápidos, cointegrados con



preamplificadores eléctricos individuales y una etapa de suma, pueden conservar un amplio ancho de banda [11]. Alternativamente, las funciones de acumulación y detección de luz pueden disgregarse, en aras de su optimización por separado.

Un acoplador enrejado de superficie amplia (SGC), que acumula la luz incidente y dispone de una guía de ondas a un fotodiodo rápido, puede soportar un tipo de recepción con multiplexación cerrado-abierto (OOK) a varios Gbit/s [12]. Con un conjunto de SGC unido a un combinador integrado en la microplaqueta, la apertura puede ampliarse aún más sin comprometer el ancho de banda. La restricción inherente al principio de extensión puede eliminarse, convirtiendo con un valor  $\lambda$  la luz recibida y confinándola en una guía de ondas dopada con luminóforo [13].

En particular, en el caso de las OWC con haz orientable, es preciso localizar los dispositivos de usuario y hacerles un seguimiento. En este caso, pueden utilizarse técnicas relacionadas con la fidelidad inalámbrica (Wi-Fi), la generación de nulos de diagrama de antena a 60 GHz [14] o las etiquetas LED de infrarrojos en el dispositivo de usuario supervisado por una cámara económica [15], entre otros.

Las OWC resultan especialmente adecuadas en entornos en los que las radiocomunicaciones son (o serán) menos factibles debido a una combinación de factores tales como:

- la escasez de espectro;
- la necesidad de un nivel de capacidad sumamente elevado;
- la renuencia a utilizar tecnología de radiocomunicaciones;
- la legislación; o
- la necesidad de contener las transmisiones inalámbricas dentro de un edificio.

Las comunicaciones ópticas pueden integrarse en diversos sistemas. Su metodología de implantación en estos últimos depende de la gama de transmisión requerida. En función de dicha gama, las aplicaciones OWC pueden clasificarse en los cinco grupos que figuran a continuación:

- Las comunicaciones inalámbricas de alcance ultracorto integran una gama que se aplica a las comunicaciones entre microplaquetas, en cuyo marco las OWC pueden efectuarse a través de la denominada interconexión óptica en el espacio libre (FSOI). Este sistema permite la interconexión directa entre microplaquetas por conducto de un haz de luz y podría resolver algunos de los problemas a los que se enfrentan las actuales interconexiones eléctricas con pares de cobre, entre ellos, los relacionados con las velocidades binarias, las interferencias electromagnéticas y el consumo de energía.
- Las comunicaciones inalámbricas de corto alcance suelen utilizarse para aplicaciones de red de área corporal inalámbrica (WBAN) y de red de área inalámbrica (WPAN). Su objetivo consiste en recopilar y transmitir datos en espacios próximos a personas. Actualmente, se están desarrollando nuevos sistemas que aplican las OWC en la esfera de la asistencia sanitaria, conocidos como WBAN ópticas (OWBAN), que pueden proporcionar una alternativa segura y libre de interferencias a las WBAN basadas en las radiofrecuencias.

Las comunicaciones inalámbricas de alcance medio integran una gama aplicada a las redes inalámbricas de área local (WLAN). Actualmente, los sistemas OWC que pertenecen a esta categoría pueden dividirse en sistemas VLC y de comunicación con luz infrarroja y haz orientable. Las VLC suelen basarse en el sistema de iluminación ambiental LED existente y reutilizar los LED con miras a la modulación de datos. De este modo, los sistemas VLC abarcan una amplia zona, en la que múltiples terminales de usuario han de compartir su capacidad valiéndose del protocolo MAC adecuado. Las comunicaciones con luz infrarroja y haz orientable solo proporcionan una conexión directa entre dispositivos. Cabe la posibilidad de que múltiples haces presten servicios de forma independiente a los terminales de usuario ubicados dentro de una sala, de forma que cada terminal obtenga un nivel de capacidad garantizado sin necesidad de competir con los demás. Estos sistemas

pueden sustituir a los actuales (véanse sistemas Wi-Fi) o aliviar su carga, ya que funcionan en una gama de espectro más alta que las WLAN basadas en las radiofrecuencias. Entre las aplicaciones de la comunicación inalámbrica de alcance medio figuran asimismo las comunicaciones entre vehículos y entre vehículos e infraestructuras.

Las comunicaciones inalámbricas de largo alcance pueden abarcar distancias que oscilan entre 300 metros y casi 10 kilómetros. Las empresas y los mercados urbanos las aplican, por ejemplo, a las conexiones de edificio a edificio y a las redes inalámbricas de área metropolitana. Las OWC emplean un sistema denominado «comunicación óptica en el espacio libre» (FSO), en cuyo marco el haz conecta directamente el transmisor y el receptor.

Las comunicaciones inalámbricas de alcance ultralargo pueden abarcar distancias de casi 84 000 kilómetros, lo que las hace idóneas para las comunicaciones aeronáuticas y espaciales. A tal efecto se aplica un sistema, similar al FSO, que utiliza un haz de luz muy estrecho y un canal de vacío para transmitir y recibir la información. Este sistema se denomina FSO por red de satélites inalámbrica óptica (OWSN FSO).

Se ha invertido mucho esfuerzo en la predicción de aplicaciones específicas para las tecnologías de acceso. No obstante, resulta muy difícil predecir qué aplicaciones y dispositivos figurarán entre los más importantes dentro de unos años. Por ejemplo, el éxito de Internet, los teléfonos inteligentes, las tabletas y los sistemas de navegación solo pudo predecirse en el momento en que empezó a cosecharse.

Las aplicaciones han ganado notoriedad gracias al éxito mundial de la combinación de dispositivos, sistemas operativos, infraestructuras fijas y móviles y/o ecosistemas de aplicaciones existentes.

### 5.3 Actividades de normalización en curso

En 2011, el Grupo de Trabajo IEEE 802.15 finalizó la norma IEEE 802.15.7-2011 sobre comunicación óptica inalámbrica de corto alcance con luz visible [3]. En diciembre de 2014, se autorizó la puesta en marcha de un proyecto encaminado a la revisión de dicha norma y denominado comunicaciones inalámbricas ópticas (OWC), que incluye las tecnologías LED-ID, de comunicación con cámara óptica (OCC) y LiFi y que se halla en fase de elaboración [6]. El grupo pretende formular una norma en materia de medios ópticamente transparentes con longitudes de onda de luz de entre 10 000 nm y 190 nm. En marzo de 2017, el grupo se dividió en dos: el 802.15.7m sigue ahondando en la comunicación con cámara óptica y el IEEE 802.15.13 se dedica a un proyecto sobre comunicaciones inalámbricas ópticas a múltiples gigabits por segundo con fotodiodos de alta velocidad [7]. Además, el IEEE 802.15, interesado en la tecnología de asistencia vehicular (VAT), está considerando las VLC entre sus opciones de comunicación.

A finales de 2016, el Grupo de Trabajo IEEE 802.11 puso en marcha un Grupo de Interés Temático (GIT) sobre comunicación con luz [8], con miras a definir las oportunidades técnicas y económicas que brindaba la utilización del medio lumínico para las comunicaciones inalámbricas. En 2018, se aprobó la solicitud de autorización de proyecto del grupo. El Grupo de Tareas 802.11bb se encarga de la elaboración del documento normalizado.

En el UIT-T, la Comisión de Estudio 15 es responsable de la normalización de los sistemas, infraestructuras, equipos, fibras ópticas y cables de las redes ópticas de transporte, de acceso, domésticas y de suministro de energía eléctrica, con las correspondientes técnicas de instalación, mantenimiento, gestión, pruebas, instrumentación y medición, así como de las tecnologías del plano de control que facilitan la evolución hacia redes de transporte inteligentes, incluido el soporte de aplicaciones de redes eléctricas inteligentes. Esta Comisión es asimismo responsables de la norma G.vlc, titulada «Transceptor de comunicación con luz visible de alta velocidad en interiores – Arquitectura de sistema, capa física y capa de enlace de datos».

## **5.4 Compendio de actividades nacionales en materia de VLC**

### **5.4.1 Trabajos de investigación sobre VLC en China**

Huawei, China Telecom, Sanan Optoelectronics, Shenzhen Absen, Unilumin, Cnlight y la Universidad de Tsinghua figuran entre las instituciones/compañías centradas en la investigación y el desarrollo de productos basados en las VLC de China.

### **5.4.2 Trabajos de investigación sobre VLC en Japón**

El Laboratorio Nakagawa de la Universidad de Keio, Panasonic Corporation, CASIO, NEC y FUJI Electric son las instituciones/compañías encargadas de la investigación y la elaboración de productos relacionados con las VLC en Japón.

### **5.4.3 Trabajos de investigación sobre VLC en Corea**

La Universidad Nacional de Ciencia y Tecnología de Seúl, las Universidades de Kookmin, Kongju y Namseoul, Samsung, LG y ETRI son las instituciones/compañías encargadas de la investigación y la elaboración de productos relacionados con las VLC en Corea del Sur.

### **5.4.4 Trabajos de investigación sobre VLC en los Países Bajos**

Grupo de comunicación electroóptica del Departamento de Tecnología de Telecomunicaciones y Electromagnética de la Universidad Tecnológica de Eindhoven. Signify (empresa recientemente conocida como Philips Lighting), KPN y KIEN también participan en proyectos relacionados con las VLC.

### **5.4.5 Trabajos de investigación sobre VLC en Turquía**

Entre los principales centros de investigación interesados en las VLC figuran Tubitak Bilgem, Okatem, la Universidad de Ozyegin y la Universidad Medipol de Estambul. Ford Otosan, Farba, Aselsan y Turk Telekom también participan en proyectos relacionados con las VLC.

### **5.4.6 Colaboración entre la UE y China**

El proyecto de colaboración entre la UE y China «Internet de Radio-Luz» (IoRL, por sus siglas en inglés) está gestionado por Eurescom GmbH y se ejecuta de forma colaborativa por la Universidad Brunel, Viavi Solutions, la Universidad de Leicester, el Instituto Superior de Electrónica de París, Mostlytek, Issy Media, Building Research Establishment, el Instituto Fraunhofer de Circuitos Integrados IIS, el Centro Nacional Demokritos de Investigaciones Científicas, Joda, la Universidad Tecnológica de Varsovia, Arcelik, RunEL, el Instituto Tecnológico de Holon, Ferrovia, Oledcom, la Fundación Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes, la Universidad de Tsinghua, Leadpcom y Shanghai-Feilo/Yaming. Se encarga de desarrollar una virtualización de función de red 5G o una red definida por *software* para edificios cuyas VLC híbridas y puntos de red de acceso radioeléctrico de ondas milimétricas estén integrados en puntos de acceso de sistemas de luz de ubicación generalizada.

## **5.5 Compendio de actividades en materia de VLC de empresas e instituciones académicas y de investigación**

### **5.5.1 Basic6**

Basic6 es una empresa emergente fundada en los Estados Unidos de América y centrada en el desarrollo de un sistema de posicionamiento en interiores, denominado GeoLiFi, que utiliza la infraestructura lumínica de las tiendas para distribuir de forma anónima mensajes de proximidad, información sobre productos, promociones conexas y listas de la compra visuales a clientes y empleados. Al mismo tiempo, la solución proporciona a los minoristas análisis detallados de valores

tales como el índice de participación de clientes y empleados y el tiempo de permanencia en tiendas y departamentos. La empresa trabaja en un soporte lógico y colabora activamente con otras empresas de iluminación que suministran equipos físicos de LiFi (véase OLEDCOMM [28], una empresa emergente francesa de la Universidad de Saint-Quentin-en-Yvelines de Versailles).

### 5.5.2 Punto de acceso LiFi del Instituto Fraunhofer Heinrich Hertz (HHI)

El punto de acceso LiFi desarrollado por el Fraunhofer HHI permite la instalación de una red privada de alta velocidad sin cables. El sistema ofrece velocidades de transmisión de datos elevadas, de hasta 1 Gbit/s, a una distancia de hasta 30 m y sus reducidas dimensiones facilitan su armonización y abaratan los costes de instalación. En una sala de conferencias de la isla de Mainau en Alemania (Lago Constanza) se ha instalado un prototipo de esta tecnología. El HHI también proporciona componentes para la comunicación con luz visible por conducto de LED de luz blanca comerciales, que utilizan tres colores de luz (rojo, verde y azul) y pueden alcanzar velocidades de hasta 3 Gbits/s.

Además de los módulos de radiodifusión LiFi que envían datos en un sentido, la tecnología desarrollada en el Instituto Fraunhofer para microsistemas fotónicos brinda la posibilidad de establecer una comunicación en tiempo real y bidireccional o «dúplex integral»

### 5.5.3 Hyperion technologies

Hyperion technologies, una empresa emergente turca, desarrolla soluciones pioneras basadas en la comunicación inalámbrica óptica, a fin de potenciar las redes inalámbricas de próxima generación a nivel tanto de acceso como de retorno. La empresa contribuyó al proyecto reglamentario 802.15.7r1 y continúa prestando asistencia a los grupos normativos 802.11 sobre comunicación con luz y 802.15.13 sobre comunicación inalámbrica óptica.

### 5.5.4 Lucibel

Lucibel, compañía francesa especializada en el diseño de soluciones lumínicas de nueva generación basadas en la tecnología LED, ha desarrollado y está a punto de comercializar la primera luminaria LiFi plenamente industrializada de Europa: Ores LiFi [5]. La solución LiFi de Lucibel permite implantar una red inalámbrica completa con una velocidad de línea bidireccional de hasta 42 Mbit/s. El sistema LiFi de Lucibel ofrece conectividad móvil de alta velocidad en el marco de una red y, al mismo, soporta el acceso múltiple y la «transferencia». Cada luminaria LiFi puede prestar servicios de forma simultánea a múltiples estaciones LiFi (hasta ocho). La funcionalidad de transferencia implementada permite a los usuarios mantener automáticamente una conexión estable entre una luminaria y otra. Sogeprom, importante promotora filial del Grupo Société Générale, fue la primera en probar el amplio ancho de banda LiFi en sus instalaciones parisinas, mediante la instalación del primer prototipo de Lucibel. Microsoft también está implantando la solución LiFi en su centro de innovación en Issy-les-Moulineaux, con miras a la provisión de conectividad inalámbrica de la próxima generación a sus clientes.

### 5.5.5 Luciom

LUCIOM es una empresa emergente francesa que se fundó en octubre de 2012. Esta empresa tiene en su haber productos tales como:

- Geo VLC: kits de transmisor/receptor de ancho de banda reducido para localización en interiores con distintas funcionalidades.
- Soluciones de alta velocidad binaria con transmisores de Internet LiFi LED y conectores USB LiFi/de infrarrojos que proporcionan velocidades binarias de 20 Mbit/s (enlace descendente) y 5 Mbit/s (enlace ascendente).

### 5.5.6 LVX system

LVX System es una compañía estadounidense con sede en el Centro Espacial Kennedy, la cual ha patentado una tecnología que ofrece sistemas lumínicos LED de alta calidad y es capaz de transmitir datos a alta velocidad de forma segura. Esta compañía ha firmado un acuerdo acorde a la Ley Espacial con la NASA.

### 5.5.7 pureLiFi

En 2012, el Profesor Haas de la Universidad de Edimburgo fundó la empresa emergente pureLiFi, a fin de comercializar tecnologías de comunicación con luz visible tras cuatro años de investigación exhaustiva. Esta compañía fue la primera en desarrollar una unidad de techo denominada «Li-Flame» y dotada de una capacidad de comunicación de enlace descendente de 10 Mbit/s y de enlace ascendente de 10 Mbit/s, así como de un alcance de hasta 3 m, utilizando luminarias LED normalizadas. Actualmente, pureLiFi ha transformado Li-Flame en LiFi-X, una nueva generación de controladores y receptores que se presentaron en el Congreso Móvil Mundial de 2016. LiFi-X proporciona un punto de acceso que se conecta a cualquier luz LED habilitada para LiFi. Además, ofrece un tipo de comunicación dúplex integral con una capacidad de enlace descendente de 40 Mbit/s y de enlace ascendente de 40 Mbit/s, así como características de movilidad integral y conexión de múltiples usuarios en cada punto de acceso LiFi.

### 5.5.8 Velmenni

Velmenni es una empresa emergente estonia, que ha probado con éxito la tecnología LiFi en varias oficinas y entornos industriales de Tallin (Estonia) y que ha emprendido numerosos proyectos piloto encaminados a la introducción de las comunicaciones con luz visible en diversos contextos industriales (por ejemplo, en colaboración con Airbus, a fin de probar esta tecnología en aviones). El prototipo consta de un transceptor LED y un receptor con fotodetector externo, que se conecta a un ordenador portátil a través de un puerto USB. El sistema funciona en régimen bidireccional (enlaces ascendente y descendente) y las velocidades de datos registradas ascienden hasta 1 Gbit/s. En las pruebas, las distancias entre transmisor y receptor fueron de varias decenas de cm. Sin embargo, transcurrirán varios años antes de que el prototipo se convierta en un producto comercial.

### 5.5.9 Sistema avanzado de comunicaciones integradas por líneas eléctricas y luz visible

La Universidad de Tsinghua es una universidad nacional de China. Se centra en las labores técnicas más importantes de I+D y en la industrialización de las comunicaciones por líneas eléctricas (PLC) y las comunicaciones por luz visible (VLC). Tras varios años de I+D, se propuso un sistema avanzado de comunicaciones integradas por líneas eléctricas<sup>1</sup> y luz visible. El sistema ofrece un marco unificado para el procesamiento de señales en los dominios tanto óptico como eléctrico. Es compatible con servicios de información sin señales de RF o en entornos de elevada sensibilidad de RF, como la minería a grandes profundidades y los túneles para energía eléctrica, las estaciones eléctricas, las aeronaves, las fábricas y los hospitales.

El sistema aprovecha las conexiones naturales entre las redes eléctricas y de iluminación; se vale de las comunicaciones por líneas eléctricas (PLC) como red troncal y las comunicaciones por luz visible basada en LED (VLC) como punto de acceso para permitir también la compatibilidad de servicios móviles. Emplea la red de monofrecuencia para aumentar de forma efectiva la cobertura del sistema y para reducir notablemente las interrupciones de comunicación causadas por el movimiento de los usuarios y los bloqueos de los objetos. El sistema adopta un método de transición por amplificación

---

<sup>1</sup> Una terminología alternativa para las comunicaciones por líneas eléctricas es la de telecomunicaciones por líneas eléctricas (PLT).

y propagación para reducir los costes de ejecución, el consumo eléctrico y los requisitos espaciales dentro de la luminaria.

Este sistema ya se utiliza en un túnel subterráneo para cables de suministro eléctrico de la red nacional de China.

#### **5.5.10 Proyecto de investigación de la UE y China: Internet de Radio-Luz**

Internet de Radio-Luz (IoRL, por sus siglas en inglés) es un proyecto conjunto de investigación en 5G del Horizonte 2020 de la UE y China, que desarrolla soluciones de comunicaciones de banda ancha para edificios aprovechando la ubicuidad y la accesibilidad de los puntos de acceso existentes a la luz eléctrica, las capacidades de banda ancha de las tecnologías tanto de ondas milimétricas como de las VLC y la flexibilidad de la SDN/NFV. Este proyecto diseña industrialmente una solución de radio-luz con una huella electrónica lo suficientemente reducida como para poder integrarla en la plétora de factores de forma de los sistemas de luz eléctrica y los productos de consumo existentes.

### **6 Otros aspectos pertinentes (necesidades de los usuarios, factores socioeconómicos) para la toma de decisiones relacionadas con la luz visible**

Con respecto a la seguridad ocular, la luz modulada que puede ver el ojo humano deberá ser segura en términos de frecuencia e intensidad (véase CEI 60825-1:2014) y no desencadenar enfermedades de la índole de la epilepsia fotosensible.

#### **Aspectos relativos a la seguridad ocular y referencias**

La parte más vulnerable del ojo humano es la retina, la cual se ubica en la parte posterior del ojo y ejecuta el proceso de visión. La luz visible alcanza (obviamente) la retina y la exposición a la potencia debe permanecer limitada para no causar ningún daño (permanente) a la retina. En el marco de las VLC, los sistemas LED han sido diseñados con miras a la iluminación de espacios, suelen proyectar conos de luz divergentes y, en circunstancias prácticas, no dañan la retina. En el marco de las comunicaciones ópticas con haz orientable, los haces de luz visible (por ejemplo, los procedentes de punteros láser) pueden ser claramente dañinos; su potencia debe permanecer por debajo de una fracción de mW. Sin embargo, cuando se utilizan haces infrarrojos, la fisiología del ojo humano hace que la intensidad del haz se vea sumamente atenuada (por la córnea, el cristalino, el cuerpo vítreo, etc.) antes de llegar a la retina. Por tanto, es posible utilizar potencias mucho más altas sin exceder el límite de seguridad ocular; por ejemplo, en longitudes de onda superiores a 1 400 nm se aceptan potencias CW de hasta 10 mW.

Las normas en materia de seguridad ocular vienen especificadas en los documentos normativos CEI 60825 y ANSI Z136. En el estudio de referencia [18] se afirma que, para la tecnología inalámbrica óptica, la seguridad ocular y cutánea es la cuestión más decisiva. Aunque el público en general puede utilizar la tecnología inalámbrica óptica de forma segura en casi todos los contextos, se recomienda examinar con más detenimiento las cuestiones relacionadas con la seguridad de las personas que trabajan cerca de fuentes de luz intensas a efectos de instalación y mantenimiento.

#### **Aceptación e implantación**

Al igual que sucede con todos los sistemas de comunicación, tanto la funcionalidad como la protección de los datos de los usuarios son elementos necesarios. En la referencia [18] se indica que la aceptación e implantación de las OWC se verán facilitadas por una visión clara sobre el interfuncionamiento con tecnologías inalámbricas populares normalizadas, existentes o emergentes, como la Wifi, por ejemplo, en los ámbitos de la autenticación, el cifrado y la itinerancia fluida entre puntos de acceso. En ese sentido, se recomienda promover la reutilización de soluciones existentes siempre que sea posible, por ejemplo, respecto de la autenticación y el cifrado de señales. Esta reutilización puede facilitar el desarrollo de mecanismos de interfuncionamiento (véanse

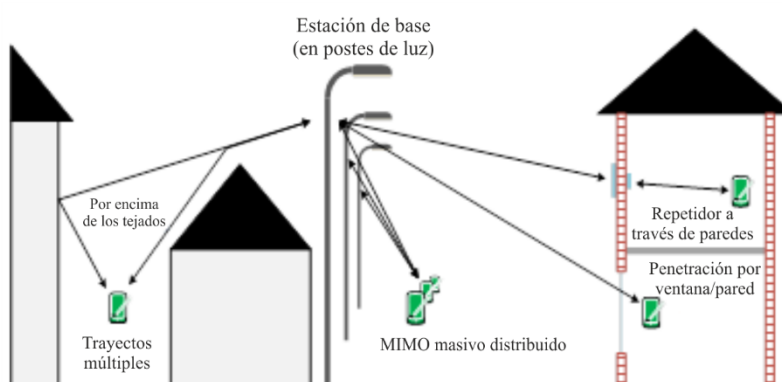
transferencias) entre las OWC y las tecnologías de radiocomunicaciones. Además, esta nueva ola de desarrollos, cuya base de usuarios aún es relativamente pequeña, pueden beneficiarse de la mejora de otras soluciones con una gran base de usuarios.

### Industria y manufactura

Actualmente, en contextos industriales y manufactureros, se utilizan soluciones alámbricas debido, principalmente, a exigentes requisitos de robustez, seguridad y baja latencia. Los protocolos industriales (por ejemplo, ProfiNet) proporcionan acceso regular a la red a los clientes y garantizan la transmisión de datos dentro de un periodo específico y con baja latencia. La tecnología inalámbrica industrial también resulta atractiva por ser flexible y fácil de implantar. Las soluciones basadas en las VLC pueden proporcionar ventajas frente a aquellas basadas en las radiofrecuencias, dada su:

- i) **Idoneidad para despliegues de alta densidad:** El sector de la manufactura forma parte de los denominados contextos inalámbricos de alta densidad con múltiples enlaces mantenidos, los cuales ofrecen de forma simultánea la elevada calidad de servicio antes mencionada. Las VLC pueden proporcionar comunicaciones inalámbricas seguras con baja latencia, puesto que poseen condiciones de propagación bien confinadas en células muy pequeñas. Además, las VLC pueden utilizarse como complemento de los sistemas de radiofrecuencias para la descarga de datos.
- ii) **Capacidad para coexistir con otros servicios de radiofrecuencias:** La coexistencia con otros servicios reviste una importancia particular para las redes inalámbricas industriales. A fin de utilizar otros enlaces de radiofrecuencias en el mismo espectro, se necesitan protocolos tales como «escuchar antes de hablar», lo cual entraña retardos impredecibles y contradice los requisitos de baja latencia. Entre las opciones disponibles para paliar la situación actual figuran la obtención de espectro específico para la tecnología inalámbrica industrial y las VLC. En este caso, sírvase observar que la luz ambiental causa escasa interferencia a las VLC, conforme a lo expuesto en el apartado «viabilidad técnica de las VLC» *infra*.
- iii) **Robustez frente a las interferencias deliberadas:** Los autores de los ataques pueden causar fácilmente interferencias deliberadas al espectro de radiofrecuencias a una distancia considerable de las plantas por medio de simples dispositivos de radiofrecuencias. Evidentemente, la utilización de enlaces inalámbricos basados en radiofrecuencias en lugar de cables puede afectar negativamente a la seguridad operativa de las instalaciones manufactureras conectadas. Además, la presencia de fuertes interferencias electromagnéticas puede resultar inadecuada para la comunicación por radiofrecuencias, por ejemplo, en plantas de laminación de acero, centrales nucleares o centrales eléctricas. Por otro lado, las VLC son inertes frente a las interferencias deliberadas de radiofrecuencias y las EMI y la propagación queda confinada dentro de la planta.

FIGURA 1

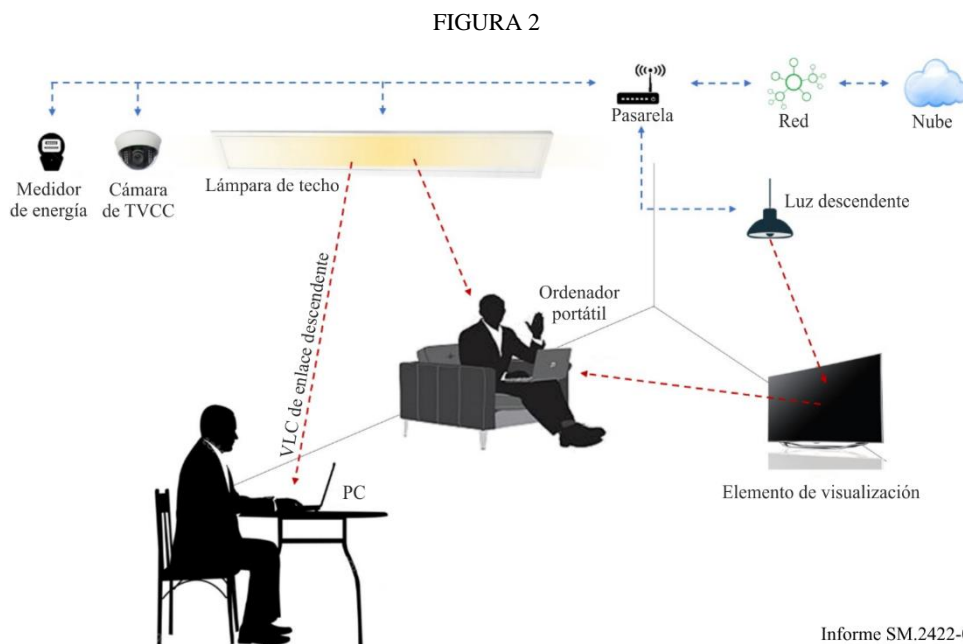


## Hogares inteligentes

A día de hoy, los hogares inteligentes comprenden una amplia gama de electrodomésticos, un sistema de gestión de la energía, un sistema sanitario, servicios multimedia avanzados y un sistema de vigilancia y seguridad, basados en una compleja conectividad alámbrica e inalámbrica. Los dispositivos conectados para hogares inteligentes pueden funcionar de manera interactiva e independiente y sus capacidades mejoran la calidad de vida en el hogar en varios sentidos, por ejemplo, mediante la automatización de las tareas rutinarias, la prestación de servicios sanitarios, la racionalización del consumo energético, el refuerzo de la eficiencia individual y la mejora de la seguridad en el hogar y el entretenimiento.

Los hogares inteligentes aplican un enfoque de conexión en red inalámbrica local y se basan en tecnologías normalizadas como las redes de área local (LAN), las redes de área corporal (BAN) o las redes de área personal (PAN), que se emplean a fin de describir una red de menor escala de entre 12 y 100 metros (por ejemplo, Bluetooth, ZigBee, WiFi, Z-Wave, etc.).

Las VLC pueden utilizarse para conectar dispositivos que transmiten información sensible, véanse cámaras de televisión en circuito cerrado (TVCC) o monitores de bebés, y pueden constituir una red más privada y segura [19].



## Mapeo de ciudades inteligentes (genoma urbano)

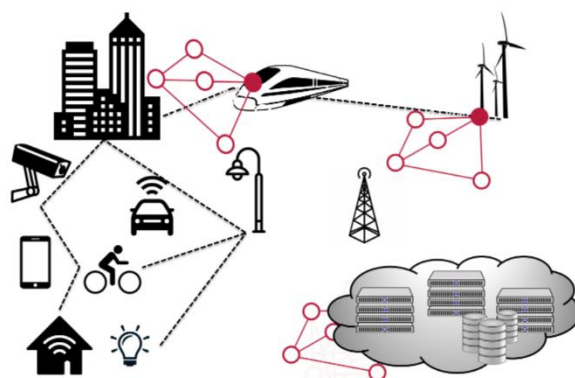
Las ciudades pueden considerarse como complejos organismos vivos en constante evolución. Este hecho no se debe únicamente a sus habitantes, quienes constituyen «sistemas» en sí mismos. La complejidad de la propia vida parece aumentar al ritmo de los avances más disruptivos y exponenciales. La evolución tecnológica, especialmente en el sector de las TIC, desempeña un papel crucial. Sin embargo, estos progresos no conllevan forzosamente un aumento de la calidad de vida, que constituye un objetivo importante. Si bien existen enormes oportunidades, también pueden surgir amenazas igualmente ominosas. A fin de lograr avances realmente cualitativos, se necesita un enfoque sistémico integral. No bastará con una filosofía y un diseño incrementales y lineales. El primer paso consiste en entender la distinción entre el «soporte físico» y el «soporte lógico» de la ciudad, como si fueran, respectivamente, el «cuerpo» y la «mente» de un ser humano o un organismo vivo, o el «genotipo» y el «fenotipo», la «casa» y el «hogar». La primera parte es tangible, la segunda no. En términos generales, la primera se denomina «infraestructura» y la segunda «superestructura».



Evidentemente, la infraestructura y la superestructura son interdependientes y no pueden abordarse por separado. Estas circunstancias entrañan un desafío, puesto que las infraestructuras forman parte del dominio de las ciencias técnicas y el conocimiento técnico relativo a las supraestructuras incumbe predominantemente a las ciencias alfa.

En cuanto a las infraestructuras, las redes TIC son cada vez más importantes. Los centros inalámbricos y fotónicos pueden aportar una contribución propia en esta esfera. Cabe prever que una nueva generación de fibras y circuitos integrados fotónicos (PIC) se convierta en el componente principal de todas las redes ópticas y fotónicas. Este es, sin duda, el caso de las redes centrales y metropolitanas. Las tecnologías inalámbricas hallarán su lugar cerca de los puntos de acceso. De cara al futuro, se plantea la posibilidad de realizar una transición de la tecnología fija a la inalámbrica en los límites de la red. Dicho entorno podría corresponderse perfectamente con un elemento del mobiliario urbano, más concretamente una farola. En ese sentido, sírvase tener en cuenta que, solo en los Países Bajos, existen unos 4 millones de farolas, que pueden configurarse como una red óptica en malla. Desde el alumbrado público, es posible transferir ancho de banda hacia o desde los hogares, utilizando repetidores en las ventanas multifuncionales de nueva generación ubicadas en 7,5 millones de viviendas y 300 000 edificios. Las VLC constituirán la tecnología del futuro en el interior de las casas y edificios.

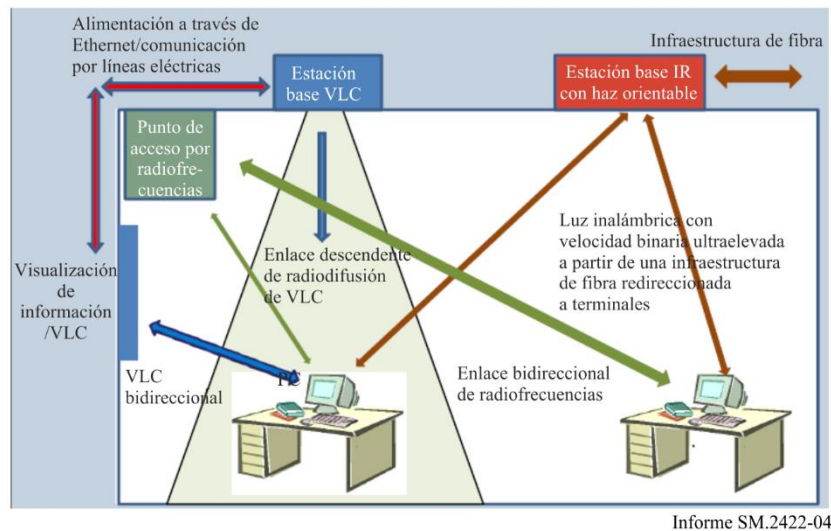
FIGURA 3



Informe SM.2422-03

Al observar los edificios y viviendas en sí mismos y el modo en que están conectados a través de más infraestructuras físicas en el espacio público, resulta obvio que la facultad del entorno construido puede aportar sus propios conocimientos técnicos. Entre las novedades que rozan el inconformismo, figura la posibilidad de observar las viviendas, las infraestructuras públicas y los edificios construidos como seres vivos dotados de cuerpo y mente, cuyos genotipo y fenotipo son objeto de estudio. De hecho, si hoy en día puede determinarse un genoma humano en el plazo de una hora por menos de cien euros, ¿por qué no iba a ser posible aplicar el mismo proceso a construcciones físicas mucho más simples? ¡Y qué beneficios se obtendrían! Los macroparámetros, entre ellos las etiquetas de energía, seguridad y sostenibilidad, pueden calcularse de forma precisa. A ese respecto, cabe la posibilidad de diseñar y valorar opciones de mejora.

FIGURA 4



Al observar los datos que pueden introducirse o integrarse en viviendas, edificios e infraestructuras públicas, es evidente que el centro científico de datos puede desempeñar un papel crucial. La transición de los datos puros a la información, el conocimiento y el nuevo saber dará lugar a innumerables aplicaciones para infraestructuras, supraestructuras, redes, servicios, viviendas y hogares, lo que conllevará la necesidad intrínseca de garantizar la seguridad del diseño. Del mismo modo, pueden efectuarse trabajos de investigación sobre métodos de modelización de los sistemas complejos hallados, utilizando, por ejemplo, teorías de gráficos y matrices de sistemas complejos adaptables.

Las consideraciones que anteceden facilitan en gran medida la modelización de casos realistas globales de ciudades inteligentes aplicando un enfoque sistémico integral.

En cuanto a las necesidades de los usuarios y los aspectos socioeconómicos, se requieren estudios ulteriores ya que los campos de aplicación son muy diversos y no han sido completamente explorados. Según se indica en la referencia [18], también se recomienda propiciar un contacto estrecho entre la I+D industrial (nacional) y la investigación académica, ya que (aún) existe una honda diversidad en cuanto a las tecnologías de OWC objeto de estudio. La identificación temprana de las tecnologías capaces de cosechar un mayor éxito y la facilitación y promoción de la convergencia y el interfuncionamiento respaldarán el desarrollo industrial y acelerarán su introducción comercial.

También es preciso ahondar en términos prácticos y teóricos en la ubicación real de los equipos de VLC en edificios y oficinas. En ese sentido, en la referencia [18] se afirma que las OWC no reemplazan, sino complementan la utilización de otro tipo de transmisiones, como la Wifi para infraestructuras de comunicación dentro de edificios, en cuyo marco las OWC pueden aliviar la carga de aplicaciones que consumen una gran cantidad de ancho de banda desde la Wifi. Debido a su coexistencia con la tecnología WiFi actual, se recomienda diseñar y construir los espacios públicos, oficinas y viviendas teniendo en cuenta el potencial que albergan las OWC, con miras especialmente a la creación de infraestructuras (alámbricas) fijas con suficientes puntos de acceso OWC y capacidad de red de retroceso. La opción de combinar el transporte de datos con la alimentación de puntos de acceso inalámbricos ópticos a través de cables Ethernet (alimentación a través de Ethernet) resulta cada vez más interesante, por lo que se recomienda tenerla en cuenta a efectos de construcción.

### Automóviles conectados y vehículos autónomos

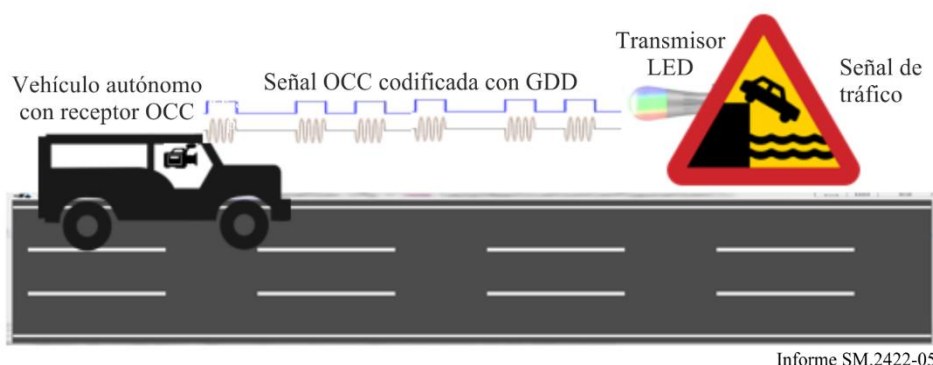
Las VLC pueden aplicarse en automóviles conectados y vehículos autónomos. En términos generales, los conductores deben estar atentos a las señales de tráfico mientras conducen. Los vehículos autónomos deberían reconocer las señales de tráfico mediante tecnología de reconocimiento de imágenes; no obstante, existe margen de error en la interpretación. Un ejemplo de tecnología de automóviles conectados y vehículos autónomos es la de reconocimiento de señales de tráfico utilizando VLC y un diccionario de datos gráficos (GDD). Los GDD han sido elaborados por ISO TC204 con objeto de crear una base común para la transmisión de información codificada sobre señales de tráfico existentes y pictogramas. El sistema de codificación es independiente del idioma, de tal manera que los datos pueden interpretarse con independencia de las diferencias lingüísticas y regionales. El objetivo consiste en dar soporte al intercambio de mensajes de los sistemas de transporte inteligente. En ese sentido, fue preciso definir un enfoque para caracterizar el amplio conjunto de señales de tráfico y pictogramas existentes en grupos funcionales, por medio de elementos de información.

En la parte del transmisor, se ha diseñado un codificador (generador) de datos GDD sugeridos. Existen dos tipos de transmisores para transmitir los datos codificados. Uno de ellos consiste simplemente en instalar un transmisor de señales LED en las señales de tráfico existentes que pueda transmitir la información codificada para la señal de tráfico correspondiente. La ventaja de este transmisor de tipo simple es que puede instalarse en todas las señales de tráfico existentes. La única diferencia entre cada señal radica en los datos codificados únicos que se transmiten desde ella.

En la parte del receptor, el receptor GDD consta de una cámara con sensor de imagen y unidad decodificadora de datos. El sensor de imágenes situado detrás de la lente de la cámara óptica podría detectar las imágenes y recibir los datos transmitidos mediante comunicación de cámara óptica [20].

FIGURA 5

Un vehículo autónomo recibe una señal OCC de una señal de tráfico



Informe SM.2422-05

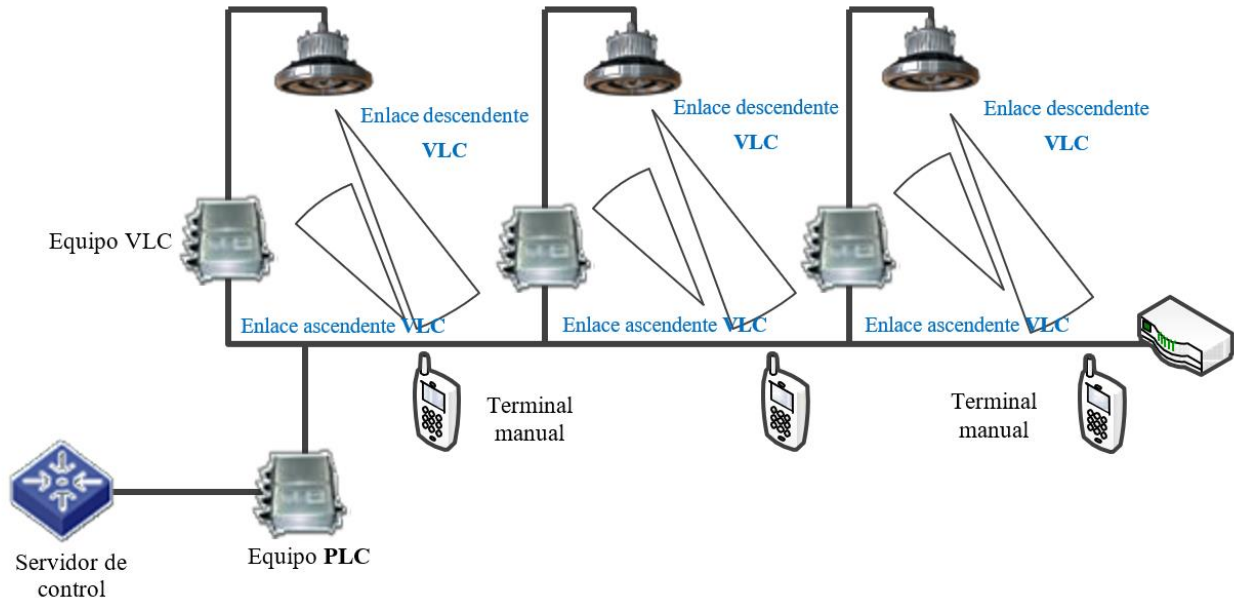
### Comunicación de información para la minería inteligente y la supervisión de túneles

La tecnología de las comunicaciones por luz visible, que es capaz de dar soporte a comunicación, intercambios de datos y funcionalidades de ubicación, ha encontrado multitud de aplicaciones en los ámbitos de la minería inteligente y la supervisión de túneles.

El requisito de la función de comunicación obedece al hecho de que las minas o los túneles están localizados a profundidades de entre decenas y centenares de metros bajo tierra, o presentan longitudes superiores a un kilómetro. Habida cuenta de la estructura de las minas o los túneles y de las características físicas del cable, la atenuación en las señales inalámbricas es muy pronunciada y el cableado de los sistemas con cable resulta muy dificultoso. Para las tareas de mantenimiento, los inspectores deben comunicarse periódicamente con las personas del centro de control. Paralelamente,

en caso de que se produzcan fallos de conexión o accidentes, es absolutamente necesario ponerse en contacto con el centro de control para eliminar los errores y proceder al rescate. La comunicación por luz visible no se ve afectada por la estructura de las minas o los túneles, ya que utiliza el equipo de iluminación para la adquisición o los intercambios de datos (de forma más específica, combinando las comunicaciones por líneas eléctricas y por luz visible) para transmitir información de voz y de vídeo y mantener la comunicación en tiempo real con el centro de control.

FIGURA 6  
Sistema VLC-PLC y servidor de control



Los requisitos de los intercambios de información incluyen la transmisión de datos de los sensores fijos y datos para aplicaciones móviles. El sistema puede integrar funciones de supervisión en línea, supervisión por vídeo, equipos con sensor térmico de infrarrojos integrado en los empalmes de cable, temperatura, ventilador, bomba de agua, corriente por tierra, fuego o gas, en combinación con dispositivos inductivos como alarmas de intrusión y defensas de tubo para la transmisión en línea en tiempo real de los datos supervisados. La transmisión periódica de los datos de supervisión permite identificar y eliminar los fallos de forma más rápida y precisa. Además, puede acortar los tiempos de las reparaciones de emergencia y reducir las pérdidas correspondientes. Durante este proceso, el personal de inspección puede utilizar este sistema para mantener los intercambios de datos y la interacción de servicio con el centro de control, lo que contribuye a mejorar el nivel de automatización de la supervisión en línea y la eficacia de la inspección.

### Internet de Radio-Luz para medios y entretenimiento en edificios

Las redes inalámbricas en los edificios suelen verse afectadas por congestión, interferencias, problemas de seguridad y protección, propagación restringida y precisión deficiente de ubicación en interiores. El proyecto de Internet de Radio-Luz (IoRL) desarrolla redes de edificios más seguras, más protegidas, personalizables e inteligentes, que ofrecen de forma fiable una potencia superior ( $> 10$  Gbit/s en un edificio) mediante accesos de ubicación generalizada en los edificios con latencias  $< 1$  ms, al tiempo que minimizan la interferencia y la exposición a campos electromagnéticos nocivos y permiten una precisión de ubicación de  $< 10$  cm. Todo esto resuelve el problema del acceso inalámbrico de banda ancha en los edificios y promueve el establecimiento de un estándar mundial en la UIT. Se incentivará a los promotores de edificios a buscar la financiación para aplicar a sus propiedades esta solución, a fin de aumentar su valor y, en consecuencia, estimular el mercado de

productos de redes de banda ancha en edificios, lo que contribuirá a beneficiar a la sociedad y a aumentar el producto interior bruto mundial. El proyecto de IoRL está desarrollando un dispositivo portátil de prueba de concepto que servirá como base para la estandarización de una solución global que aproveche las capacidades de banda ancha de las VLC, las ondas milimétricas, la flexibilidad de las tecnologías NFV/SDN y la accesibilidad de los puntos de acceso de luz eléctrica ya existentes. Este demuestra cómo una solución industrial rediseñada de radio-luz de ondas milimétricas y VLC se puede integrar en los productos de consumo de luz eléctrica ya existentes para conformar un punto de acceso electromagnético universal en todas las habitaciones de un edificio; en el año final del proyecto, se tratará de demostrar su funcionamiento en hogares, museos, estaciones de tren y supermercados.

## 7 Conclusiones

De las últimas novedades en materia de OWC, las actividades de normalización y los productos de iluminación existentes se infiere que las VLC integran una tecnología madura que reporta numerosos beneficios con miras a la descarga del espectro radioeléctrico.

En ese sentido, cabe concluir que la gestión de los dispositivos y el espectro VLC no constituye una tarea reglamentaria, sino un tema que debería articularse en torno a una serie de normas técnicas. Una estrecha cooperación entre los organismos de normalización interesados en las VLC y las aplicaciones radioeléctricas tradicionales podría resultar beneficiosa.

## Referencias

- [1] S. Nakamura, T. Mukai y M. Senoh, «Candela Class High Brightness InGaN/AlGaIn Double Heterostructure Blue Light Emitting Diodes», *Applied Physics Letters*, vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, 1994.
- [2] J. S. Kim, *et al.*, «White-light Generation Through Ultraviolet-emitting Diode and White-emitting Phosphor», *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 17, pp. 3696–3698, 2004.
- [3] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.7: «Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light» en IEEE Std 802.15.7-2011, vol., no., pp. 1-309, sept. 6, 2011.
- [4] A.M.J. Koonen, C.W. Oh, K. Mekonnen, Z. Cao, E. Tangdiongga, «Ultra-high capacity indoor optical wireless communication using 2D-steered pencil beams.» *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(20):7482669.
- [5] Jaesang Cha *et al.*, «A new band plan for IEEE802.15.7m», En línea: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/17/15-17-0174-00-007a-a-new-band-plan-for-15-7m.pdf>.
- [6] IEEE 802.15.7r1 Short-Range Optical Wireless Communications Task Group [http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802\\_15%20WPAN%2015\\_7%20Revision1%20Task%20Group.htm](http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802_15%20WPAN%2015_7%20Revision1%20Task%20Group.htm).
- [7] «Multi-Gigabit per Second Optical Wireless Communications (OWC) with Ranges up to 200 meters» <https://development.standards.ieee.org/get-file/P802.15.13.pdf?t=92735500003>.
- [8] Véase: [http://www.ieee802.org/11/Reports/lctig\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/lctig_update.htm).
- [9] M. Ayyash *et al.*, «Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges» in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, febrero de 2016.

- [10] D. Schulz *et al.*, «Long-Term Outdoor Measurements Using a Rate-Adaptive Hybrid Optical Wireless/60 GHz Link over 100 m», Proc. ICTON 2017 (invited).
- [11] A.M. Khalid *et al.*, «10 Gbps indoor optical wireless communication employing 2D passive beam steering based on arrayed waveguide gratings» Proc. IEEE Summ. Top., TuC2.3, Newport Beach (2016).
- [12] J. Zeng *et al.*, «A 5Gb/s 7-Channel Current-mode Imaging Receiver Front-end for Free-Space Optical MIMO» Proc. IEEE MWSCAS, Cancun (2009).
- [13] Z. Cao *et al.*, «200 Gbps OOK Transmission over an Indoor Optical Wireless Link Enabled by an Integrated Cascaded Aperture Optical Receiver» Proc. OFC, PDP Th5A.6, Los Angeles (2017).
- [14] S. Collins *et al.*, «High gain, wide field of view concentrator for optical communications» Opt. Lett., p. 1756-(2014).
- [15] A.M. Khalid *et al.*, «Bi-directional 35-Gbit/s 2D Beam Steered Optical Wireless Down-link and 5-Gbit/s Localized 60-GHz Communication Uplink for Hybrid Indoor Wireless Systems» Proc. OFC, Th1E.6, Los Angeles (2017).
- [16] Ivica Stevanović, «Light Fidelity (LiFi)» Federal Office of Communications OFCOM Licences and Frequency Management Division Radio Technology Section, 14 de diciembre de 2016.
- [17] Véase: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0746-01-007a-tg7r1-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.pdf>.
- [18] Optical Wireless Communication: options for extended spectrum use, Stratix and Technical University of Eindhoven commissioned by the Dutch Radiocommunications Agency (Agentschap Telecom) Ministry of Economic Affairs and Climate policy, diciembre de 2017.
- [19] Véase: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0492-05-007a-technical-considerations-document.docx>.
- [20] GDD based Automatic Traffic Sign Recognition Using CamCom Technology, IEEE 15-18-0031-00-0vat, 2018. 1.

### Otras referencias

- R. D. Roberts, S. Rajagopal and S. K. Lim, «IEEE 802.15.7 physical layer summary,» *IEEE GLOBECOM Workshops*, pp. 772-776, Houston, TX, 2011.
- T. Baykas *et al.*, «Let there be Light Again! An Amendment to IEEE 802 Visible Light Standard is in Progress» *IEEE COMSOC MMTC E-Letters*, marzo de 2016.
- M. Uysal, *et al.* «TG7r1 CIRs Channel Model Document for High-rate PD Communications,» En línea: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0747-00-007a-tg7r1-cirs-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.zip>.
- I. Stevanovic «Light Fidelity», Report OFCOM Switzerland.