

EL LED AZUL: SU APLICACIÓN EN COMUNICACIONES POR LUZ INVISIBLE

Rafael Pérez Jiménez

Instituto Universitario para el Desarrollo Tecnológico
y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC)
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
rafael.perez@ulpgc.es

Resumen

En este artículo, y con motivo de la concesión de los Premios Nobel de Física 2014, se revisa la importancia que ha alcanzado el desarrollo del led azul, desde un prisma que va más allá de los campos que habitualmente se resaltan (como la tecnología para iluminación o el almacenamiento de datos). En concreto, se lleva a cabo una revisión de su impacto en la creación de un nuevo campo de las comunicaciones como son los sistemas ópticos no guiados mediante luz visible (Visible Light Communications), línea de trabajo que no solo es el foco de numerosos grupos de investigación, sino que está traspasando la frontera entre el desarrollo científico y el producto comercial electrónico de consumo masivo, encontrando su aplicación en campos tan críticos en la economía digital como internet of things, las comunicaciones móviles de 5ª generación, la monitorización de sensores o el guiado y localización indoor en tiempo real.

Abstract

In this paper, and regarding with the Nobel Awards in Physics 2014, granted to the researchers who made possible the blue led, we review the importance of developing of this device taking into account not only the fields which typically are highlighted (such as lighting technology or its application to data storage), but reviewing its impact on the creation of a new field of communications such as wireless optical systems by visible light (or Visible Light Communications). This line of work is only the focus of numerous research groups, but it is crossing the border between scientific development and electronic commodities, finding application in several critical fields in the digital economy as could be internet of things, 5th generation cellular communications, sensor monitoring or indoor real-time location.

1. Introducción

Se destaca la figura de los investigadores Isamu Akasaki, de las universidades de Meijo y Nagoya, Hiroshi Amano de la Universidad de Nagoya (ambos en Japón) y Shuji Nakamura de la Universidad de California-Santa Bárbara (EE.UU), recientes ganadores del Premio Nobel de Física 2014. Si bien se han escrito un gran número de reseñas acerca de la importancia de su descubrimiento desde el punto de vista de los sistemas de iluminación o del entretenimiento, no es usual destacar suficientemente lo que este avance ha supuesto en el campo de la tecnología de las comunicaciones. Las lámparas de estado sólido o SSL (por *solid-state lamps*) se están haciendo con una creciente cuota del mercado debido a factores como su eficiencia energética, robustez, durabilidad o capacidad para reproducir distintas condiciones ambientales, y suponen una de las industrias de mayor impacto potencial en este nuevo siglo. Sin embargo, un aspecto incidental al que este descubrimiento abrió las puertas es el uso de esta tecnología como soporte para redes inalámbricas de comunicación. Esta “WiFi óptica” ha sido recientemente estandarizada por el IEEE (*Institute of Electrical & Electronic Engineers*) y tiene un enorme impacto potencial en áreas tales como las redes de sensores, *internet of things*, las comunicaciones entre vehículos, el acceso a contenidos multimedia o enlaces en entornos con alto nivel de ruido electromagnético.

Los sistemas VLC (*Visible Light Communications*) se basan en el uso de estos dispositivos de iluminación como proveedores de datos en redes digitales, manteniendo en todo momento la premisa ergonómica de que “una lámpara es ante todo una lámpara”, esto es, su uso como transmisor no puede implicar oscilaciones (*flickering*) o cambios de tonalidad indeseados en la luz emitida. El uso de comunicaciones VLC ofrece un nuevo canal con gran ancho de banda y sin regulación, que puede combinarse con las alternativas más clásicas (fibra óptica, enlaces *Power Line Communications*, redes inalámbricas, RFID.....) para dar acceso tanto en interiores como en exteriores. En este proyecto se exploran técnicas para la mejora de estos sistemas tanto para redes en exteriores como en interiores, y para el acceso de sistemas de alta velocidad (como redes en *broadcasting* o accesos de red asimétricos) como para múltiples accesos asíncronos de baja velocidad, como los que se usan en redes de sensores.

Este artículo se organiza como sigue. A continuación se describe la secuencia de hechos que desembocaron en el descubrimiento de los ledes de iluminación, para luego entrar a describir los primeros pasos dados en su empleo como fuente de comunicaciones ópticas en interiores. Posteriormente se pormenorizan los fundamentos de los nuevos estándares de comunicaciones VLC y algunas posibles aplicaciones y finalmente se muestran algunas conclusiones.

2. El Led ve la luz...valga la redundancia

Debemos remontarnos a 1907 para encontrar el primer paso de la tecnología LED: Henry J. Round, asistente de Marconi, descubrió el efecto físico de la electroluminiscencia cuando estaba trabajando en investigaciones referentes a las comunicaciones por radio. Si bien publicó ese descubrimiento en la revista “*Electrical World*” ([1], figura 1), no siguió desarrollando esta línea de investigación, por lo que no fue hasta unos 20 años después cuando un joven científico soviético, Oleg

Los siguientes trabajos, ya entrada la década del 70, introdujeron nuevos colores a la panoplia de emisión de los led, variando las proporciones entre materiales para obtener nuevas longitudes de onda de emisión. Así se consiguieron lámparas verdes o rojas utilizando GaP o nitruro de galio (GaN), y en 1972 George Craford logró un led emisor en amarillo (y luego en ámbar, naranja y rojo en bandas de más sensibilidad para el ojo humano como los los 630 nm) utilizando GaAsP. Fueron los ledes de los primeros relojes y calculadoras digitales con sus famosos *displays* de 7 segmentos. También se desarrollaron ledes infrarrojos, que se hicieron rápidamente populares en los controles remotos de los televisores y otros equipos domésticos. Con la introducción del GaAlAs en la década del 80 el mercado de los ledes empezó a ser realmente competitivo en aplicaciones industriales, ya que su brillo creció hasta llegar a ser 10 veces superior al de las lámparas anteriores, y como permitía utilizar con corrientes más elevadas, hizo que se popularizaran en *displays* y letreros de mensaje variable como los que vemos en las carreteras. El uso de AlInGaP, a partir de la década de los 90, permitió conseguir una gama de colores desde el rojo al amarillo simplemente cambiando la proporción de los materiales que lo componen, con una vida útil es sensiblemente mayor a la de sus predecesores (más de 100.000 horas, aun en ambientes de elevada temperatura y humedad).

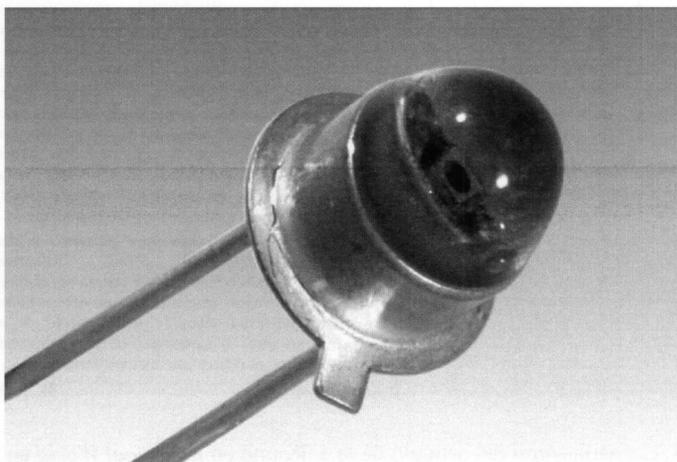


Figura 2: Primer led rojo realmente operativo (Monsanto MV1 de 1964)

2.1. El gran azul

La obtención de un led azul eficiente fue una misión que, sin embargo, se resistió a los intentos de los investigadores hasta mediados de la década de los 90 del pasado siglo. Sin él, la tecnología del led seguía sin poder dar el salto para convertirse en una alternativa viable en el mundo de la iluminación doméstica, ya que no contaba con dispositivos que pudieran emitir en el tercer color básico para completar la matriz RGB, y obtener luz blanca y poder cumplir así el sueño de dejar obsoletas las bombillas incandescentes de Edison. ¿Qué hacía que este led fuera un reto tecnológico y que se tardase 30 años en conseguirlo? De forma sencilla, se puede reducir a la dificultad de encontrar un equilibrio en las características del semiconductor, en concreto del “gap”

entre la banda de conducción y de valencia que permitiera emitir en una banda alrededor de los 430 nm. sin perder sus características y emitiendo una potencia suficiente.

Ya desde los años 60 se había venido especulando con el uso de nitruro de Galio (GaN) como emisor de luz azul. En 1971, Jacques Pankove en RCA había logrado un primer modelo, pero su bajísima potencia de emisión la convertía en inutilizable ya que las impurezas del material disminuían sus propiedades eléctricas. La respuesta vino desde Japón, donde el Profesor Isamu Akasaki, y su discípulo Hiroshi Amano, en la Universidad de Nagoya lograron en 1985 el crecimiento de GaN de alta calidad sobre sustrato de zafiro. Este material permitió que Shuji Nakamura (el auténtico “padre” del led azul) desarrollara con él un led de alto brillo que, si se recubría con una “capucha” de material fosforescente (normalmente una cobertura de Cerio dopado con Ytrio y Aluminio, denominado YAG:Ce) emitía un centelleo amarillo que estimulaba los receptores rojos y verdes del ojo, con lo que su mezcla con azul producía un efecto de luz blanca. Esta investigación se había hecho en gran medida contra la opinión de la compañía donde trabajaba Nakamura (Nichia) que consideraba que este led no iba a tener un gran desarrollo comercial y que la gran inversión realizada no se iba a recuperar. Solo el apoyo personal del fundador de la empresa, Nobuo Ogawa, permitió que siguiera adelante hasta lograr resultados en 1993. Posteriormente, Nakamura abandonó Nichia para recalar en la Universidad de California-Santa Barbara y colaborar con el mayor rival comercial de Nichia: Cree Inc. Se inició entonces una dura pugna entre Nakamura y su antigua empresa por el uso de la patente japonesa 404, los beneficios que generaba y las bonificaciones concedidas a su antiguo empleado, que se saldaron con una no despreciable bonificación al inventor de 9 millones de dólares. Últimamente han ido apareciendo, cada vez con más frecuencia, lámparas que obtienen el efecto de luz blanca mediante combinaciones de distintos ledes (RGB por Red-Green-Blue, o RGB-A cuando se le añade un led ámbar). De este modo se puede, no sólo obtener una luz blanca, sino cambiar su tonalidad a voluntad del usuario, por ejemplo regulando sus ciclos circadianos cuando se sufre jet-lag. De esta manera se pueden ir recreando distintos ambientes y facilitando una mayor actividad (con una luz blanca azulada, o “blanco frío”) o promoviendo la relajación (usando luz más amarilla o “blanco cálido”), lo que es de especial interés en aplicaciones como las instalaciones hospitalarias o los hoteles.

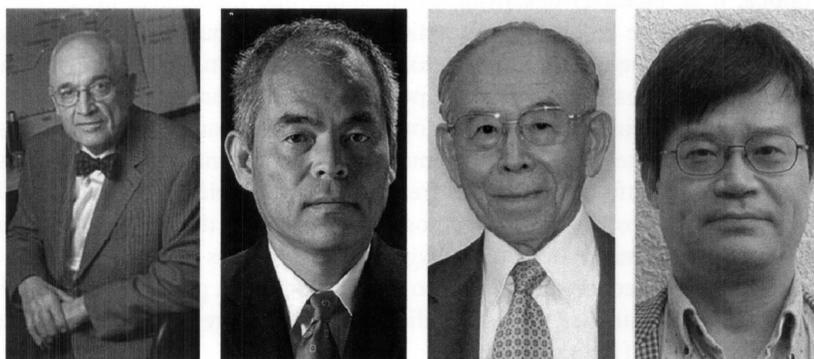


Figura 3: De izquierda a derecha, el descubridor del led rojo, Nick Holonyak, Jr. Y los ganadores del premio nobel de 2014: Shuji Nakamura, Isamu Akasaki y Hiroshi Amano

Es difícil exagerar la importancia de este descubrimiento en el campo de la iluminación, los datos de 2014 hablan de un mercado global para la industria led de más de 18.000 millones de dólares, sin contar otras áreas que se han beneficiado de esta patente como los reproductores *Blu-Ray*. En automoción se ha pasado en pocos años de considerar ilegal el uso de faros led a que prácticamente sea imposible encontrar un coche moderno en que los pilotos de señalización usen otra tecnología. Asimismo se ha convertido en el estándar para la iluminación pública o en los semáforos. Poco a poco, mitos como que la luz led es poco potente (se consiguen ya densidades de más de 150 lúmenes por vatio) o que es muy fría, van siendo abandonados, ya que hay distintas configuraciones en función de los recubrimientos utilizados. Como resumen, podemos exponer algunos de los argumentos que han popularizado el uso de lámparas de estado sólido en iluminación:

- Una vida útil por lámpara que se mide, al menos, en años (muchas veces los fabricantes ofrecen incluso una garantía de tiempo de uso ilimitada)
- La luz que producen es en gran medida uniforme, no produciéndose cambios de intensidad ni color de luz emitida a lo largo de su vida útil
- Un consumo por lámpara que es al menos un orden de magnitud más bajo que el de las lámparas incandescentes (incluso de las llamadas de bajo consumo) y mucho menor que las lámparas de gran intensidad (lámparas halógenas, de xenon, etc.)
- Los fabricantes presentan formatos que pueden acoplarse a los puntos de conexión convencionales sin necesidad de revisar ni modificar las instalaciones eléctricas
- Si bien actualmente el precio por lámpara es aún mucho mayor que el de sus alternativas convencionales, este ha venido decayendo de forma acelerada a medida que se ven implantando en nuevas aplicaciones (iluminación de hoteles, señalización urbana...) o se introducen en estándares de uso (faros o intermitentes de vehículos etc.)

3. El led blanco en comunicaciones

A día de hoy, cuando hablamos de autopistas de la información formadas por haces de fibra óptica, o se busca el desarrollo de sistemas que realizan el procesado de la información directamente en el dominio óptico, difícilmente puede considerarse que el uso de la luz como medio de transmisión de información sea algo novedoso o sorprendente. Si bien nosotros ya damos por hecho la transmisión guiada por fibra óptica, también la comunicación de señales ópticas de forma inalámbrica tiene una larga tradición: en *La Iliada* se describe ya como se utilizaron una serie de fogatas para indicar a Micenas el triunfo de los aqueos frente a Troya. El telégrafo óptico de Chappé o Betancourt y Molina, los frustrados intentos de Graham Bell de lograr un *fonófono* que transmitiese voz de forma óptica, o las *signal lamps* de los buques son sólo otros ejemplos de uso de esta tecnología. De hecho, hasta la segunda guerra mundial todos los ejércitos disponían de unidades de heliografía que usaban el reflejo sobre espejos para transmitir códigos morse (figura 4).

Posteriormente, se comenzó a estudiar el uso de redes mediante enlaces por radiación infrarroja, y el interés se centró en el uso de redes ópticas no guiadas para

gestionar accesos de datos en interiores para accesos de datos o interconexión de sensores, a partir de un artículo de Fritz Gfeller en 1979 [4]. Si bien llegaron a desarrollarse dos estándares internacionales (IEEE 802.11-IR e IrDA) su vida comercial fue azarosa por la dificultad de competir con otras propuestas como Bluetooth o WiFi, ya que exigían una alta directividad y, por problemas de seguridad ocular, necesitaba usar potencias relativamente bajas, por lo que la escasa potencia recibida limitaba el alcance a 1-2 metros. Un emisor infrarrojo típico usaba potencias radiadas de pocos milivatios por estereorradián lo que, salvo en el caso de una aplicación sencilla como un mando a distancia, resultaba en un enlace muy poco robusto frente al ruido proveniente de la luz solar, la presencia de obstáculos o la interferencia de otras fuentes ópticas como fluorescentes o lámparas incandescentes.



Figura 4: unidad de heliografía del ejército turco, Gallipoli, 1915

La solución vino, como no, de los nuevos ledes de iluminación que permitían altas velocidades de conmutación, conjuntamente con un nivel de potencia óptica emitida varios órdenes de magnitud por encima de los sistemas infrarrojos. Las primeras referencias a esta posibilidad tecnológica se deben al Grupo del Profesor M. Nakagawa en la Keijo University [5-7] que, no sólo acuñó el término *visible light communications* sino que impulsó la participación de empresas en su desarrollo a partir de la creación del *VLC Consortium* o VLCC [8].



Figura 5: Dr. Masao Nakagawa

Una premisa a mantener para la conversión de un sistema de iluminación en un sistema dual de alumbrado y comunicaciones, es que las lámparas deben seguir manteniendo su funcionalidad como sistema de iluminación, esto implica:

- Que el formato de datos debe ser tal que no afecte a la intensidad de luz percibida por el usuario, ni que sufra la presencia de “guiños” (*flickering*). Adicionalmente debería permitirse la regulación de la intensidad de luz (e incluso en algunos casos su temperatura de color) sin afectar a la funcionalidad del sistema de comunicaciones.
- Que el sistema debe funcionar, tanto cuando la iluminación está encendida como cuando está apagada, entendiéndose como “apagado” cuando se emite por debajo del nivel de sensibilidad del ojo humano (o apenas por encima de ese umbral).
- Que deben buscarse procedimientos para asegurar no sólo en enlace procedente de la lámpara, sino también un canal de retorno (*uplink*) para comandos, o para los datos entregados por sensores.

3.1. El estándar VLC

Esta idea, que hasta entonces no pasaba de verse como una elucubración peregrina de algunos universitarios, de repente se convirtió en objeto de interés económico. Ya se ha mencionado el consorcio VLCC japonés, que dio lugar a una colección inicial de estándares iniciales: los Jeita 1221/22/23 [9]. También, varias empresas fabricantes de telefonía móvil, así como grupos industriales de diversos campos, como la seguridad, la automoción o los sistemas marítimos. Todos pusieron sus ojos en esta línea de trabajo y promovieron la creación de un grupo de especial interés que desembocó en la creación del comité 802.15.7 del IEEE [10], el cual dio por finalizado un primer borrador con sus conclusiones en 2012. ¿Y cómo se transmite la información? Básicamente hay dos posibles mecanismos: el primero consiste simplemente en encender y apagar la luz, conmutando el led a una muy alta velocidad, mientras que en el segundo modelo se crean combinaciones de color que se transmiten mediante diodos RGB, siendo cada componente un símbolo distinto. Veamos estos modelos con algo más de detalle.

El simple proceso de conmutar el diodo (enviar información binaria según se emita luz o no) se emplea en sistemas de relativamente baja velocidad que emplean diodos blancos tipo YAG (también denominados a veces PhB, por las siglas de *Phosphor-Blue*). La velocidad de transmisión en este caso viene limitada por el efecto de fosforescencia del recubrimiento, lo que limita la velocidad de conmutación a unos 6-8 MHz y la de transmisión a unos 10-12 Mbits/s en función del tipo de codificación empleado. En este caso, el nivel de potencia emitida se regula estrechando o ensanchando el pulso transmitido, pero también de forma limitada por el efecto de fosforescencia. Sin embargo, cuando se usan diodos RGB pueden alcanzarse velocidades mucho mayores. La estrategia en ese caso consiste en partir de una matriz de color, como la que se muestra en la figura 6, y que sigue la norma CIE1931 de coordenadas de color xy. Como se emiten símbolos equiprobables, la combinación de señales emitidas se ve desde un observador como el baricentro de esos símbolos, por tanto, como una luz blanca por agregación de las componentes emitidas. Cada punto de la matriz se corresponde a un color, y por tanto a valores de corriente a aplicar a cada

uno de los diodos emisores. Cambiando estas “constelaciones” de señales transmitidas se puede cambiar la luz ambiente (haciéndola más cálida o más fría), logrando velocidades que pueden alcanzar hasta los 96 Mbits/s. Esta forma de modulación (denominada *Color Shift Keying* o CSK) es una de las aportaciones más novedosas y prometedoras de esta propuesta, ya que permite optimizar no sólo la velocidad de transmisión sino el consumo eléctrico de la lámpara.

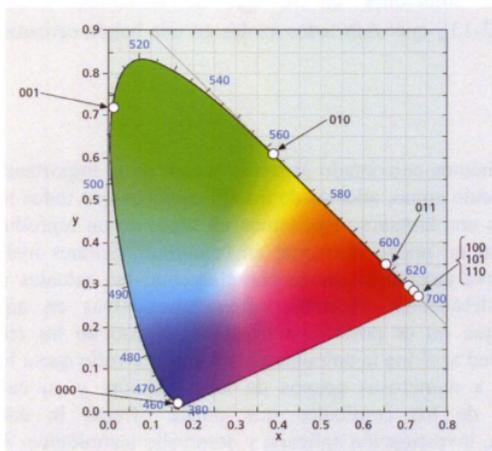


Figura 6: matriz xy según la norma CIE1931, y códigos utilizados según el estándar IEEE 802.15.7

4. Escenarios de aplicación

¿Por qué transmitir información a través de una lámpara? Básicamente, porque el espectro radioeléctrico que se usa para las comunicaciones radio cada vez está más saturado. Se estima que la demanda de ancho de banda requerida por los usuarios, considerada de forma global, se dobla cada 2 años. Sin embargo, incluso con las nuevas técnicas de *dynamic spectrum allocation* la disponibilidad de este recurso no crece más de un 10% anual. Esa demanda global se debe no sólo a que la población crezca, sino al hecho de que cada vez hay más dispositivos con mayor capacidad (*smartphones*, *tablets*, televisiones ultra HD) que demandan contenidos de mayor peso (video en alta definición, juegos interactivos en red). A esto se suma un importante cambio sociológico en la definición del ocio, los tiempos en que la familia se reunía y veía un único contenido en televisión han pasado a la historia, ya que ahora lo normal es el ocio multipantalla donde cada usuario ve sus contenidos de forma independiente. La señal óptica ofrece una amplia oferta de ancho de banda sin regular, y que además, es inmune a interferencias provenientes del ruido electromagnético. Además de permitir crear una estructura intrínsecamente celular de comunicaciones, ya que la luz, a diferencia de las señales de radio, no atraviesa las paredes y por tanto no se producen interferencias entre usuarios vecinos, además de impedir que la señal sea captada desde el exterior.

Otros entornos de aplicación son las comunicaciones entre vehículos [11], ya que permite recibir información desde semáforos o desde otros vehículos a través de sus faros o de los pilotos indicadores, permitiendo que nuestro vehículo reaccione de forma automática cuando el vehículo precedente frena o realiza una maniobra brusca. Otro lugar donde estas aplicaciones pueden usarse de forma natural es en aplicaciones submarinas, donde los sistemas acústicos pueden causar problemas a la fauna marina y los emisores de radiofrecuencia requieren antenas de grandes dimensiones. En ese caso, se están buscando soluciones en lo que se denomina *Underwater Optical Communications* [12-13], que usan ledes azules en una banda cercana a los 500 nm de longitud de onda.

5. Conclusiones

En este artículo hemos comentado aspectos acerca de la importancia de la creación del led azul exponiendo como, además de las aplicaciones que todos tenemos en mente cuando encendemos una lámpara, o ponemos un disco en un reproductor Blu-Ray, su desarrollo ha abierto un nuevo horizonte en la comunicaciones inalámbricas de alta velocidad. Esta nueva tecnología puede complementar las actuales redes basadas en sistemas por radiofrecuencia. Además, ofrece alternativas en aquellos nidos de aplicación en los que no es posible, o deseable, el uso de las redes inalámbricas convencionales. El led azul fue la culminación de un desarrollo que a lo largo de más de 30 años involucró a numerosos grupos de investigación, y su culminación es un excelente ejemplo de los resultados que puede ofrecer la colaboración entre investigación básica, investigación aplicada y desarrollo tecnológico. A día de hoy solo empezamos a entrever sus posibilidades.

6. Referencias mencionadas

- [1] Round, H. J. (1907), "A note on carborundum", *Electrical World* 49: 309.
- [2] citado por Zheludev N. (2007). "The life and times of the LED—a 100 year history". *Nature Photonics* 1 (4): 189–192. DOI:10.1038/nphoton.2007.34.
- [3] Patente URSS #12191 (1929)
- [4] Gfeller, F. R., & Bapst, U. (1979). Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. *Proceedings of the IEEE*, 67(11), 1474-1486.
- [5] Tanaka, Y., Komine, T., Haruyama, S., & Nakagawa, M. (2001, September). Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2001 12th IEEE International Symposium on* (Vol. 2, pp. F-81). IEEE.
- [6] Komine, T., & Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 50(1), 100-107.
- [7] Tanaka, Y., Komine, T., Haruyama, S., & Nakagawa, M. (2003). Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights. *IEICE transactions on communications*, 86(8), 2440-2454.
- [8] <http://www.vlcc.net/>, consultada el 13/12/2014
- [9] la versión inglesa de estos estándares puede consultarse en http://www.jeita.or.jp/english/public_standard/, consultada el 13/12/2014
- [10] Rajagopal, S., Roberts, R. D., & Lim, S. K. (2012). IEEE 802.15. 7 visible light communication: modulation schemes and dimming support. *Communications Magazine, IEEE*, 50(3), 72-82.

- [11] Arai, S., Mase, S., Yamazato, T., Endo, T., Fujii, T., Tanimoto, M., ... & Ninomiya, Y. (2007, September). Experimental on hierarchical transmission scheme for visible light communication using led traffic light and high-speed camera. In Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th (pp. 2174-2178). IEEE.
- [12] Hanson, F., & Radic, S. (2008). High bandwidth underwater optical communication. *Applied optics*, 47(2), 277-283.
- [13] Arnon, S. (2010). Underwater optical wireless communication network. *Optical Engineering*, 49(1), 015001-015001.