

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

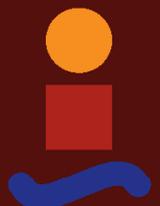
Características y prestaciones de redes inalámbricas híbridas LiFi y WiFi

Autor: Antonio José Machuca González

Tutor: Federico José Barrero García

Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Características y prestaciones de redes inalámbricas híbridas LiFi y WiFi

Autor:

Antonio José Machuca González

Tutor:

Federico José Barrero García

Catedrático de Universidad

Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Características y prestaciones de redes inalámbricas híbridas LiFi y WiFi

Autor: Antonio José Machuca González

Tutor: Federico José Barrero García

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mi tutor

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres por apoyarme en todo momento. Agradecer a mi abuela y a mi tía por aguantarme durante 4 años. Agradecer a mis amigos por estar ahí para las buenas y para las malas. Por último, agradecer a mi tutor Federico, que más que una guía ha sido un amigo durante la creación de este trabajo.

Antonio José Machuca González

Autor del proyecto

Sevilla, 2022

Resumen

Este proyecto trata sobre un estudio de los requisitos de diseño de las redes híbridas LiFi/WiFi y las posibilidades de implementación y aplicación de las mismas. Se comenzará discutiendo el funcionamiento principal de cada tecnología por separado para conocer las virtudes e impedimentos más destacables. Posteriormente se explicará de forma detallada el proceso de integración de ambas redes, resaltando las dificultades de diseño y líneas futuras de este tipo de redes. Finalmente se discuten los resultados de un pequeño montaje basado en esta tecnología, con el fin de validar los resultados estudiados anteriormente, además de comentar las posibles mejoras de la red.

Abstract

The project deals with the research of design requirements of LiFi/WiFi hybrid networks and their possibilities of implementation and application. It will start discussing the functioning of each technology independently to know the major virtues and impediments. Then explains in detail the convergence of both networks, emphasizing the design difficulties and the future applications of this kind of network. Finally, we discussed the results of an assembly based in this technology, with the purpose of validate the results of the previous segment, and the possible improvements.

Índice

Agradecimientos	ixx
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Figuras	xviii
1 Introducción	1
2 WiFi	3
2.1. Estándar 802.11	3
2.2. Transmisión e interferencias	5
2.3. Arquitectura y topologías de la red WiFi	6
2.4. Seguridad en las redes WiFi	9
2.5. Conclusiones	9
3 LiFi	11
3.1. Estándar 802.15.7	11
3.2. Principio de funcionamiento de LiFi	13
3.3. Componentes	14
3.4. Modulaciones LiFi	15
3.5. Aplicaciones de la tecnología LiFi	16
3.6. Comparativa de LiFi y WiFi	17
3.7. Conclusiones	19
4 HLWNets	20
4.1. Introducción	20
4.2. Marco de diseño de sistemas	21
4.3. Métricas de rendimiento	24
4.4. Modelado de comportamiento del usuario	26
4.5. Gestión de interferencias	27
4.6. Balanceo de carga	20
4.7. Aplicaciones	22
4.8. Desafíos y aplicaciones futuras	23
4.9. Conclusiones	24
5 Montaje experimental	35
5.1. Introducción	35
5.2. Móvil + módulo WiFi (router WiFi) Nodo radio	37
5.3. PC + MSP430 (router LiFi) Nodo óptico	39
5.4. Red híbrida WiFi/LiFi	40
5.5. Caracterización de la comunicación	41
5.6. Conclusiones	47

Referencias

48

Anexo

52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Logo de WiFi.	3
Figura 2-2. Relación entre los miembros de la familia 802.	4
Figura 2-3. Distintos canales de los estándares 802.11b/g.	5
Figura 2-4. Arquitectura estándar 802.11.	6
Figura 2-5. Modo Ad-Hoc con tres estaciones.	8
Figura 2-6. Modo infraestructura.	8
Figura 3-1. Logo de Lifi.	11
Figura 3-2. Topologías del estándar 802.15.7.	12
Figura 3-3. Arquitectura de un dispositivo de una red VPAN.	13
Figura 3-4. Ejemplo de red Lifi.	14
Figura 3-5. Algunos ejemplos de LED.	14
Figura 3-6. Fotodiodo InGaAs.	15
Figura 3-7. Sensor de imagen CMOS.	15
Figura 3-8. Ejemplo de señal OFDM.	16
Figura 4-1. Ejemplo de HLWNet.	21
Figura 4-2. Ubicaciones optimizadas de AP LiFi.	22
Figura 4-3. Distribución de iluminancia en una habitación.	23
Figura 4-4. Rotaciones axiales de un dispositivo móvil.	26
Figura 4-5. Resumen de técnicas de gestión de interferencias en LiFi.	27
Figura 5-1. Módulo WiFi ESP8266.	35
Figura 5-2. Receptor láser.	36
Figura 5-3. Módulo láser.	36
Figura 5-4. Microprocesador MSP430G2ET.	37
Figura 5-5. Salida del puerto serie del ESP8266.	38
Figura 5-6. Interfaz de UDP Terminal.	38
Figura 5-7. Bits transmitidos de la letra a.	39
Figura 5-8. Bits recibidos que se corresponden a la letra a.	40
Figura 5-9. Ejemplo de canal LOS.	42
Figura 5-10. Resultados para una distancia de 0 cm.	43
Figura 5-11. Resultados para un canal de 10 cm.	43
Figura 5-12. Resultados para un canal de 20 cm.	44
Figura 5-13. Resultados para un canal de 150 cm.	45
Figura 5-14. Ejemplo de canal NLOS.	45

INTRODUCCIÓN

*Everywhere in a day there is light. Look around.
Everywhere. Look at your smart phone. It has a
flashlight, an LED flashlight. These are potential
sources for high-speed data transmission.*

- Harald Haas -

Planteamiento del problema

La aparición y desarrollo de la electrónica en la segunda mitad del siglo XX ha tenido un profundo efecto en la sociedad, especialmente favoreciendo el desarrollo industrial y tecnológico de la misma. Hoy día este desarrollo ha generado un gran aumento del tráfico de datos entre dispositivos electrónicos móviles, sobre todo en interiores, siendo ésta una tendencia al alza que se prevé que seguirá así en los próximos años. Es evidente que el espectro radioeléctrico será incapaz de hacer frente al enorme crecimiento de la demanda debido a su limitado espacio disponible. Sin embargo, cuando pensamos en comunicaciones móviles de corto alcance uno de los principales ejemplos que se nos viene a la mente es Wifi, uno de los sistemas más usados cuyo uso se hace imprescindible en las comunicaciones interiores. No obstante, Wifi hace uso del mencionado espectro radioeléctrico por lo que aumentar el uso de esta tecnología no parece una buena solución para largo plazo, a pesar de su gran utilidad en la actualidad. La limitación de tamaño del espectro es una desventaja evidente, pero dejar de emplear redes Wifi nos impediría aprovechar todas sus cualidades.

Una posible solución sería emplear el espectro óptico, el cual no solo es mucho más extenso, cercano a 300 THz, sino que no presenta licencia ni se encuentra regulado por ningún organismo. Viéndolo de esta manera podemos afirmar que es una muy buena solución para el problema presentado, no obstante, este sistema presenta ciertas dificultades. El término Lifi fue mencionado por primera vez en 2011 por Harald Haas, un profesor de la Universidad de Edimburgo, por lo que es una tecnología relativamente reciente con aplicaciones limitadas y aún en desarrollo. El principal motivo por el que no se sustituye Wifi por Lifi es la necesidad de tener una visión directa entre emisor y receptor en todo momento, lo cual es lógico al propagarse la información a través de luz visible. Las bombillas LED empleadas parpadean a tal velocidad que es imperceptible para el ojo humano, pero admisible para un fotoreceptor, captando así la información. Como se puede imaginar este fotoreceptor debe estar bien iluminado con una visión directa a la fuente de luz, en caso contrario la comunicación sería inviable. En el interior de un edificio necesitaríamos muchas bombillas y una buena iluminación por lo que presenta varias dificultades.

A simple vista parece que ninguna de estas tecnologías puede solventar el problema, no obstante, si analizamos la situación nos daremos cuenta de que en cierto modo tienen características complementarias. Por una parte, Wifi presenta un espectro limitado compensado por un mayor rango y cobertura. Por otra parte, Lifi cuenta con un menor rango y funciones más limitadas, pero presenta mayor velocidad y un espectro sin licencia. Combinando ambos sistemas podemos no solo dar una solución al problema inicial sino también dar un mejor uso a cada tecnología y solventar sus inconvenientes.

Objetivos del trabajo

El resultado que buscamos es encontrar posibles soluciones a la escasez del espectro radioeléctrico empleando la tecnología Lifi en los ámbitos que sean posibles como lo pueden ser el uso personal, empresarial, entre otros. No obstante, también estudiaremos otras aplicaciones de las redes híbridas de Lifi y Wifi (HLWNets) tanto presentes como

actuales, hablando en el proceso de las distintas dificultades, desventajas y posibilidades de este tipo de tecnología.

Una vez planteado el proyecto, vamos a estudiar las dos tecnologías principales que intervienen en las HLWNets, Wifi y Lifi.



Figura 2-1. Logo de Wifi.¹

En este capítulo aportaremos una visión general de Wifi, incluyendo su creación, funcionamiento, arquitectura, protocolos básicos, aplicaciones, ventajas, inconvenientes, así como aspectos generales de la familia de estándares 802.11. Estos conocimientos previos resultan esenciales para el análisis de las HLWNets, ya que Wifi es un componente esencial y si no conocemos todas sus posibilidades el sistema quedará incompleto.

Suele pensarse que el término Wifi procede de Wireless Fidelity ('Fidelidad inalámbrica'), aunque en parte es cierto no es del todo correcto. En realidad, no tiene ningún significado, no es más que el nombre de una marca como lo es Nintendo o Samsung. La confusión se debe a que se promocionaba como una tecnología asociada a la fidelidad inalámbrica, pero solo tenía una finalidad publicitaria.

Wifi surgió en los años 90 por la necesidad de poder establecer conexiones inalámbricas entre dispositivos diferentes. Gracias al enorme éxito de Internet varias empresas vieron una oportunidad y decidieron crear una forma de aprovechar Internet sin la necesidad de emplear cables. De esta forma en 1999 las empresas 3Com, Airones, Intersil, Lucent Technologies, Nokia y Symbol Technologies se unieron para dar lugar a WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance). Actualmente se conoce como Alianza Wi-Fi y cuenta miembros de más de 850 compañías y más de 50.000 productos verificados.

La WECA tenía como objetivo crear estándares comerciales para garantizar que la comunicación entre distintos dispositivos, independientemente de la marca o modelo. Para ello se creó la conocida norma 802.11b del IEEE la cual, garantiza al usuario el correcto conexionado y funcionamiento de la red Wifi independientemente de la marca del dispositivo.

2.1 Estándar 802.11

Las primeras redes inalámbricas cada fabricante usaba sus propias tecnologías WLAN. Como consecuencia los dispositivos de distintas marcas eran incompatibles y obligaba a cada fabricante a disponer de la infraestructura necesaria para cumplir con las peticiones del mercado. Esto era inviable, por ello el IEEE creó el estándar 802.11, promoviendo además una popularización de esta tecnología.

El estándar 802.11 el cual vio la luz en 1997 pertenece a la familia 802, encargada de regular tecnologías de redes de área local. 802 elige como punto de partida el modelo OSI y redefine el nivel de enlace en

¹Imagen tomada de <https://www.vinilowcost.com/informacion/587-logo-wifi.html>. Fecha de consulta: Octubre de 2021

dos subcapas, la subcapa MAC y la subcapa LLC. MAC (Medium Access Control) controla el acceso al medio físico y se encarga de las tareas específicas de la tecnología LAN elegida, como el entramado, codificación, control de errores, acceso al medio compartido, entre otras. LLC (Logical Link Control) es la subcapa de control del enlace lógico. Permite a las capas superiores (capa de red) compartir el uso del nivel de enlace, estableciendo varios flujos simultáneos de información. El estándar 802.11 hace una división similar distinguiendo entre la capa de enlace MAC y la capa física PHY. La capa PHY se divide a su vez en la capa PLCP ((Physical Layer Convergence Procedure) y PMD (Physical Medium Dependent). Este estándar alcanzaba una velocidad máxima de hasta 2 Mbps según el fabricante. Trabaja con una frecuencia de 2.4 GHz. En la actualidad se utilizan normalmente las versiones 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n y 802.11ac.

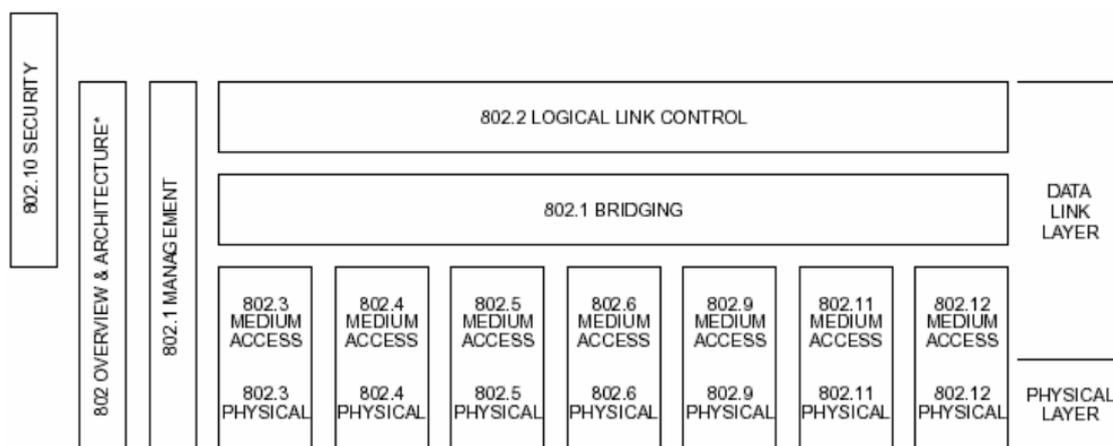


Figura 2-2. Relación entre los miembros de la familia 802.²

- 802.11b es una evolución directa de 802.11 y ha sido uno de los más utilizados. Fue creado en julio de 1999, con una capacidad teórica máxima de transmisión de 11 Mbps, comparable al clásico Ethernet, pero debido al protocolo CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detect), en la práctica alcanzaba una velocidad de transmisión de 5.9 Mbps para el protocolo TCP y 7.1 Mbps para UDP. La frecuencia empleada seguía siendo de 2.4 GHz y solo utiliza la modulación DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). El problema era que, al ser una frecuencia sin regulación, podía haber interferencias con móviles y otros dispositivos que trabajaran a la misma frecuencia. Esto se solventaba colocando las instalaciones a una distancia adecuada de los elementos interferentes, además al trabajar con una frecuencia sin regulación los productos tienen un menor coste para los fabricantes.
- 802.11a es una evolución de 802.11b la cual debido a unos mayores costes resultó menos popular. Emplea una modulación OFDM y los mismos protocolos que el estándar 802.11 original. Es más adecuado para empresas, ya que permite velocidades de hasta 54 Mbps y al trabajar con frecuencias en torno a 5 GHz se encuentra en un espectro de frecuencias regulado y con menos interferencias. Al trabajar a una mayor frecuencia se disminuye la cobertura y alcance de la señal, a cambio disfruta de una mayor velocidad y elimina la posibilidad de interferir con otros dispositivos. 802.11a y 802.11b no son compatibles entre sí, es por esto por lo que algunos fabricantes disponen de dispositivos híbridos que admiten ambos estándares.
- 802.11g fue desarrollado en 2003 como una extensión de 802.11b, consiguiendo igualar la tasa de 54 Mbps de 802.11a pero en la banda de 2.4 GHz. Utiliza el protocolo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance). Los dispositivos que emplean 802.11g son totalmente compatibles con los que emplean 802.11b no obstante si interviene un dispositivo con 802.11b la

²Imagen tomada de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11306/fichero/TEORIA%252F07+-+Capitulo+2.pdf> Fecha de consulta: Octubre de 2021

velocidad de la red se verá limitada por este. La modulación empleada es OFDM, tomada del estándar 802.11a, es por esto por lo que a pesar de trabajar en la misma banda de frecuencias que 802.11b puede lograr una mayor velocidad de transmisión de datos. Esto condiciona a que las interferencias sean similares a 802.11b.

- 802.11n fue definido en 2004 y empezó a operar en 2008, con el propósito de aumentar la capacidad de la red con respecto a los estándares anteriores, alcanzando un régimen binario de 600 Mbps. Emplea banda dual, es decir, puede entregar datos a través de dos frecuencias, una de 2.4 GHz y otra de 5 GHz. Fue el primero en implementar la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output), la cual permite usar varios canales a la vez para el envío y recepción de datos. Emplea una modulación OFDM con modificaciones para adaptarse mejor a MIMO.
- 802.11ac está basado en 802.11n y fue aprobado a finales de 2013. En el anterior estándar el ancho de banda tenía un máximo de 400 MHz, ahora este se incrementa hasta 80 MHz e incluso 160 MHz. Emplea modulación desde 64-QAM a 256-QAM permitiendo así altas tasas de transferencia de datos alcanzando un valor teórico de 1.3 Gbps. Emplea una mejora MIMO denominada MU-MIMO donde se envían múltiples tramas a múltiples clientes. Este estándar opera únicamente en la banda de 5 GHz para evitar interferencias. Presenta compatibilidad con 802.11a/N. Como última novedad presenta un modo de difusión dirigida, llamado beamforming, consiguiendo así concentrar mejor la señal y disminuir el consumo eléctrico del equipo frente a la tradicional difusión omnidireccional.
- En la actualidad (2019-2020) la última versión es el estándar 802.11ax, la sexta generación y sucesor del 802.11ac. Tiene como objetivo alcanzar tasas de 10 Gbps y cumple con los requisitos para interiores de 5G. Funciona en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz ya existentes, pero también se define una nueva banda de 6 GHz. Emplea OFDM, MIMO con hasta 8 flujos simultáneos y añade el uso de OFDMA.
- Para el año 2024 está previsto la llegada de 802.11be con el objetivo de alcanzar tasas de hasta 40 Gbps, para lo cual introduce algunas mejoras como lo son el uso de MIMO con hasta 16 flujos simultáneos.

2.2 Transmisión e interferencias

Las redes Wifi utilizan como medio físico de transmisión el aire empleando ondas de radio. Para una misma capa MAC se definen tres capas físicas de radiofrecuencia y otra basada en infrarrojos. Según el estándar empleado en el sistema estas ondas tendrán una frecuencia de 2.4 GHz o 5 GHz, por lo que el alcance máximo del sistema será unas cuantas decenas de metros. Al operar con ondas de esta frecuencia se hace imposible que las personas las escuchen o visualicen, en cambio son perfectamente distinguibles para los equipos receptores. La información viaja en las ondas en distintos canales de transmisión los cuales también se definen en los estándares. En el caso del estándar 802.11b tenemos 11 canales de transmisión repartidos entre 2.402 GHz y 2.483 GHz, de los cuales solo tres no se superponen entre sí. En febrero de 2010 se modificó la nota de aplicación UN-85 del CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias) añadiendo los canales 12 y 13, el canal 14 sólo está permitido en Japón. En Europa se permiten los canales desde el 1 hasta el 13 ambos inclusive.

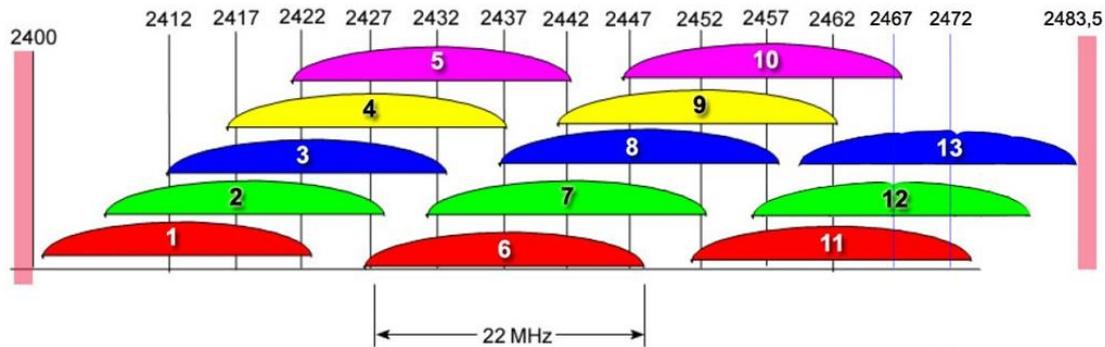


Figura 2-3. Distintos canales de los estándares 802.11b/g.³

Como podemos apreciar en la imagen adjunta, los canales están separados por 5 MHz y cada uno ocupa 22 MHz existiendo una clara superposición entre ellos. Para evitar la interferencia de los canales adyacentes hay que utilizar canales distanciados por otros cinco canales como mínimo, por ejemplo, los canales 1, 6 y 11.

A la hora de trabajar con Wifi no solo hay que tener en cuenta el solapamiento entre canales ya que existen distintos tipos de interferencia como lo pueden ser:

- Reflexiones: La señal recibida puede llegar directamente al receptor o a través de reflexiones. En un principio puede pensarse que la señal reflejada no tiene ningún efecto, no obstante, la reflexión provoca que la señal recorra una mayor distancia y por tanto llegue retrasada. Como resultado recibiremos una suma de varias señales completamente distinta de la señal original. Este efecto conocido como multipath es más común en los transmisores con patrones de radiación omnidireccionales, debido a que presentan una ganancia uniforme en todas direcciones. Una posible solución a este problema es el empleo de MIMO, implementado desde la norma 802.11n. MIMO dispone de varias antenas de recepción y transmisión lo cual permite aumentar el régimen binario del sistema y reducir la tasa de error. Otra opción sería emplear beamforming para conseguir que este efecto sea más improbable.
- Condiciones climáticas: Las ondas de radio son atenuadas por la lluvia y demás fenómenos, sin embargo, solo se ven afectadas las comunicaciones Wifi que se usan en exteriores. En interiores lo único que puede llegar a afectar a la comunicación es un sobre calentamiento del router, sobre todo en los meses de verano.
- Dispositivos electrónicos: Si trabajamos en la banda de 5 GHz no contamos con este tipo de interferencias al tratarse de una banda regulada. En el caso de 2.4 GHz existen múltiples dispositivos que pueden interferirnos como lo pueden ser electrodomésticos, teléfonos inalámbricos, entre otros. Para evitarlo es aconsejable colocar el transmisor a una altura elevada y lo más lejos posible de estos elementos.

2.3 Arquitectura y topologías de la red Wifi

³ Imagen tomada de <http://marismas-emtt.blogspot.com/2010/11/canales-80211.html>. Fecha de consulta: Octubre de 2021

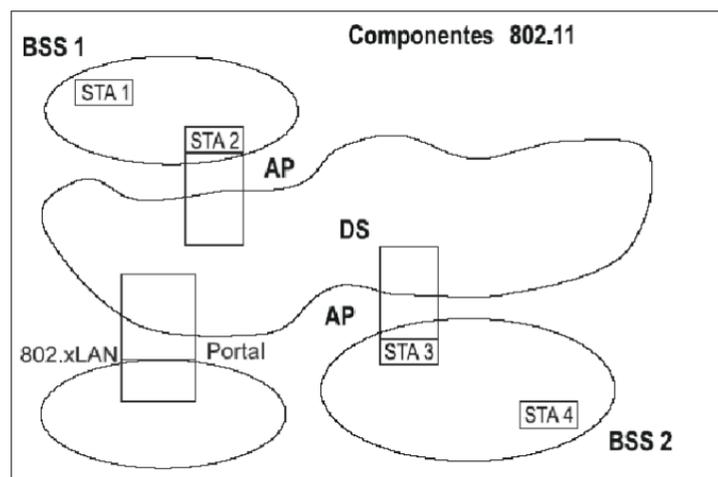


Figura 2-4. Arquitectura estándar 802.11.⁴

El elemento básico de cualquier red Wifi se conoce como celda BSS (Basis Service Set). Cada BSS está formado por estaciones fijas o móviles y dispone de un punto de acceso (AP). Este AP permite al BSS comunicarse con otros BSS haciendo uso a su vez del sistema de distribución (DS). Toda red Wifi está formada por los siguientes elementos:

- Estaciones: el principal funcionamiento de la red Wifi es que las distintas estaciones de cada BSS intercambien información entre sí. Estas estaciones pueden ser cualquier dispositivo que tengan la capacidad de interferir en el medio inalámbrico. Por lo general suelen ser algún tipo de computadoras provistas de interfaces de red inalámbricas, las cuales pueden ser portátiles o fijas. Los principales tipos son la tarjeta PCI, tarjeta PCMCIA y adaptador USB.
- Medio inalámbrico: el aire es el medio de transmisión que permite la comunicación entre las estaciones de los distintos BSS. La arquitectura del estándar 802.11 define varias capas físicas para una misma capa MAC. Tres de estas capas físicas emplean radiofrecuencia y otra infrarrojos.
- Sistema de distribución (DS): es el componente físico que permite la comunicación entre los AP de los BSS. El estándar 802.11 no concreta ninguna tecnología para el DS, por lo que podemos elegir la más adecuada según las necesidades de la red que estemos diseñando. Algunos de los más utilizados son el cableado tradicional mediante Ethernet o de forma inalámbrica, conocido como WDS (Wireless Distribution System). Si se elige emplear WDS el AP puede tener su funcionamiento estándar, actuar como puente con otro AP o bien realizar ambas funciones a la vez, siendo necesario en el cualquier caso que ambos equipos funcionen con WDS.
- Punto de acceso (AP): es un elemento esencial que se encarga de gobernar la BSS. Se encuentra definido dentro del estándar 802.11 en el apartado 5.2.1.1: “Un AP es una estación provista de acceso al sistema de distribución y capaz de proveer de los servicios del sistema de distribución, además de actuar como una estación”. Esta definición viene a decir que el AP es el transmisor y receptor de la señal transmitida, proporcionando cobertura a las estaciones. Además de permitir la comunicación entre todos los terminales inalámbricos actúa como puente de interconexión entre la red fija e Internet. Las funciones básicas de un AP son:
 - Portal, para interconectar la WLAN con otras redes de tipo LAN 802.x.

⁴ Imagen tomada de https://www.researchgate.net/figure/Figura-A1-Componentes-de-la-arquitectura-de-redes-IEEE-80211_fig15_31553016. Fecha de consulta: Octubre de 2021

- Puente hacia otros puntos de acceso.
- Router, para encaminar los datos dentro de la zona de cobertura.

Cada una de estas celdas BSS se puede comunicar con otras BSS de una forma determinada por la topología empleada. Convendrá emplear una topología u otra según las necesidades y prestaciones que necesite cumplir la red. Las topologías básicas definidas en el estándar son las siguientes:

- IBSS (Independent Basic Service Set): como su nombre indica se trata de una única celda BSS independiente, por lo que no hay DS y no puede comunicarse con otras redes.
- Modo Ad-Hoc: permite conectar los nodos directamente, sin emplear un AP. La red actúa como punto a punto, es decir, el equipo que coordina la transmisión se elige de forma aleatoria entre una de las estaciones. Al no tener un AP la comunicación es directa entre los nodos, consiguiendo aprovechar el canal al máximo. En esta topología todas las tramas son de difusión, por lo que es recibida por todos los nodos que se encuentren dentro del alcance del transmisor. Todos los equipos que empleen esta topología tienen una IP con un prefijo común y un equipo puede actuar como router para comunicar la red con otras redes, para ello el equipo que actúe como router debe tener una tarjeta de red.

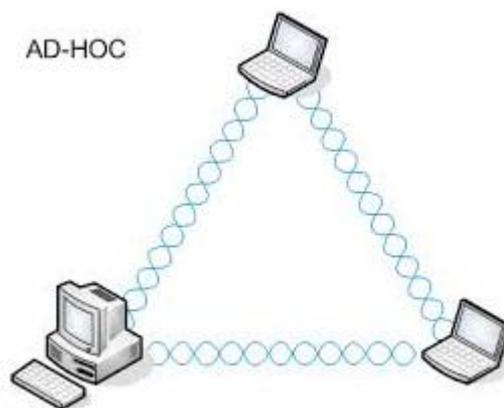
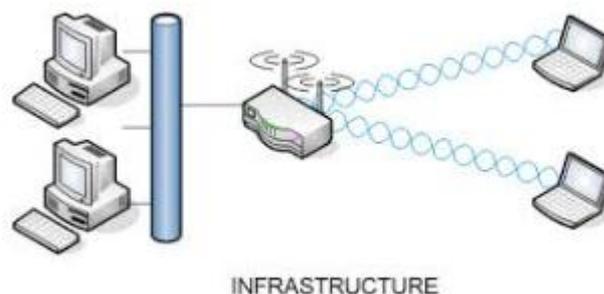


Figura 2-5. Modo Ad-Hoc con tres estaciones.⁵

- Modo infraestructura: emplea un AP para realizar las tareas de coordinación. Las estaciones no pueden comunicarse directamente entre sí, las tramas tienen que pasar por el AP para ser redirigidas a su destino. Esto provoca que el uso del canal sea más ineficiente que en el modo Ad-Hoc, a cambio tiene un mayor alcance, permite un mayor número de dispositivos y presenta menos interferencias.



⁵ Imagen tomada de <https://sobretodoredes.wordpress.com/redes-inalambricas/modos-de-operacion/modo-ad-hoc/>. Fecha de consulta: Octubre de 2021

2.4 Seguridad en las redes Wifi

La seguridad es un aspecto clave debido a la propia filosofía de Wifi. La información que viaja en las ondas de radio se propaga por el aire de forma que puede ser captada por algún cliente no deseado por lo que puede ser hackeada fácilmente.

Es por esto por lo que el router que utilizamos en casa o en cualquier edificio privado dispone de una clave, evitando el uso indebido de la red. Existen muchos métodos de encriptación y los primeros que salieron son los siguientes:

- WEP (Wired Equivalent Privacy): era el método estándar empleado en el 802.11. Cuando empezó a ser utilizado presentaba una baja seguridad y a pesar de las distintas revisiones seguía ofreciendo poca protección, por lo que acabó siendo retirado por la Wi-Fi Alliance en 2004. Uno de los principales fallos es la utilización de la misma clave de encriptación/desencriptación tanto para las tramas como para la autenticación, por lo que aumentar el tamaño de la clave de 64 a 128 bits no solucionaba el problema.
- WPA (Wi-Fi Protected Access): se creó para corregir los principales errores de WEP. El método de autenticación empleado era PSK (Pre Shared Key). Este se basaba en claves que debían ser introducidas manualmente, siendo necesario que la clave coincidiera con la del punto de acceso para poder comunicarse con el mismo. Esta PSK no es transmitida por el aire y solo sirve para activar el TKIP (Temporal Key Encryption Protocol), por lo que la mejora de seguridad es significativa con respecto WEP. Este TKIP fue el primer método de cifrado utilizado, más tarde sería sustituido por el protocolo AES (Advanced Encryption Standard). A pesar de las numerosas mejoras sigue presentando vulnerabilidades frente hackers.
- WPA2 (Wi-Fi Protected Access, version 2): es una evolución de WPA. Uno de los principales cambios es el empleo obligatorio de AES y la introducción de CCMP para sustituir a TKIP, no obstante, este se mantiene para poder comunicarse con dispositivos que utilicen WPA. La seguridad es mucho mayor que en su predecesora, pero sigue siendo posible evadir las medidas de control.

2.5 Conclusiones

El último apartado que estudiaremos sobre Wifi es probablemente el más importante para llevar a cabo la implementación de las HLWNets. Estas redes híbridas nacen con el objetivo de aprovechar las ventajas de las distintas tecnologías Wifi y Lifi, combinándolas para subsanar los posibles inconvenientes que tienen por separado. Es por esto por lo que resulta imprescindible comentar las distintas posibilidades ofrecidas por Wifi de forma general, con el objetivo de concretar en aplicaciones más específicas que veremos en los próximos capítulos.

Wifi permite conectarse a Internet de forma rápida y cómoda, pero lo más importante es que lo hace de forma inalámbrica. Esto permite que las comunicaciones se pueden realizar en movimiento sin necesidad de tener los dispositivos estáticos. Al emplear al aire como medio de transmisión evitamos el uso de cableado, lo cual supone un ahorro en costes, tiempo de instalación, simplicidad del sistema, movilidad, entre otras ventajas. Estas características son aplicables a comunicaciones entre varios usuarios, demostrando una vez más la versatilidad y movilidad de las redes Wifi.

⁶ Imagen tomada de <https://sobretodoredes.wordpress.com/redes-inalambricas/modos-de-operacion/modo-infraestructura/>. Fecha de consulta: Octubre de 2021

Como hemos comentado una de las principales ventajas que se nos ocurre al emplear Wifi es evitar el uso excesivo de redes cableadas, permitiendo un ahorro de costes. Pero una opción igual de útil sería la posibilidad de conectar entre si redes cableadas con redes Wifi, permitiendo extender el alcance a la red cableada en zonas donde esta no tenga cobertura.

Cabe recordar que Wifi esta regularizado por la familia de estándares 802.11, la cual estudiamos anteriormente. Esto tiene numerosas ventajas para los usuarios y compañías, ya que establece unas tecnologías e infraestructuras comunes, facilitando así la interoperabilidad.

Si nos ponemos a analizar las principales ventajas de esta tecnología llegaremos a la conclusión de que presenta un bajo coste frente a otras tecnologías, pero sobre todo lo más importante es la cobertura y movilidad que ofrece, sobre todo teniendo en cuenta la facilidad de instalar la red. Esto es un punto clave a la hora de realizar las HLWNets, hay que aprovechar al máximo la cobertura de Wifi y hacer que sus defectos se minimicen, aumentando así la eficiencia la red híbrida.

La cobertura de Wifi es una de sus mayores bazas y uno de los principales motivos de que su uso este tan extendido hoy en día, no obstante, presenta algunos defectos muy importantes.

Las ondas radio también pueden ser atenuadas por obstáculos y presentan una menor velocidad que las redes cableadas convencionales, aunque lo más perjudicial es la interferencia que producen las señales si no se usan las bandas adecuadamente. Es por este motivo por lo que es necesario el estándar 802.11, este tipo de tecnología necesita ser regulada para hacer viable las comunicaciones. A pesar de todo el espectro radioeléctrico libre es cada vez más escaso, por lo que el empleo de otras tecnologías de transmisión es esencial para solventar este problema en la medida de lo posible.

Por la propia naturaleza de la red de transmisión, la información está expuesta a usuarios no deseados los cuales reciben la señal, aunque intentemos evitarlo. Esto obliga a que el uso de medidas de seguridad sea obligatorio, tal y como explicamos en el apartado 2.4. Con esto reducimos las probabilidades de hackeo de la red, pero nunca son completamente infalibles.

En este apartado llevaremos a cabo un análisis de la tecnología Lifi con un enfoque similar al de Wifi, centrándonos en los aspectos más importantes y sin llegar a profundizar en aspectos más técnicos que se salen del tema de estudio que aborda este trabajo. De esta manera dispondremos de los conocimientos adecuados para llevar a cabo el estudio de las redes híbridas, lo cual veremos en detalle en los próximos apartados.



Figura 3-1. Logo de Lifi.⁷

El término Lifi proviene de light Fidelity (fidelidad a la luz). Esta tecnología relativamente reciente fue mencionada por primera vez por el profesor Universitario Harald Haas en una conferencia de TED en agosto de 2011. No obstante, algunas empresas registraron patentes de esta tecnología algunos años antes, una de estas fue Samsung la cual realizó 25 patentes entre 2007 y 2011. Harald Haas dio a conocer la nueva tecnología en la que estaba trabajando en 2011, a la vez que fundó la empresa PureLifi para iniciar su comercialización. En octubre del mismo año PureLifi se unió con otras organizaciones y formó el Consorcio Li-Fi, para promover el desarrollo y la distribución de tecnologías ópticas inalámbricas.

Esta tecnología emplea un sistema de transmisión de datos mediante luz visible o VLC (Visible Light Communication) en vez de usar ondas radio como hace Wifi. El principio de funcionamiento de esta tecnología se basa en alterar la frecuencia de la luz visible entre los 400 y 800 THz. De esta forma los transmisores son capaces de emitir la información con estos cambios de frecuencia, todo esto a una velocidad tal que resulta imperceptible por el ojo humano, permitiendo así aprovechar otras fuentes de luz. Para transmitir se emplean diodos LED, de manera que al estar encendido se transmite un uno lógico y al estar apagado un cero lógico. El LED se enciende o apaga gracias a un codificador conectado a Internet, el cual transforma los pulsos eléctricos en pulsos de luz. Estos pulsos luminosos son captados por un fotorreceptor el cual interpreta la información transmitida, tratando de situarlo en una zona lo más iluminada posible para aumentar su efectividad.

3.1 Estándar 802.15.7

Las distintas tecnologías VLC se encuentran definidas por el estándar IEEE 802.15.7. Este estándar está destinado a redes de área personal de luz visible (VPAN), grupo al que pertenecen las tecnologías Lifi. El

⁷ Imagen tomada de <https://es.wikipedia.org/wiki/Lifi>. Fecha de consulta: Octubre de 2021

estándar define todo lo que hay que tener en cuenta a la hora de implementar una red Lifi. La topología de la red varía entre punto a punto, estrella y punto a multipunto o difusión.

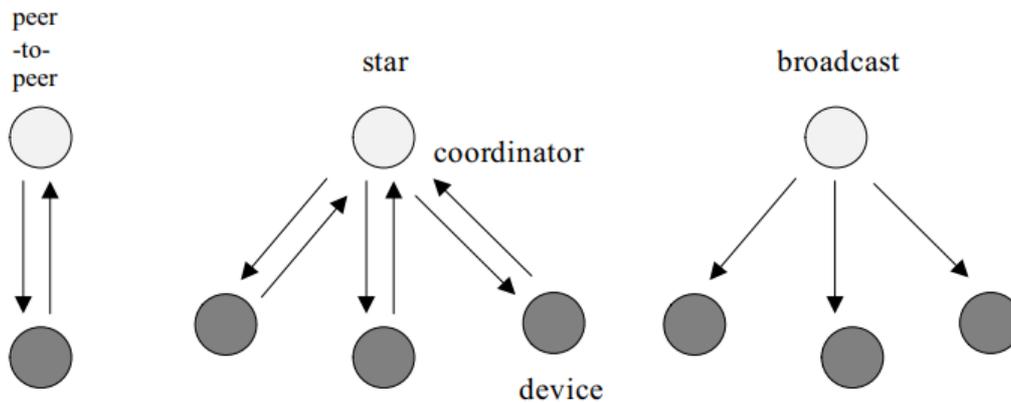


Figura 3-2. Topologías del estándar 802.15.7. ⁸

En la topología punto a punto cada dispositivo puede comunicarse con cualquier otro que se encuentre dentro de su área de cobertura. Uno de los dos extremos actúa como coordinador, el cual es designado como tal al ser el primero en transmitir.

Los nodos de la topología en estrella operan de forma independiente. Solo se comunican con el nodo que actúa como coordinador. Esto se consigue definiendo varias VPAN independientes, las cuales actúan como topologías punto a punto.

Como su nombre indica, al emplear topología de difusión uno de los nodos emite la información al resto de nodos sin formar una red como tal. En esta topología no es necesario emplear direcciones de destino, no obstante, la comunicación es unidireccional.

En el estándar también encontramos que la arquitectura se encuentra definida por capas, permitiendo así simplificar el problema. Cada una de estas capas se encarga de una parte del estándar, además de ofrecer servicios a las capas superiores. Los dispositivos de las redes VPAN están formados por una capa física (PHY), la cual contiene el transceptor (transmisor + receptor) de luz junto con un control de acceso de bajo nivel, además de una subcapa de control de acceso al medio (MAC) que da acceso al canal físico para llevar a cabo todo tipo de transmisiones. En la siguiente figura podemos ver las capas que componen la arquitectura y como se relacionan entre ellas.

⁸Imagen tomada de <https://ieeexploreieeeorg.us.debiblio.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6016195>. Fecha de consulta: Noviembre de 2021

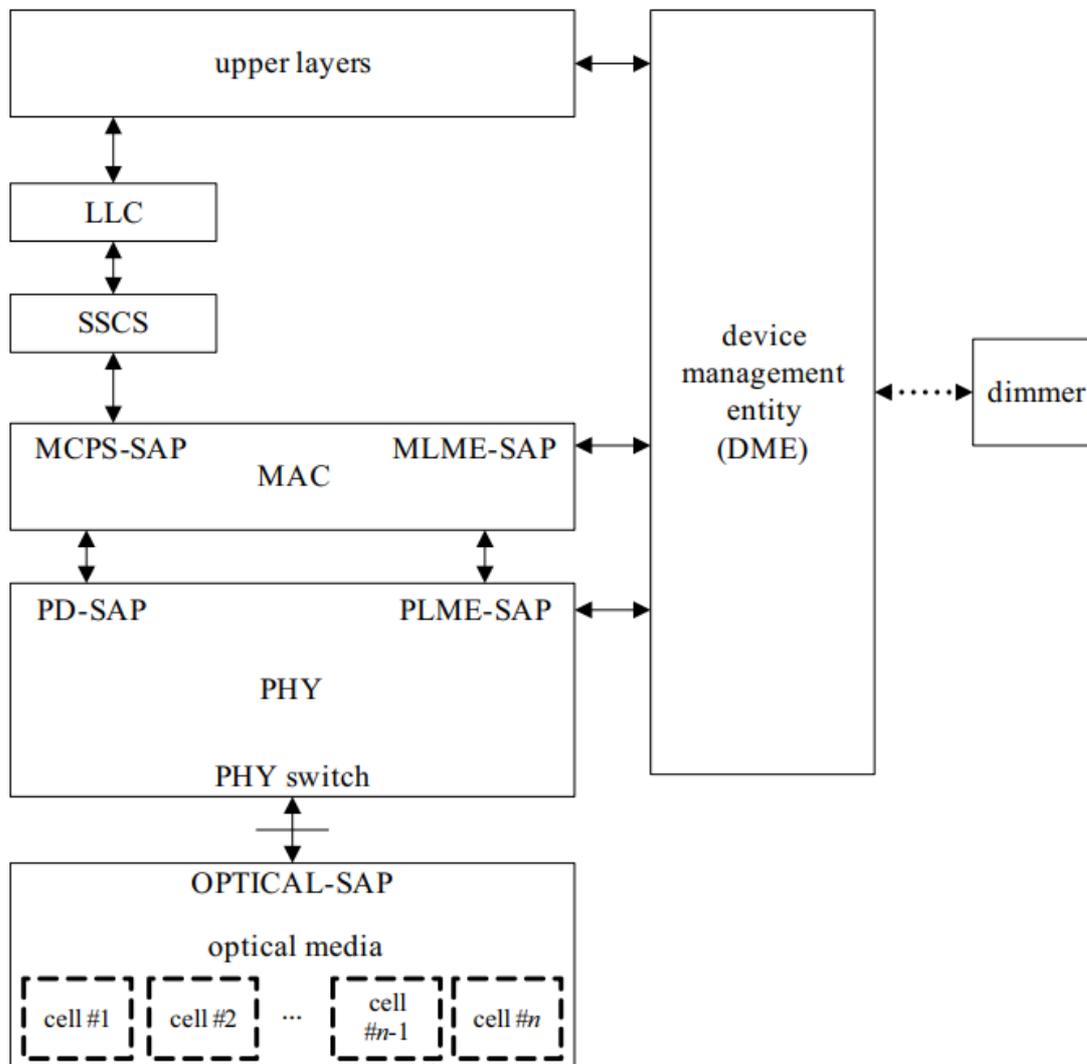


Figura 3-3. Arquitectura de un dispositivo de una red VPAN.⁹

Las capas superiores (upper layers) que vemos en la figura se corresponden con una capa de red que permite realizar la configuración de la red, manipularla y encaminar el mensaje, la otra capa es la de aplicación, encargada de llevar a cabo el funcionamiento deseado del dispositivo. Justo debajo encontramos la capa de control de enlace lógico (LLC), la cual accede a la capa de control de acceso al medio (MAC) a través de la subcapa de convergencia específica de servicio (SSCS).

La arquitectura también soporta una entidad de administración de dispositivos (DME), permitiendo así comunicarse con la entidad de manejo de la capa MAC (MLME) y de la capa PHY (MLME) para regular la luminosidad del dispositivo. El DME también puede cambiar otros parámetros de la capa PHY tales como las fuentes ópticas o los fotodetectores.

3.2 Principio de funcionamiento de Li-Fi

Aunque no lo parezca Li-Fi y Wifi son bastante similares, ya que ambos transmiten datos de forma electromagnética. En el caso de Wifi a través de ondas de radio y en Li-Fi empleando pulsos luminosos de luz visible.

El funcionamiento de Li-Fi es sencillo comparado con los complejos protocolos de seguridad y encriptado que emplea Wifi. En un extremo de la conexión tendremos una fuente de luz, normalmente un LED, mientras que en el extremo contrario tenemos un sensor de luz implementado mediante un fotodetector. Estas bombillas

⁹ Imagen tomada de <https://ieeexploreieeeorg.us.debiblio.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6016195>. Fecha de consulta: Noviembre de 2021

LED blancas funcionan aplicando una corriente continua, la cual nos permite transmitir información a gran velocidad cuando aplicamos pequeñas variaciones al valor de dicha corriente. Para poder transmitir necesitamos varios LED y un controlador que codifique los datos en dichos LED, mientras que para recibir empleamos un fotodiodo como receptor. Estas pequeñas variaciones de corriente provocan pulsos luminosos imperceptibles para el ojo humano, sin presentar problema o molestia alguna para la visión.

Como vemos el principio en el que se basa esta tecnología es muy simple. Si el LED está encendido, el fotodetector registra un uno binario y en caso contrario un cero binario. Si hacemos parpadear al LED varias veces lograremos transmitir un mensaje.

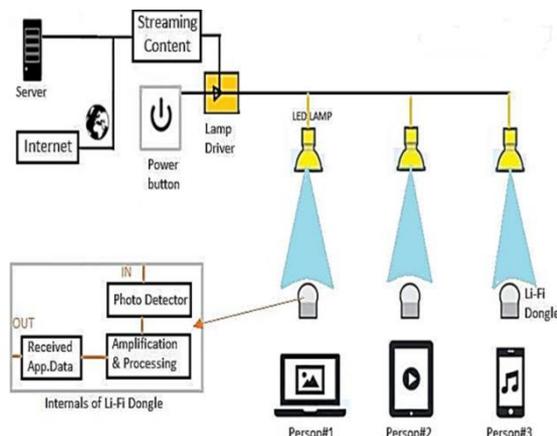


Figura 3-4. Ejemplo de red Lifi. ¹⁰

Si el LED cambia los datos a un ritmo lento, se instalan en la bombilla millones de LED con un tamaño del orden de micrómetros (μm). Al reducir el tamaño de los LED no disminuye la capacidad de conmutación de datos, sino al contrario aumenta la eficiencia de la bombilla para transmitir los datos a una mayor velocidad. Al presentar un tamaño tan pequeño estos micro-LED son básicamente píxeles, aún más pequeños que los de teléfonos inteligentes de última generación.

3.3 Componentes

En el apartado anterior ya introdujimos algunos de los elementos básicos de las redes Lifi, como lo son el LED o el fotodiodo. En este apartado se detallarán dichos componentes y otros no definidos previamente.

El diodo emisor de luz (LED) es un dispositivo semiconductor que emite luz cuando pasa una corriente eléctrica a través de él. La luz emitida se produce cuando las partículas que transporta la corriente (conocidas como electrones y huecos) se combinan dentro del material semiconductor. Antiguamente los LED producían luz roja, pero hoy en día los distintos avances en la tecnología LED permiten crear luz verde, azul e incluso blanca.

¹⁰ Imagen tomada de <http://pubs.sciepub.com/jcn/4/1/3/index.html>. Fecha de consulta: Noviembre de 2021



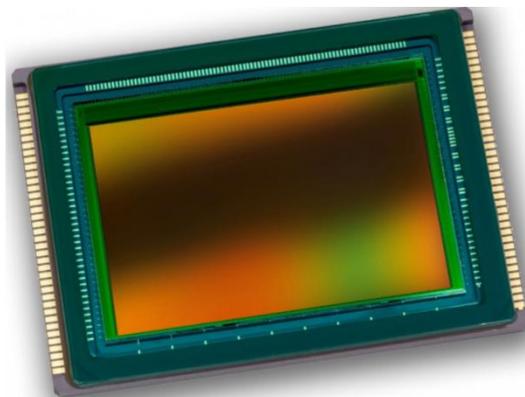
Figura 3-5. Algunos ejemplos de LED.¹¹

Otro componente esencial definido anteriormente es el fotodiodo, esencial en la recepción de luz. Un fotodiodo es un dispositivo que ayuda en la conversión de la luz en corriente eléctrica. Está hecho de material semiconductor y contiene una unión pn, además está diseñado para funcionar en polarización inversa. La corriente se propaga en el fotodiodo cuando se absorben los fotones y también se propaga una cantidad ínfima de corriente en ausencia de luz. Esta tecnología ha triunfado y se emplea ampliamente debido a su estructura resistente y de bajo costo. Los fotodiodos tienen dos modos de funcionamiento distinguidos, en primer lugar, presenta el modo fotovoltaico y, en segundo lugar, el modo fotoconductor.



Figura 3-6. Fotodiodo InGaAs.¹²

Los fotodiodos pueden combinarse formando el elemento conocido como sensor de imagen. Un sensor de imagen es un dispositivo electrónico fotosensible que transforma una imagen óptica en una señal electrónica. Están compuestos por millones de fotodiodos y se utilizan como receptores de imágenes en equipos de imágenes digitales. Un sensor de imagen es capaz de reaccionar al impacto de los fotones, convirtiéndolos así en una corriente eléctrica que luego pasa a un convertidor analógico-digital. En este momento, los sensores de imagen más comunes son los sensores de píxeles activos de dispositivos digitales de carga acoplada (CCD) o semiconductores de óxido metálico complementarios (CMOS).



¹¹ Imagen tomada de <https://uelectronics.com/producto/led-5mm-difuso-rojo-amarillo-verde-azul-blanco/>. Fecha de consulta: Noviembre de 2021

¹² Imagen tomada de <https://www.directindustry.es/prod/hamamatsu/product-13622-1078369.html>. Fecha de consulta: Noviembre de 2021

3.4 Modulaciones Lifi

Algunas modulaciones típicamente utilizadas en las comunicaciones de RF se pueden aplicar también en Lifi, teniendo en cuenta las modificaciones necesarias. Como se explica en la introducción de este capítulo, Lifi basa su funcionamiento en la comunicación de luz visible (VLC) y utiliza técnicas de comunicación inalámbrica óptica (OWC). En OWC se usa O-OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal óptica) y al tratarse de una comunicación óptica VLC solo se puede emplear OFDM de modulación en intensidad y detección directa (IM/DD-OFDM). Esto significa que la señal de modulación tiene que ser tanto unipolar (solo admite una polarización) como de valor puro (la señal OFDM debe ser real, ya que toda la información se encuentra en el nivel de potencia). En los sistemas que emplean modulación IM/DD se modula directamente la señal a través de la corriente que se les aplica a los diodos láser.

Uno de los tipos de modulación directa empleados es OOK (On-Off Keying), utilizado en sistemas digitales monoportadora (SCM). Cuando al diodo láser se le inyecta una corriente superior a su corriente umbral, emite radiación que se considera como si se enviara un bit “1”. Por el contrario, si es menor que la potencia umbral, no se emite radiación y se considera que se está enviando un bit “0”.

Cuando es necesario tener comunicaciones ópticas inalámbricas de alta velocidad se utilizan modulaciones multiportadora (MCM). MCM hace un uso más eficiente del ancho de banda, pero presenta una menor eficiencia energética comparado con SCM. Una de las formas más comunes de implementar MCM en las redes Lifi es a través de OFDM, como se comentaba al principio del apartado. Para conseguir el requerimiento de IM/DD impuesto por los LED disponibles en el mercado hay que cambiar las técnicas OFDM convencionales. OFDM óptico recortado asimétricamente (ACO-OFDM) es un tipo de OFDM óptico en el que, imponiendo simetría hermitica, sólo las subportadoras impares son usadas para transmitir datos y las pares se ponen a cero. Todo esto es a cambio de reducir la eficiencia espectral a la mitad. Otras soluciones son OFDM óptico polarizado DC (DCO-OFDM), OFDM óptico de polarización inversa (RPO-OFDM), etc.

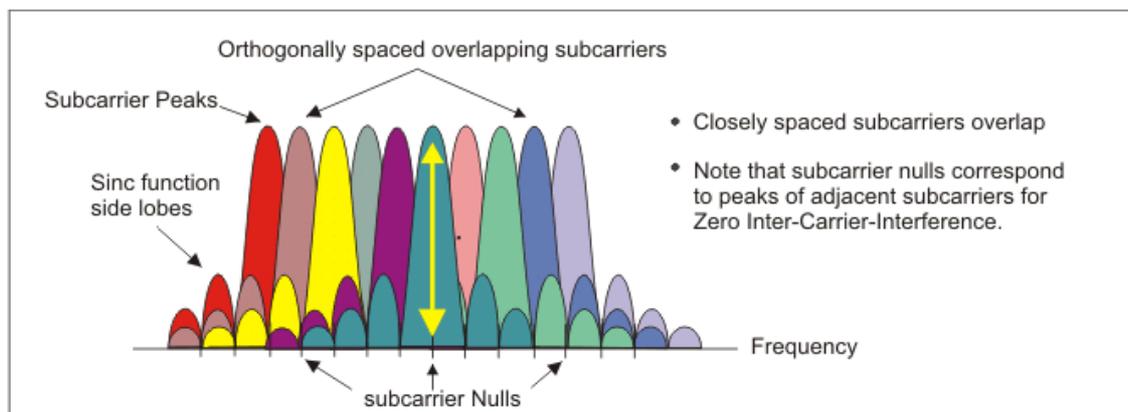


Figura 3-8. Ejemplo de señal OFDM.¹⁴

Las modulaciones previamente explicadas están pensadas para VLC, pero no están específicamente diseñadas para Lifi. Esto se debe a que los transmisores Lifi no están pensados solo para comunicaciones inalámbricas, sino también para iluminación.

Al combinar LED de distintos colores se dispone de un amplio abanico de modular y detectar las señales en los sistemas Lifi. Esta técnica es conocida como CSK (Color Shift Keying) se encuentra definida en el estándar 802.15.7. En CSK las señales se encuentran codificadas por colores de distintas intensidades emitidos por LED RGB.

¹³ Imagen tomada de <http://www.topfotografia.net/Fotografia/teoria-de-la-fotografia/sensor-cmos/sensor-cmos.html>. Fecha de consulta: Noviembre de 2021

¹⁴ Imagen tomada de https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicsprinciplesoverview.htm. Fecha de consulta: Noviembre de 2021

3.5 Aplicaciones de la tecnología Lifi

Lifi puede usarse en aplicaciones de una amplia variedad de campos. En particular es apropiado para aplicaciones populares que consumen contenido de Internet, como descargas de video y audio o transmisión en directo. Esto se debe a que estas aplicaciones imponen grandes demandas en el ancho de banda del enlace descendente, pero necesitan una capacidad mínima de enlace ascendente.

La cantidad de aplicaciones es inmensa. Podemos aprovechar la iluminación privada o pública, incluidas las farolas, para implementar puntos de acceso Lifi a la vez que utilizamos la misma infraestructura de comunicaciones y sensores para monitorizar y controlar la iluminación y los datos, en definitiva, se crea un sistema de iluminación inteligente.

De igual forma los teléfonos inteligentes, tablets, portátiles y otros dispositivos móviles pueden interconectarse directamente usando Lifi. Los enlaces tienen la limitación de ser de corto alcance, pero a cambio proporcionan velocidades de datos y seguridad elevados.

El uso de Lifi supone un alivio del espectro de RF. Las demandas de capacidad adicional de las redes celulares pueden ser solventadas por redes Lifi. Esto es especialmente útil en el enlace descendente donde tienden a producirse cuellos de botella.

Al contar con una alta velocidad y gran ancho de banda se mejora la velocidad de acceso a Internet. En consecuencia, las instituciones y organizaciones educativas pueden utilizar esta tecnología para sacar mayor partido a videoconferencias, descargas de tutoriales digitales y aprendizaje en línea, entre otros recursos educativos.

La naturaleza de Lifi implica la ausencia de emisiones electromagnéticas, por lo que se puede sacar provecho en aplicaciones en las que Wifi suponía un riesgo. Un ejemplo son los Hospitales en los que al emplear Lifi no se interfiere con los instrumentos médicos ni con los escáneres de resonancia magnética. Del mismo modo se puede implementar en aviación, no solo para evitar las interferencias, sino también para reducir el peso y el cableado, así como implementar sistemas de entretenimiento compatibles con los móviles de los pasajeros. Otro ejemplo sería la comunicación submarina, donde debido a la fuerte absorción de señal y el efecto en la vida marina el uso de RF no es adecuado. Lifi proporciona una solución para comunicaciones de corto alcance.

Estos son solo algunos de los muchos ejemplos de aplicaciones Lifi. A pesar del gran desarrollo e investigaciones que se han realizado en los últimos años el potencial que presenta esta tecnología sigue siendo muy alto. Es una tecnología relativamente reciente y en los próximos años se encontrarán aplicaciones que resultaban impensables. Sin ir más lejos este año 2021 los científicos de Caltech han utilizado un material especializado para poder controlar la luz con mayor precisión que nunca.

La tecnología en cuestión, presentada en la revista Science, consiste en un material creado con tres capas de átomos de fósforo, el cual permite polarizar la luz y en consecuencia sintonizarla. La estructura cristalina hace que el fósforo negro tenga propiedades ópticas significativamente anisotrópicas. En un material como el grafeno, la luz se absorbe y se refleja por igual sin importar el ángulo en el que esté polarizada. El fósforo negro es muy diferente en el sentido de que, si la polarización de la luz se alinea a lo largo de las arrugas, tiene una respuesta muy diferente a la de está alineado perpendicularmente a estas.

Sin embargo, muchos materiales pueden polarizar la luz y esa capacidad por sí sola no es especialmente útil. Lo que hace especial al fósforo negro, dice el profesor Atwater, es que también es un semiconductor, un material que conduce la electricidad mejor que un aislante, como el vidrio, pero no tan bien como un metal como el cobre. El silicio es uno de los conductores más utilizados para controlar el flujo de electricidad en un microchip y del mismo modo las estructuras construidas con fósforo negro pueden controlar la polarización de la luz cuando se les aplica una señal eléctrica.

3.6 Comparativa de Lifi y Wifi

La mejor forma de entender las diferencias entre ambas tecnologías es a través de una tabla comparativa.

Características	Li-Fi	Wi-fi
Nombre completo	Light Fidelity o fidelidad a la luz.	Wireless Fidelity o fidelidad inalámbrica.
Transmisión	Transmite datos a través de luz con la ayuda de bombillas LED.	Transmite datos a través de ondas radio con la ayuda de un router Wifi.
Interferencias	No presenta interferencias de otros sistemas Lifi, pero un obstáculo entre emisor y receptor provoca pérdidas enormes.	Los routers cercanos interfieren con la señal deseada.
Tecnología	Los dispositivos se basan en los estándares de IrDA (Asociación de datos infra rojos)	Los dispositivos se basan en los estándares WLAN 802.11a/b/g/n/ac/ad, entre otros.
Aplicaciones	Uso en aerolíneas, hospitales, oficinas y hogares para navegar por Internet.	Uso para navegar por internet gracias a puntos de acceso.
Densidad de datos	La interferencia es un problema menor, puede usarse a través de agua salada y funcionar en una región densa.	La interferencia es un gran problema, funciona en zonas de menor densidad.
Privacidad	La luz es bloqueada por las paredes por lo que las transmisiones son más seguras.	Las señales de RF pueden atravesar los muros por lo que son necesarias técnicas más avanzadas de seguridad.
Velocidad de transmisión	Cerca de 1 Gbps.	WLAN ofrece 150 Mbps, para alcanzar 1-2 Gbps es necesario emplear WiGig.
Frecuencia de operación	10 veces superior al espectro radio.	2.4 GHz, 4.9 GHz y 5 GHz.
Distancia de cobertura	Alrededor de 10 metros.	Alrededor de 100 metros, pero varía mucho según el estándar, antenas empleadas, etc.
Componentes del sistema	Circuito de alimentación, bombilla LED y un fotodetector. Con estos elementos tenemos un sistema Lifi completo.	Requiere de múltiples componentes, entre ellos los routers y los usuarios (ordenadores, impresoras).
Consumo de potencia	Medio	Medio

Precio	Bajo	Medio
Concepto de funcionamiento	Servicio directo de datos binarios.	Se emplean distintas topologías.

Analizando la tabla comparativa podemos afirmar que ambas tecnologías presentan un comportamiento en cierta parte complementario. Lifi presenta pocas interferencias al emplear pulsos luminosos frente a las grandes interferencias de Wifi, resultado de emplear RF. Esta ventaja de Lifi sobre Wifi implica un bajo alcance en las redes Lifi debido a la gran atenuación que sufre la luz y la incapacidad de hacer frente a los obstáculos, comportamiento completamente opuesto a las ondas radio, que presentan un patrón de radiación más flexible y con mayor alcance.

3.7 Conclusiones

En un principio se podría pensar en Lifi como un posible sustituto de Wifi en un futuro cercano, pero este no es el planteamiento que se busca conseguir para Lifi. Ambas tecnologías se desempeñan correctamente en sus respectivos campos de aplicación sin tener la necesidad de opacarse entre sí.

Una opción más viable es combinar ambas tecnologías para sacarles el máximo partido. Lifi ofrece comunicaciones con una gran seguridad y elevados regímenes binarios, todo esto proporcionando un alivio al saturado espectro radioeléctrico. Por su parte Wifi posee una cobertura oblicua y flexible que se adapta a los obstáculos con diferentes técnicas como el mencionado beamforming o MIMO.

En esta idea se basan las redes híbridas que se explicarán en detalle en los próximos apartados, con el objetivo de conocer las distintas posibilidades que nos ofrecen y los problemas que buscan resolver las HLWNets.

HLWNets

Para hacer frente al número cada vez mayor de dispositivos móviles y su creciente demanda de servicios de Internet, se prevé la convergencia de redes para integrar diferentes dominios tecnológicos. Para las comunicaciones inalámbricas en interiores, un enfoque prometedor es coordinar la fidelidad a la luz (LiFi) y la fidelidad inalámbrica (WiFi), obteniendo así las redes híbridas LiFi y WiFi (HLWNets). Esta red híbrida combina la transmisión de datos de alta velocidad de LiFi y la cobertura ubicua de WiFi. En este capítulo conoceremos aspectos fundamentales de HLWNets comenzando con arquitecturas de red, implementaciones de celdas, esquema de modulación y acceso múltiple, requisitos de iluminación y backhaul. Posteriormente revisaremos el rendimiento y los logros recientes para demostrar la superioridad de HLWNets frente a las redes independientes. También analizaremos los desafíos que deben enfrentar este tipo de redes, los cuales se desarrollan en temas de investigación como el modelado del comportamiento del usuario, la gestión de interferencias, el traspaso y el equilibrio de carga. Además, veremos el potencial de HLWNets en algunas áreas de aplicación, como el posicionamiento en interiores y la seguridad en la capa física. Finalmente, se discutirán los desafíos e investigaciones futuras.

4.1 Introducción

Las últimas publicaciones de Cisco Systems predicen que para 2022, el tráfico de datos móviles representará el 71% del tráfico del protocolo de Internet y más del 80% del tráfico de datos móviles se producirá en interiores. Esto impulsa a las tecnologías de comunicación inalámbrica de corto alcance, como WiFi, a convertirse en un componente clave en la quinta generación (5G) y en futuras generaciones. Debido al espectro de radiofrecuencia limitado (RF), el denso despliegue de puntos de acceso WiFi dará como resultado una intensa competencia por los canales disponibles [1].

Para hacer frente a la escasez de espectro que se avecina en RF, las tecnologías de comunicación inalámbrica que emplean frecuencias extremadamente altas han atraído una atención significativa. Entre estas tecnologías se encuentra LiFi. Usando ondas de luz como portadoras de señales, esta tecnología relativamente nueva es capaz de explotar el vasto espectro óptico, casi 300 THz. Los puntos de acceso (AP) LiFi se pueden integrar en la infraestructura de iluminación existente, realizando un sistema de doble propósito que proporciona iluminación y comunicación al mismo tiempo. Investigaciones recientes demuestran que con un solo diodo emisor de luz (LED), LiFi es capaz de alcanzar velocidades máximas de datos superiores a 10 Gbps. LiFi ofrece muchas otras ventajas sobre su contraparte de RF, que incluyen un espectro óptico sin licencia, la capacidad de ser utilizado en áreas restringidas por RF como hospitales y bajo el agua, la capacidad de proporcionar comunicaciones inalámbricas seguras, ya que cubre un rango relativamente corto, generalmente unos pocos metros con un solo AP y es susceptible de pérdida de conectividad debido a obstrucciones [1].

Combinando la transmisión de datos de alta velocidad de LiFi y la cobertura ubicua de WiFi, el concepto de red híbrida LiFi y WiFi (HLWNet) fue mencionado por primera vez por Rahaim et al. En 2011. Poco después, Stefan y Haas ampliaron la investigación a la integración de LiFi y femtocélulas. Se ha demostrado que estas redes híbridas logran un mejor rendimiento de red que un sistema LiFi o RF autónomo.

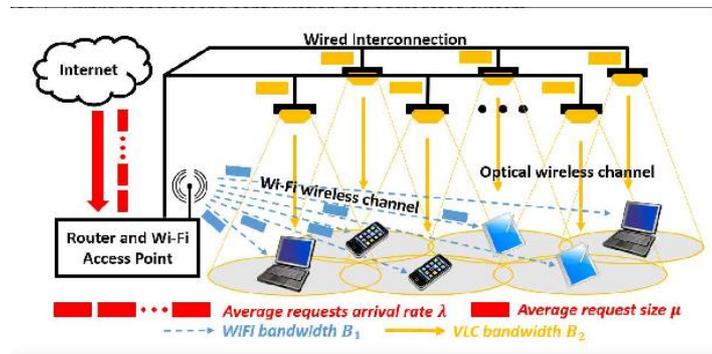


Figura 4-1. Ejemplo de HLWNet. ¹⁵

4.2 Marco de diseño de sistemas

En este apartado, se presenta un marco de HLWNets en cinco aspectos: arquitecturas de red, implementación de celdas, esquemas de modulación y acceso múltiple, requisitos de iluminación y backhaul. Todo esto con el objetivo de proporcionar pautas a la hora de diseñar sistemas HLWNets.

Arquitecturas de red

En general, LiFi se puede incorporar al sistema WiFi existente de dos formas básicas: autónoma y centralizada. El primer enfoque consiste en extender la estructura de red autónoma actual de WiFi a LiFi. El usuario puede elegir libremente un AP de cualquier dominio de red y el AP puede emplear cualquier canal libre. Si bien este enfoque ofrece una baja complejidad de la gestión de la red, el rendimiento de la misma no se ve comprometido. Alternativamente, es posible administrar los AP LiFi y WiFi que pertenecen al mismo propietario a través de una unidad de control central. Se puede lograr un enrutamiento y una asignación de recursos óptimos a nivel de red. Esta arquitectura se basa en SDN (redes definidas por software), que desacopla el plano de control del plano de datos de los dispositivos de reenvío. Un conmutador habilitado para SDN conecta los puntos de acceso de LiFi y WiFi y extrae la información clave del indicador de rendimiento de estos puntos de acceso a través de agentes de SDN. Posteriormente, esta información se envía a un controlador SDN, que toma decisiones sobre el enrutamiento de cada paquete de datos entrante. Actualmente el desarrollo experimental de HLWNets apenas ha comenzado.

Despliegue de células

Mientras que los puntos de acceso WiFi pueden alcanzar hasta 50 m en interiores, los puntos de acceso LiFi suelen cubrir un área relativamente pequeña, de solo unos pocos metros de diámetro. Una ubicación adecuada de los AP LiFi es integrarlos en las lámparas de techo, consiguiendo así un rendimiento de red de alta calidad. En la práctica, el despliegue de la celda está sujeto a limitaciones medioambientales, por ejemplo, las formas de las habitaciones. En la actualidad se suelen considerar tres modelos de despliegue de células: hexágono, matriz y proceso de punto de Poisson (PPP).

El despliegue hexagonal es una estructura ideal de redes celulares. Se ha demostrado que proporciona la mayor probabilidad de cobertura de relación señal/interferencia más ruido (SINR) en LiFi. Aunque no es común encontrar una estructura de lámparas de este tipo en la vida diaria, el despliegue de hexagonal ofrece un análisis superior de rendimiento.

El despliegue matricial de lámparas se usa ampliamente debido a la simplicidad de instalación. Esta

¹⁵Imagen tomada de <https://www.semanticscholar.org/paper/Delay-Analysis-of-Hybrid-WiFi-LiFi-System-Shao-Khreisshah/f5f206e8d4c71ac1197eae0e203d5436cdc39ec9>. Fecha de consulta: Noviembre de 2021

implementación se considera en la mayoría de los estudios relacionados con HLWNets. Es capaz de obtener una probabilidad de cobertura SINR muy cercana al despliegue hexagonal.

La implementación de PPP se emplea para simular AP ubicados aleatoriamente. Sin embargo, es difícil lograr una iluminación uniforme con este despliegue. Sin embargo, es difícil lograr una iluminación uniforme con este despliegue. Además, el PPP ofrece la peor probabilidad de cobertura SINR de los tres despliegues, por lo que no se ve como una opción muy atractiva.

Dada una topología de implementación, la distancia entre los puntos de acceso representa una compensación entre la tasa de transferencia y la probabilidad de cobertura. El impacto de la separación entre los distintos AP ha sido estudiado para el despliegue matricial y hexagonal, teniendo en cuenta para ello la separación óptima en función de la sobrecarga de traspaso y la velocidad promedio de los usuarios. Se llegó a la conclusión de que una separación de 3 metros es óptima en la mayoría de los escenarios. Para ello se utilizó el método de proyección de gradiente para encontrar la ubicación óptima de los AP. Para ambas implementaciones, la ubicación óptima de los AP se encuentra ligeramente desplazada respecto de la ubicación habitual y teniendo en cuenta que podemos mejorar el rendimiento del sistema hasta en un 70% resulta imprescindible encontrar la ubicación óptima. Otro parámetro a tener en cuenta a la hora de calcular la ubicación óptima es la ubicación de los AP WiFi, ya que influyen negativamente en el rendimiento. Si distribuimos adecuadamente los AP WiFi podemos aumentar el rendimiento del sistema hasta en un 20%.

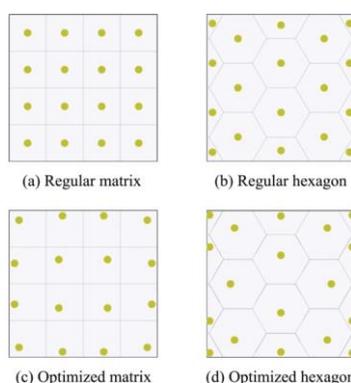


Figura 4-2. Ubicaciones optimizadas de AP LiFi.¹⁶

Esquemas de modulación y acceso múltiple

En los estándares actuales de LiFi se emplea acceso múltiple por detección de portadora/prevenición de colisiones (CSMA/CA) y el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA). Al permitir que solo un enlace esté activo a la vez, CSMA/CA puede reducir la interferencia entre celdas (ICI) a un nivel insignificante. Sin embargo, el proceso de acceso para los usuarios es aleatorio y no siempre justo, especialmente en implementaciones densas. Además, a diferencia de WiFi que usa dúplex por división de tiempo, LiFi generalmente adopta luz visible para enlace descendente e infrarroja para el enlace ascendente. Esto podría causar colisiones abrumadoras cuando se utiliza CSMA/CA en LiFi. Una posible solución sería emitir un tono de canal ocupado, lo que puede reducir en gran medida la probabilidad de colisión. En comparación con CSMA/CA, TDMA es superior en términos de consumo energético y utilización del ancho de banda, pero se basa en la sincronización y la gestión de interferencias. El acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDM) y el acceso múltiple no ortogonal (NOMA) también se han estudiado extensamente para LiFi. Estos esquemas llevan a cabo una estrecha coordinación de la asignación de recursos en toda la red y, por lo tanto, requieren una complejidad del sistema relativamente alta. En OFDM, los bloques de recursos de tiempo-frecuencia se asignan entre los usuarios para permitir para permitir transmisiones simultáneas. En NOMA, los usuarios agrupados son atendidos al mismo tiempo y con la misma frecuencia, pero a diferentes niveles de potencia dependiendo de la condición del canal. La ganancia de rendimiento de NOMA sobre OFDMA aumenta cuando la diferencia en las condiciones del canal es grande. Estudios posteriores encontraron que el semi ángulo de LED también tiene un impacto significativo en el rendimiento de NOMA en LiFi. Está comprobado que la ganancia de rendimiento de NOMA sobre el acceso múltiple ortogonal se puede aumentar aún más emparejando usuarios con condiciones de canal distintas.

¹⁶ Imagen tomada de <https://ieeexplore-ieee-org.us.debiblio.com/document/9351549>. Fecha de consulta: Noviembre de 2021

Con respecto a la modulación, IEEE 802.15.7 adopta modulación de posición de pulso variable (VPM) y codificación de encendido y apagado (OOK) en las capas físicas PHY I y II, y modulación por cambio de color (CSK) en PHY III. Como esquemas de modulación de portadora única, OOK y VPM tienen una complejidad relativamente baja y pueden admitir velocidades de datos bajas/medias de 10 Kbps a 100 Mbps. CSK es similar a la manipulación por desplazamiento de frecuencia, pero utiliza múltiples fuentes ópticas con diferentes longitudes de onda. Este método de modulación está especialmente diseñado para LiFi, lo que permite que PHY III funcione entre 12 y 96 Mbps. Las tres técnicas de modulación anteriores se pueden utilizar directamente para LiFi, ya que se ajustan a las señales ópticas reales y no negativas. Por el contrario, la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) produce señales complejas y bipolares. Las señales OFDM reales se pueden construir restringiendo el vector de entrada de la transformada rápida inversa de Fourier para que tenga simetría hermítica. Este proceso se denomina OFDM óptico (O-OFDM). La ITU está considerando ahora dos formas de O-OFDM: OFDM óptico polarizado de corriente continua (DCO-OFDM) y OFDM óptico recortado asimétricamente (ACO-OFDM). En DCO-OFDM, las señales se hacen positivas agregando un sesgo de corriente continua. En ACO-OFDM, las señales se recortan a cero y solo se transmiten las partes positivas. ACO-OFDM es más eficiente energéticamente que DCO-OFDM, excepto para constelaciones grandes como la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) de 1024 símbolos. Con respecto al estándar 802.11b este presenta dos propuestas principales para la capa PHY: cambiar la frecuencia central de las señales de salida de chipsets IEEE 802.11 existentes, o usar la capa PHY de G.vlc. La ventaja clave de usar la capa PHY existente es que requiere la menor cantidad de cambios necesarios en el silicio empleado por WiFi. La esperanza es que esto reduzca en gran medida las barreras de entrada.

Requisitos de iluminación

El diseño de cualquier sistema LiFi debe cumplir con los requisitos de iluminación. La organización internacional de normalización (ISO) sobre luz e iluminación especifica una iluminancia de 300 a 1500 lx (lux) para trabajos de oficina. Para obtener un rendimiento óptimo no se debe tener un valor ni inferior ni superior al rango dado.

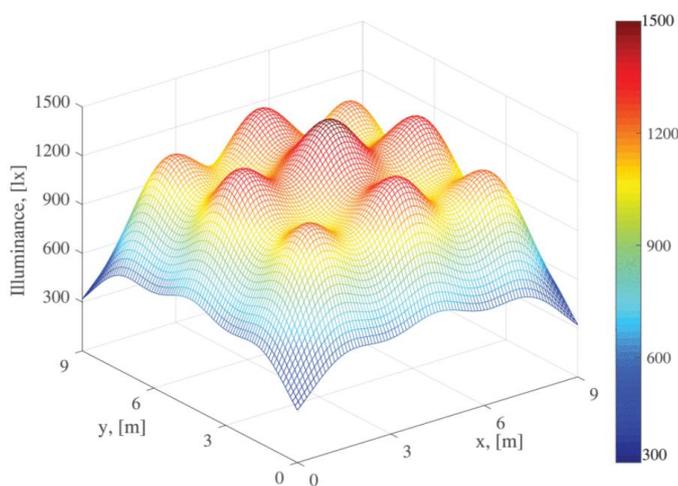


Figura 4-3. Distribución de iluminancia en una habitación.¹⁷

Optimizar los LED para un mejor rendimiento de la red bajo requisitos de iluminación es complicado. Este proceso involucra una serie de factores relacionados con los LED, incluidas sus ubicaciones, orientaciones, campo de visión, patrón de emisión, potencia de salida, ancho de banda, temperatura de color, etc. Se han realizado algunos estudios con el objetivo de maximizar la tasa de usuario bajo restricciones de iluminación y se llegó a la conclusión de que se puede conseguir mayores velocidades de transmisión con temperaturas de color más altas.

Backhaul

¹⁷ Imagen tomada de <https://ieeexplore-ieee-org.us.debiblio.com/document/9351549>. Fecha de consulta: Diciembre de 2021

El backhaul es necesario para conectar los puntos de acceso a la red central, es lo que se conoce como red de retorno. En el caso de las HLWNets es un desafío debido a tres factores principales: 1) hay una cantidad relativamente grande de AP; 2) la estructura de la red es heterogénea; 3) la capacidad de la red es considerablemente alta, un solo AP es capaz de proporcionar enlaces con velocidades en el rango de Gbps. Algunas de las tecnologías que podemos emplear para el backhaul en interiores son las comunicaciones por línea eléctrica (PLC), la alimentación a través de Ethernet (POE), la fibra óptica plástica (POF), ondas milimétricas (mmWave), ondas infrarrojas (IR) y la VLC. Estas tecnologías se pueden clasificar en cableadas e inalámbricas tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tecnología		Capacidad	Coste	Flexibilidad
Cableadas	PLC	1 Gbps	Bajo	Baja
	POE	1 Gbps	Bajo	
	POF	3 Gbps	Medio	
Inalámbricas	mmWave	Multi-Gbps	Medio	Alta
	VLC			
	IR			

El concepto de utilizar los cables eléctricos existentes dentro de los edificios como backhaul para VLC fue propuesto por primera vez por Komine y Nakagawa en 2003. Recientemente se ha introducido una arquitectura híbrida PLC-VLC para soportar comunicaciones de enlace descendente multiusuario, con una red troncal capaz de manejar velocidades de datos de hasta 1 Gbps. POE es otro enfoque que permite proporcionar transmisión de datos y suministro de energía al mismo tiempo. Combinando un sistema POE en cascada con otro VLC también se han alcanzado backhaul de 1 Gbps. La tercera opción de backhaul por cable es POF, que ofrece velocidades de transmisión de varios Gbps.

En comparación con las técnicas de backhaul por cable, las soluciones inalámbricas brindan una instalación más flexible, eso sí, a un mayor costo de hardware. Se ha empleado VLC para LiFi utilizando acceso dúplex para los enlaces de acceso y backhaul, utilizando protocolos de retransmisión como amplificar y reenviar, decodificar y reenviar para realizar transmisiones de doble salto.

Con respecto a los HLWNets, la asignación de recursos y la optimización de la red a través de LiFi y WiFi es factible cuando comparten el mismo backhaul. Esto permite que la asignación de energía de la red se pueda optimizar entre LiFi y WiFi para mejorar el rendimiento de la misma. Resulta por tanto imprescindible realizar un estudio previo para determinar la tecnología adecuada para implementar el backhaul.

4.3 Métricas de rendimiento

Se utilizan varias métricas o pautas para evaluar el rendimiento de las redes inalámbricas, incluida la probabilidad de cobertura SINR, la eficiencia espectral, la eficiencia espectral del área, la eficiencia energética, la capacidad de la red, la calidad del servicio y la equidad del usuario. A continuación, se discutirán en detalle las métricas mencionadas.

Probabilidad de cobertura SINR

La probabilidad de cobertura de SINR, es decir, la probabilidad de que el SINR del usuario esté por encima de un cierto umbral, es crucial para proporcionar una conectividad estable. Con respecto al sistema de RF que utiliza antenas omnidireccionales, la potencia de la señal recibida depende de la distancia del enlace y el sombreado. En cuanto a LiFi, la orientación del usuario también juega un papel decisivo. Específicamente, la incidencia normal da una potencia máxima de la señal recibida, mientras que no se recibirá ninguna señal para las direcciones de la señal incidente más allá del campo de visión (FOV) de los fotodiodos (PDs). Por esta razón, los cambios en la orientación del usuario pueden cambiar significativamente las áreas de cobertura de los APs LiFi. Si empleamos un PD con un campo de visión grande ampliamos el rango de orientaciones de recepción, recibiendo más de una interferencia. Como alternativa se usa el receptor de diversidad de ángulo

(ADR) compuesto por múltiples PDs de campo estrecho, mejorando así la relación SINR del usuario en 20-50 dB según el esquema elegido. Por último, en investigaciones se ha demostrado que los HLWNets pueden mejorar la probabilidad de cobertura SINR respecto a redes LiFi o WiFi independientes, especialmente para receptores de un solo PD con un ángulo de visión medio por debajo de 45°.

Eficiencia espectral

La eficiencia espectral mide la eficiencia con la que se usa una cierta cantidad de espectro de frecuencias. Para mejorar la eficiencia espectral se suelen emplear ciertas modulaciones, un ejemplo en VLC sería una modulación de fase y amplitud sin portadora (CAP), una variante de QAM, que ha sido capaz de proporcionar 4,85 bit/s/Hz. Otro ejemplo sería utilizar la modulación espacial generalizada con control de atenuación, con la que se han conseguido eficiencias espectrales superiores a 10 bit/s/Hz. En cuanto a HLWNets, es factible transferir a los usuarios de una red o otra por un mayor valor de SINR y, en consecuencia, una mayor eficiencia espectral. Con este enfoque, los HLWNets presentan una mejora de eficiencia espectral con respecto a las redes independientes, pudiendo alcanzar una mejora de entre un 10% y 30%.

Eficiencia espectral de área

A diferencia de WiFi, LiFi puede reutilizar en gran medida el recurso espectral en el espacio, ya que un único AP LiFi solo cubre un área confinada con un diámetro de 2 a 3 metros. Para comparar de manera equitativa la eficiencia espectral de LiFi y sus contrapartes de RF, se define la eficiencia espectral de área (ASE), que mide la suma de las tasas de datos promedio máximas por unidad de ancho de banda y por unidad de área. Se ha demostrado que LiFi es capaz de proporcionar un ASE al menos 10 veces mayor que el sistema de femtoceldas de RF. En cuanto al sistema híbrido de femtoceldas LiFi y WiFi se puede llegar a aumentar el ASE en al menos dos órdenes respecto al ASE de una red RF autónoma. Por último, si tenemos en cuenta el impacto de los obstáculos que bloquean la luz, sorprendentemente, se ha descubierto que los bloqueos moderados pueden tener un efecto beneficioso en el ASE, esto se debe a que los obstáculos pueden bloquear más interferencias que señales deseadas.

Eficiencia energética

Si bien aumentar la densidad de implementación de los AP podría mejorar el ASE, el costo del consumo de energía también aumenta rápidamente. La eficiencia energética es un punto clave en las redes ultradensas y existe una compensación entre la eficiencia energética y la eficiencia espectral, ya que una mayor eficiencia espectral requiere más energía por bit. Debido a la viabilidad de cambiar de usuario entre diferentes redes, las HLWNets tienen el potencial de mejorar la eficiencia energética. Esto se puede formular como un problema de optimización de ancho de banda y la asignación de energía para maximizar la eficiencia energética de las HLWNets. Con este enfoque se ha logrado demostrar el rendimiento superior de una red híbrida RF/VLC en comparación con un sistema solo de RF, con una mejora de hasta el 75%.

Capacidad de la red

Con respecto a las redes inalámbricas, la capacidad de la red mide la velocidad de datos total alcanzable que una red puede manejar bajo ciertas restricciones, generalmente un requisito sobre la tasa de error de bits. Esta métrica es fundamental para garantizar un rendimiento de red decente. Gracias a la integración de tecnologías inalámbricas de diferentes espectros, los HLWNets son capaces de aumentar la capacidad de la red, especialmente en un escenario donde los puntos de acceso WiFi están densamente desplegados. Además, la existencia de WiFi puede aliviar la degradación de la capacidad de LiFi por bloqueos en la ruta de luz.

Calidad de servicio

Mientras que las métricas en la capa PHY se centran en los bits, en la capa de red los paquetes son la unidad de datos. Varios aspectos de los paquetes, incluido el rendimiento, la tasa de pérdida de paquetes, la latencia y la fluctuación, generalmente se consideran para medir la calidad de servicio (QoS). Se espera que en un futuro la red inalámbrica de interiores admita aplicaciones con diversos requisitos de QoS. Al emplear HLWNets se ha demostrado que se puede mejorar en gran medida la tasa máxima de paquetes, así como disminuir la latencia. Una latencia baja es esencial en ciertas aplicaciones como el posicionamiento de vehículos guiados automáticamente (AGV).

Equidad del usuario

Todas las métricas anteriores se concentran en el rendimiento general de la red. En la práctica, los usuarios

pueden tener diferentes requisitos de rendimiento, latencia, experiencia de uso, etc. Por lo tanto, es necesario asegurarse de que cada usuario reciba una parte justa de los recursos del sistema. Las medidas típicas incluyen el índice de equidad de Jain, la equidad máxima-mínima y la equidad de la calidad de experiencia (QOE). Entre ellos, el índice de Jain, que evalúa la equidad del rendimiento entre usuarios, se usa ampliamente en la actualidad. Maximizar la capacidad de la red solo dará como resultado una preferencia de asignación de recursos para los usuarios con mejores canales. Esta desigualdad se acentúa en las HLWNets cuando una gran cantidad de usuarios compiten por los recursos WiFi limitados. Para mejorar la equidad del usuario una posible solución es emplear esquemas de equidad proporcional para asignar recursos, posteriormente se detallará con más detalle dicha técnica.

4.4 Modelado de comportamiento del usuario

Como se mencionó anteriormente, el rendimiento del sistema de las redes híbridas LiFi y WiFi involucradas se ve sustancialmente afectado por factores relacionados con el usuario, incluida la movilidad del mismo, la orientación del dispositivo y el bloqueo de la ruta de luz. Estos factores en conjunto se denominan comportamiento del usuario. A continuación, se verá un resumen de los distintos modelos utilizados para caracterizar el comportamiento de los usuarios.

Movilidad del usuario

Los modelos de movilidad se han estudiado a fondo para examinar las características de las redes inalámbricas que emplean ad hoc. Dependiendo de si el modelo tiene memoria y/o restricciones, estos modelos se pueden clasificar en tres categorías: modelos aleatorios, modelos con dependencia y modelos con restricciones geográficas. En comparación con el exterior, la movilidad en interiores es más arbitraria y variable. Existen modelos avanzados para escenarios interiores, sin embargo, están considerados para entornos específicos, lo que dificulta la evaluación del rendimiento general de una red inalámbrica. Alternativamente, los modelos aleatorios se han utilizado ampliamente en la actualidad para medir el rendimiento de redes HLWNets. El modelo de punto de ruta aleatorio (RWP) es uno de los empleados para modelar los movimientos humanos de forma aleatoria. El usuario se mueve a lo largo de una línea en zigzag de un punto de referencia a otro, puntos de referencia que se encuentran distribuidos aleatoriamente. Entre dos puntos de referencia consecutivos, el usuario avanza en línea recta con velocidad constante. La velocidad del usuario tiene un gran impacto en la selección del punto de acceso en HLWNets. En general, los usuarios que se mueven rápidamente prefieren WiFi, mientras que los usuarios lentos pueden ser atendidos por LiFi. La trayectoria del movimiento también juega un papel vital en el proceso de traspaso.

Orientación del dispositivo

Los fotodiodos tienen un campo de visión limitado, lo que restringe los ángulos en los que el dispositivo puede recibir señales ópticas. Dentro del rango de ángulos de recepción, la intensidad óptica recibida depende de la dirección de la luz incidente. Esto hace que la orientación del dispositivo sea un factor importante que puede afectar significativamente al rendimiento del enlace LiFi. Sin embargo, este problema no se abordó bien en las primeras investigaciones sobre LiFi y HLWNets. En la literatura existente, se asumió principalmente una orientación del dispositivo fija debido a la falta de un modelo válido. Se han realizado algunos estudios para evaluar el rendimiento de HLWNets con dispositivos orientados aleatoriamente basados en el teorema de rotación de Euler. Específicamente, cualquier forma de rotación en el espacio \mathbb{R}^3 se puede interpretar de forma única al componer tres rotaciones axiales en un sistema de coordenadas cartesiano tridimensional.

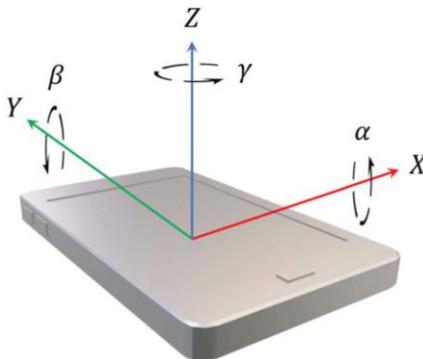


Figura 4-4. Rotaciones axiales de un dispositivo móvil.¹⁸

El primer modelo empírico de la orientación del dispositivo se documentó en marzo de 2019. Los autores, entre ellos Harald Haas, lograron adquirir valores en tiempo real de las rotaciones axiales de los teléfonos inteligentes, atribuidos al giroscopio integrado. El ángulo polar (es decir, el ángulo entre el eje Z y el vector normal al dispositivo) presenta una distribución de Laplace cuando el usuario se encuentra sentado y una distribución Gaussiana cuando camina. Las mediciones experimentales de la orientación del dispositivo para actividades no controladas se estudiaron posteriormente y en este caso se descubrió que el ángulo polar se ajusta mejor a una distribución Laplaciana que a una Gaussiana. También se han estudiado los cambios en la orientación del dispositivo en función de las mediciones de datos, llegándose a la conclusión de que el tiempo de coherencia de la orientación aleatoria es del orden de cientos de milisegundos. Los canales inalámbricos ópticos de interior, cuya dispersión de retardo típica es del orden de nanosegundos, se pueden tratar como canales de variación lenta. Combinando el modelo de orientación del dispositivo con el modelo de movilidad RWP se consigue un modelo con reconocimiento de orientación, consiguiendo proporcionar un marco más realista y preciso para analizar el rendimiento de LiFi. En este modelo se pueden apreciar el problema de los traspasos frecuentes en HLWNets, al contrario de lo que ocurría con el modelo RWP convencional, además este modelo se puede aplicar a las HLWNets para admitir el equilibrio de carga dinámico y la asignación de recursos en tiempo real para usuarios móviles.

Bloqueo del camino de luz

Al igual que las comunicaciones con ondas milimétricas y frecuencias del orden de terahercios, LiFi es susceptible a bloqueos de canales, los cuales son causados por obstáculos opacos como paredes, muebles, cuerpos humanos, etc. La persona que usa el dispositivo y otras personas a su alrededor pueden bloquear la trayectoria de la luz de un dispositivo. El cuerpo humano suele modularse como un objeto cilíndrico o rectangular. Este modelo de bloqueo se puede combinar con el modelo RWP orientado a la orientación, estableciendo un modelo conjunto para analizar de manera integral el impacto del comportamiento del usuario. También existe un modelo estadístico de bloqueo. Este modelo caracteriza el bloqueo con la tasa de ocurrencia y la tasa de ocupación, que miden la frecuencia con la que ocurre el bloqueo y la duración del mismo, respectivamente. Son factibles varios métodos para aliviar la degradación del rendimiento debido al bloqueo. Un posible método consiste en utilizar un LED con un ángulo de intensidad media más amplio, con el objetivo de ampliar el área de cobertura. Sin embargo, este método introduce más interferencias. Alternativamente, un receptor omnidireccional que emplea PD en cada lado del teléfono puede hacerlo robusto contra el bloqueo. En cuanto a los HLWNets, el usuario puede ser transferido al sistema WiFi cuando experimente un bloqueo severo de la ruta de luz y volver a cambiar una vez que se restablezca la conectividad LiFi.

4.5 Gestión de interferencias

El aumento de la densidad de los AP es un aspecto importante de la densificación de la red, un enfoque clave para la evolución inalámbrica durante la próxima década, mientras que la gestión de interferencias es de vital importancia. Operando en diferentes espectros, LiFi y WiFi no interfieren entre sí. Además, el CSMA/CA adoptado por WiFi puede suprimir la interferencia cocanal a un nivel insignificante. Por lo tanto, en esta sección nos enfocaremos en discutir la gestión de interferencias para LiFi. Estas técnicas pueden clasificarse en dos categorías básicas: cancelación de interferencia y evitación de interferencia.

¹⁸ Imagen tomada de <https://ieeexplore-ieee-org.us.debiblio.com/document/9351549>. Fecha de consulta: Diciembre de 2021

Approach type	Assumed knowledge	Modulation	System			Remark
			Antenna	AP Density	Topology	
MUD	Perfect CSIT	OOK	MIMO (2×2)	0.16/m ²	Matrix	Use block diagonalization precoding
	Imperfect CSIT	OOK	MISO (9×1)	0.36/m ²	Matrix	Use zero-forcing precoding
	Perfect CSIT	O-OFDM	MISO (4×1)	0.16/m ²	Matrix	Precoding for DCO- and ACO-OFDM
	Outdated CSIT	OOK	MIMO	0.25/m ²	Matrix	Null destructive interference
CoMP	Perfect CSIT	OOK	MISO (16×1)	0.17/m ²	Hexagon	Compare user-grouping schemes
	Perfect CSIT	Space-time	MISO (4×1)	0.25/m ²	Matrix	Use nonlinear precoding
	Imperfect CSIT	OOK	MISO (2×1)	0.04/m ²	Line	Use coordinated beamforming
BIA	Coherence time	O-OFDM	MISO (2×1)	0.06/m ²	Line	Use the filter pair
		OOK	MISO (2×1)	0.02/m ²	Line	Study the use of BIA in a HLWNet
Power control	Perfect CSIT	-	MIMO	0.03/m ²	Matrix	7-LED Tx
ADR	-	-	SIMO	0.16/m ²	Hexagon	9-PD and 20-PD Rx
	Perfect CSIT	-	MIMO (4×7)	0.16/m ²	Matrix	7-PD Rx
	-	-	SIMO	0.08/m ²	Matrix	3-PD, 4-PD, 5-PD and 6-PD Rx
Polarization	-	DMT	SIMO	-	Matrix	Differential Rx with 2 polarized PDs
	-	OOK	MIMO (2×2)	-	Line	2 polarized LEDs and 2 polarized PDs
Frequency reuse	-	QPSK	SISO	4.28/m ²	Hexagon	Demonstrate experimental results
	-	O-OFDM	SISO	0.04 - 0.1/m ²	Hexagon	Compare strict FFR with SFR
	-	-	SISO	0.01 - 0.12/m ²	Hexagon	Adapt to the density of APs
Time hopping	-	PPM	SISO	-	Matrix	Strict sync between Tx and Rx

Figura 4-5. Resumen de técnicas de gestión de interferencias en LiFi.¹⁹

Cancelación de interferencias

La cancelación de interferencias se define como la clase de técnicas que decodifican la información deseada y utilizan esta información junto con estimaciones de canal para eliminar o reducir la interferencia recibida de la señal recibida. Este tipo de técnica funciona en el extremo del receptor, es decir, después de que se recibe la señal afectada por la interferencia.

1) Precodificación:

Las técnicas de precodificación se utilizan ampliamente para eliminar las señales de interferencia en los enlaces descendentes. El principio básico es crear canales ortogonales de forma artificial mediante la descomposición de valores singulares. Debido a la no negatividad de las señales ópticas, las técnicas de precodificación tradicionales deben modificarse para adaptarse a LiFi, por ejemplo, agregando un vector de polarización de CC (corriente continua). Las técnicas de precodificación se pueden dividir en dos subcategorías: detección multiusuario (MUD) y transmisión multipunto coordinada (CoMP). MUD tiene como objetivo cancelar la interferencia entre usuarios de canal compartido dentro del mismo AP. Utilizando la diagonalización de bloques se ha demostrado que se puede lograr un valor de SINR de 20 dB para dos usuarios de VLC en la mayoría de la región interior, cuando la potencia de un solo LED es de 10 mW. AL mismo nivel de potencia, el sistema VLC basado en ZF (zero forcing) puede proporcionar un valor SINR de 30 dB, con APs desplegados más densamente. Se ha demostrado que con ZF, ACO-OFDM supera a DCO-OFDM para baja potencia óptica. También se ha estudiado la precodificación adaptativa óptica, la cual solo anula la interferencia destructiva. Con una dependencia reducida de CSI (channel state information), este método es más robusto para un CSI imperfecto que la precodificación de inversión de canal. Con el objetivo de eliminar ICI (interferencia entre portadora), CoMP requiere coordinación entre APs para intercambiar toda la información de CSI posible.

Los métodos de precodificación se basan en la información del estado del canal en el transmisor (CSIT) de todos los usuarios cocanal. Sin embargo, el enlace ascendente de LiFi generalmente emplea infrarrojos cuando no se necesita iluminación, componiendo un sistema dúplex por división de frecuencia. Como resultado, el uso de técnicas de precodificación para LiFi no se encuentra todavía bien determinado y existen muchas interrogantes que deben ser resueltas en próximas investigaciones.

2) Alineación ciega de interferencias:

Cuando el CSI exacto no está disponible en el transmisor, la alineación de interferencia ciega (BIA) se puede lograr emparejando un usuario selectivo en el tiempo con un usuario selectivo en frecuencia. El concepto es maximizar el grado de libertad para los usuarios cocanales mediante el enmascaramiento de las señales

¹⁹ Imagen tomada de <https://ieeexplore-ieee-org.us.debiblio.com/document/9351549>. Fecha de consulta: Diciembre de 2021

transmitidas sobre la base de la coherencia del canal. A diferencia de la precodificación, BIA solo puede reducir la interferencia hasta cierto punto. Dado que es posible que no siempre se cumpla la condición de coherencia del canal para BIA, se requiere la manipulación del canal. En los sistemas RF, esto se realiza mediante antenas reconfigurables, que permiten al receptor cambiar entre diferentes antenas. En cuanto a LiFi, emplea PD como antenas receptoras. Se han realizado algunos estudios para utilizar BIA en LiFi, equipando a cada usuario con un PD y varios filtros ópticos, el esquema de BIA conseguido requeriría de 3 a 5 dB menos de potencia de transmisión óptica que TDMA. El rendimiento de BIA en una HLWNet, demostrando que el cambio de usuarios de borde de celda de LiFi a WiFi puede permitir que BIA obtenga una mayor ganancia sobre TDMA. Sin embargo, BIA solo supera a TDMA en el rango de alta potencia de transmisión óptica, por ejemplo, por encima de 50 dBm. Estos niveles tan altos de potencia LED no son adecuados para la iluminación, lo que restringe el uso de BIA para LiFi.

3) Cancelación sucesiva de interferencias:

La cancelación de interferencia sucesiva (SIC) puede detectar señales cocanales distinguiendo sus diferentes niveles de potencia. Vale la pena señalar que cuando se implementa el control de potencia en LiFi, se deben cumplir los requisitos de iluminación. Dado que solo el componente de corriente alterna (CA) de las señales ópticas se convierte en la señal eléctrica efectiva, es factible ajustar la cantidad del componente de CA mientras se mantiene el mismo nivel de la potencia de transmisión óptica promedio. El control de potencia ha sido estudiado cuando un usuario es atendido por varios APs, cada uno de los cuales consta de varios LED de campo de visión estrecho. Este método puede conseguir una SINR 2-5 dB superior que en TDMA. Como SIC detecta un usuario por etapa, la complejidad computacional y latencia son proporcionales al número de usuarios cocanales. Alternativamente la cancelación de interferencia paralela (PIC) detecta a todos los usuarios simultáneamente y puede reducir la latencia a costa de una mayor complejidad. Con respecto a LiFi, SIC es preferible a PIC, ya que cada LiFi AP cubre un área relativamente pequeña y es probable que sirva solo a unos pocos usuarios. El uso de SIC para realizar accesos múltiples se conoce como NOMA. Una consideración a tener en cuenta es que los métodos SIC se basan en un par apropiado de usuarios cocanal, lo que puede asegurarse en redes ultra densas debido a la escasez de usuarios en una solacelda.

4) Métodos especialmente diseñados:

Hay dos métodos de cancelación de interferencia especialmente diseñados para LiFi: receptor de diversidad de ángulo (ADR) y técnicas de polarización. ADR utiliza múltiples PD de Fov estrecho en lugar de una sola PD de Fov ancho, a fin de reducir la interferencia en cada PD. Se han realizado estudios para analizar el rendimiento de diferentes esquemas de combinación de señales para ADR, incluida la selección de la mejor combinación, la combinación de igual ganancia, la combinación de relación máxima y la combinación óptica. Se llegó a la conclusión de que, con una combinación óptima, ADR puede lograr un rendimiento SINR cercano al de los sistemas libres de interferencias. También se ha estudiado el comportamiento de ADR al combinarlo con precodificación ZF, esquema que puede mejorar notablemente el rendimiento de SINR, especialmente para los usuarios de borde de celda en LiFi.

La propiedad de polarización de la luz también se puede aprovechar para realizar una detección diferencial para la cancelación de interferencias. Específicamente, dos señales ópticas polarizadas con direcciones perpendiculares no interfieren entre sí, construyendo una multiplexación por división ortogonal. Se han utilizado dos PD con diferentes filtros de polarización para cancelar la interferencia. No obstante, estos enfoques son factibles en experimentos de laboratorio, pero es muy difícil de implementar en la práctica.

Prevención de interferencias

La evitación de interferencias se refiere a las técnicas que funcionan en el extremo del transmisor para evitar producir interferencias. Entre estas técnicas se encuentran los esquemas de división ortogonal que incluyen TDMA, OFDMA y acceso múltiple por división de espacio (SDMA). Algunos estudios enumeran el control de potencia como un método para evitar interferencias. Este tipo de método no puede funcionar sin SIC y, por lo tanto, lo clasificamos como cancelación de interferencia basada en SIC. Otras técnicas para evitar interferencias incluyen la reutilización de frecuencia y el salto de frecuencia / tiempo.

1) Reutilización de frecuencia:

La reutilización de frecuencias (FR) se usa ampliamente para evitar ICI entre celdas vecinas, donde las

frecuencias se reutilizan en un patrón regular. Se han realizado algunos estudios para aplicar RF a LiFi. Uno de estos analizó la reutilización de frecuencia fraccional (FFR) para LiFi, incluida la FFR estricta y la reutilización de frecuencia suave (SFR). El primer esquema divide el área de la celda en tres sectores iguales, mientras que el último proporciona una estructura celular de dos niveles. En comparación con el FFR estricto, SFR es más flexible y, por lo tanto, puede lograr una relación de reutilización más alta con la misma capacidad de supresión de interferencias.

2) Salto de frecuencia/tiempo:

Las técnicas de salto consisten en cambiar rápidamente de portadora entre los canales de frecuencia o intervalos de tiempo disponibles, utilizando una secuencia pseudoaleatoria conocida previamente tanto por el transmisor como por el receptor. Si bien este método puede reducir la probabilidad de que dos usuarios ocupen el mismo intervalo de transmisión es necesario que exista una coordinación estricta entre el transmisor y el receptor.

Resumen de posibles aplicaciones

1) Sistema LiFi centralizado:

Los puntos de acceso LiFi se pueden administrar fácilmente de manera centralizada, ya que están ubicados en el mismo compartimento. Esto favorece la gestión de interferencias en LiFi, mientras que en el caso de WiFi depende de la detección de acarreos y evasión de colisiones. Empleando backhaul dedicado, el sistema LiFi centralizado puede facilitar la implementación de la precodificación, eso sí, teniendo en cuenta que los canales LiFi pueden variar con rapidez el rendimiento de dicha precodificación se puede ver comprometido. Como resultado, se debe considerar la variación del canal al desarrollar esquemas de precodificación para LiFi.

2) Despliegue AP denso:

Los puntos de acceso de LiFi suelen estar densamente desplegados, con una separación en torno a 2 – 3 metros. Esto hace que ADR sea un enfoque prometedor para rechazar interferencias. ADR también puede mejorar la intensidad de la señal recibida, ya que la sensibilidad del PD depende de la dirección de incidencia. Por el contrario, un solo PD de campo de visión ancho no funciona bien cuando presenta una inclinación significativa. Esto impulsa el uso de múltiples PD para construir un receptor omnidireccional.

3) Oportunidades en HLWNets:

Aunque WiFi y LiFi no interfieren entre sí, no significa que WiFi no tenga impacto en la gestión de interferencias para LiFi. Al contrario de lo que podríamos pensar, una asociación adecuada de usuarios puede ayudar a mitigar la interferencia en LiFi, por lo que es esencial asignar recurso correctamente, tal y como veremos en los siguientes apartados.

4.6 Balanceo de carga

En el área de las redes inalámbricas, el equilibrio de carga (LB) se refiere a las técnicas que distribuyen las sesiones de los usuarios entre los puntos de acceso con áreas de cobertura superpuestas. Los objetivos de LB son optimizar la utilización de recursos, maximizar el rendimiento, minimizar el tiempo de respuesta y reducir la congestión de la red. En redes homogéneas, la superposición de cobertura entre los AP se restringe para mitigar la ICI. Como resultado, LB solo se aplica a los usuarios de borde de celda cuando imponen cargas de tráfico desequilibradas a diferentes puntos de acceso. Es decir, LB no es necesario cuando las tasas de datos demandadas por los usuarios se distribuyen uniformemente a lo largo de la topología de la red. Por el contrario, los métodos basados en AP implementan un LB en toda la red, el cual requiere una unidad central para coordinar los AP.

LB se vuelve esencial y desafiante en las redes híbridas debido a dos factores principales:

1) Las áreas de cobertura de LiFi y WiFi se superponen.

2) Los puntos de acceso WiFi tienen un área de cobertura mayor, pero con una menor capacidad de sistema que los puntos de acceso LiFi.

Esto hace que WiFi sea susceptible a la sobrecarga de tráfico incluso si las tasas demandadas por los usuarios

se distribuyen uniformemente por la topología.

Existen por tanto diversos métodos para paliar este problema:

Equilibrio de carga de canal estacionario

El canal inalámbrico se puede suponer estacionario dentro del tiempo de coherencia. Con canales estacionarios, el problema de LB debe compensar la calidad del canal con la disponibilidad de recursos. Uno de los métodos propuestos para conseguir la equidad proporcional (PF) entre usuarios consiste en algoritmos de asignación de recursos centralizados y distribuidos. Existen otros métodos, pero todos tienen en común que son problemas NP-complejos, esto requiere una cantidad excesiva de complejidad computacional, la cual aumenta exponencialmente con el número de APs. Para reducir la complejidad se creó un algoritmo iterativo basado en la teoría de juegos evolutivos, considerando para ello múltiples funciones de equidad (MFF). Este estudio caracterizaba los bloqueos del camino de la luz, las orientaciones arbitrarias del receptor y los requisitos de velocidad de datos para modelar un escenario de comunicación práctico. Los algoritmos iterativos de este tipo se pueden considerar como optimización autónoma, la cual se lleva a cabo individualmente en cada AP.

La optimización centralizada necesita resolver un problema NP-complejo, mientras que la optimización autónoma requiere realizar algunas iteraciones para alcanzar un estado estacionario. Ambos requieren una cantidad sustancial de tiempo de procesamiento. En HLWNets, CSI podría viajar rápidamente para usuarios móviles incluso con usuarios con velocidades modestas. Esto restringe el tiempo de procesamiento y por tanto desafía la practicabilidad de los métodos anteriores. Alternativamente, se pueden aplicar métodos directos de tomas de decisiones, que proporcionan una cantidad significativamente menor de tiempo de procesamiento. Este método LB se ha llevado a cabo dividiendo el proceso en dos etapas:

- a) Determinar los usuarios que deben ser atendidos por WiFi.
- b) Asignar los usuarios restantes como si fueran una red LiFi independiente.

Basándose en el conocimiento estadístico de los requisitos de velocidad de datos y CSI, este método basado en una lógica algo difusa puede lograr un rendimiento y equidad casi óptimos para el usuario, al tiempo que reduce el tiempo de procesamiento en más de 10 órdenes de magnitud.

Equilibrio de carga consciente de la movilidad

Todos los métodos LB mencionados se basan en el conocimiento de CSI, el cual varía debido a los movimientos del usuario y los cambios ambientales. En consecuencia, estos métodos tienen que recalcular las soluciones periódicamente, teniendo en cuenta para ello el impacto de los traspasos. En el caso de los métodos LB de canal estacionario los usuarios son transferidos entre LiFi y WiFi cuando se mueven a través de los puntos de acceso LiFi, lo que genera traspasos innecesarios frecuentemente.

Para hacer frente a este problema la movilidad del usuario debe considerarse junto con LB, conociéndose esta técnica como LB consciente de la movilidad. Es posible realizar la asignación de APs y recursos de conjuntamente, consiguiéndose con esta implementación un rendimiento un 50% mayor de la red que la implementación por separado de estos elementos, no obstante, la complejidad computacional aumenta en tres órdenes de magnitud.

Se han estudiado otros métodos para reducir la complejidad computacional y llevar a cabo implementaciones prácticas. Uno de los propuestos, basado en lógica difusa, toma varios parámetros de entrada, como lo son la SINR, la velocidad del usuario y los requisitos de velocidad de datos. Al agregar bloqueos de la ruta de luz como entrada adicional se pueden manejar situaciones en las que las cargas de tráfico están desequilibradas a causa de los bloqueos. Al emplear lógica difusa se puede implementar fácilmente, pero presenta reglas lógicas predefinidas y sin flexibilidad. Por este motivo es factible utilizar aprendizaje automático para hacer frente a las incertidumbres presentes en el despliegue de la red, la distribución de los usuarios, situaciones de tráfico, etc.

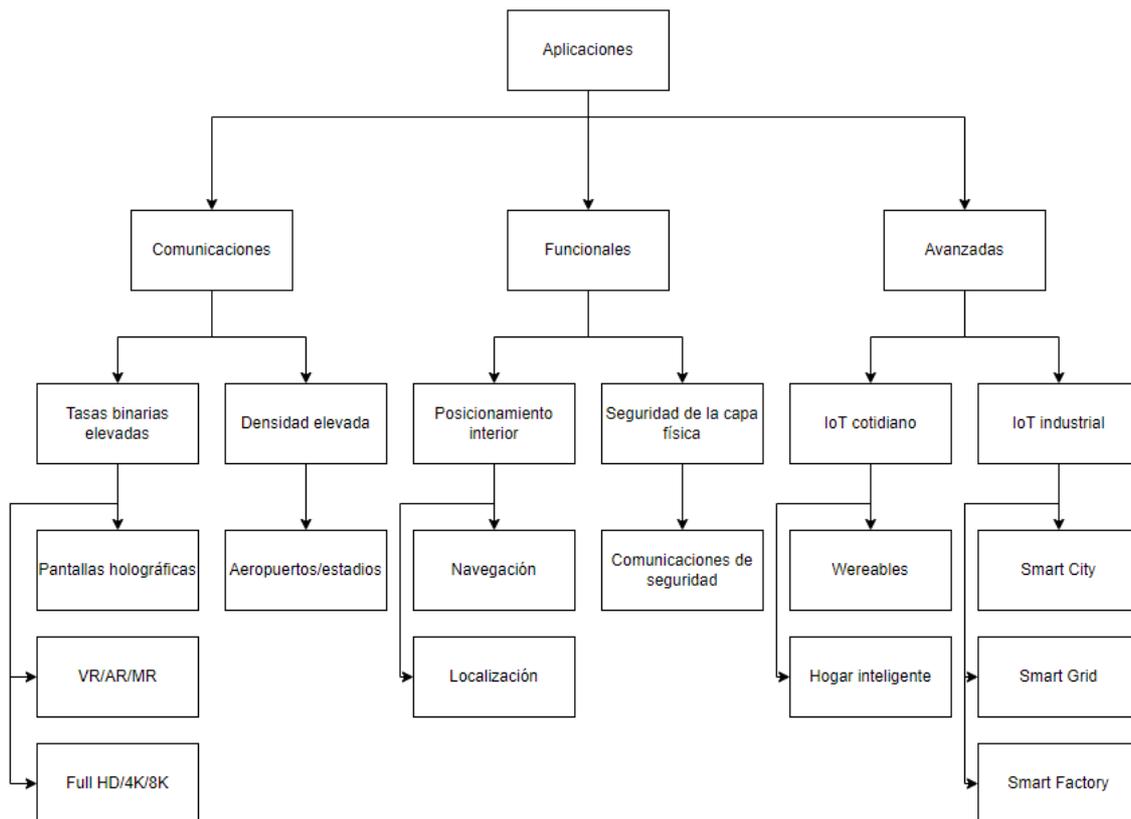
Conclusiones de LB

La variación del canal debido a la movilidad del usuario no es despreciable al resolver el problema de LB en HLWNets. Básicamente, este genera un compromiso entre la tasa de datos instantáneos y la tasa de traspaso al maximizar el rendimiento promedio. También se deben considerar otras métricas de QoS, como la tasa de pérdida de paquetes, el retraso y la fluctuación, lo que se traduce en un problema de optimización de objetivos múltiples.

Para resolver el problema de LB, los algoritmos deben comprometer la optimización por la complejidad computacional. Si bien los métodos de optimización pueden proporcionar soluciones óptimas, necesitan una cantidad excesiva de complejidad computacional. Por el contrario, los métodos de toma de decisiones pueden reducir significativamente la complejidad computacional, pero la optimización se ve comprometida. En general es posible realizar LB de baja complejidad de dos maneras. Un enfoque es explotar la información de estado de los usuarios y los puntos de acceso (como puede ser la velocidad del usuario) a través de métodos de control inteligente como la lógica difusa, la teoría de juegos y el aprendizaje autónomo. La otra forma consiste en construir un diagrama de flujo de decisiones con una serie de umbrales predefinidos. Muchos de los métodos de toma de decisiones se examinan en entornos específicos, mientras que las posibles implementaciones de red no se han estudiado adecuadamente en el marco actual, por lo que es aconsejable desarrollar métodos LB con baja complejidad por el momento.

4.7 Aplicaciones

Las HLWNets pueden emplearse en una amplia gama de aplicaciones y servicios, los cuales se pueden clasificar en tres categorías principales: aplicaciones basadas en comunicaciones, funcionales y avanzadas:



Sistemas de posicionamiento en interiores

El posicionamiento en una herramienta esencial para proporcionar servicios basados en la ubicación, como la navegación, creación de mapas, seguimiento de objetos, entre otros. En la actualidad se utiliza el sistema de posicionamiento global (GPS), un sistema de radionavegación basado en satélites con gran precisión. Sin

embargo, es menos preciso en interiores, ya que las señales transmitidas se degradan e interrumpen por obstrucciones. Alternativamente IPS (sistema de posicionamiento en interiores) se puede desarrollar sobre tecnologías de comunicación inalámbricas de corto alcance, por ejemplo, WiFi, LiFi, Bluetooth, identificación por radiofrecuencia y ZigBee.

Los métodos IPS se pueden clasificar según el algoritmo matemático empleado o bien a partir de la información empleada.

Los principales algoritmos utilizados para IPS son triangulación, proximidad y huella digital. El método de triangulación aprovecha las propiedades geométricas de los triángulos midiendo la distancia o el ángulo entre el dispositivo y múltiples puntos fijos (balizas). Este método ofrece una gran precisión a costa de una estructura de sistema sofisticada. Con un solo receptor necesita al menos tres balizas para posicionamiento 2D y cuatro para 3D. La baliza LiFi puede ser un AP basado en LED o un retrorreflector modulado (MRR). El algoritmo de proximidad es el más simple, este vincula la ubicación del dispositivo con el área de cobertura del AP. Debido al despliegue denso, LiFi es adecuado para este algoritmo. Por último, la huella digital emplea información dependiente de la ubicación como RSS. La ubicación óptima se obtiene minimizando la distancia euclídea entre el mapa de radio y la medida en tiempo real.

En cuanto a la información utilizada, las técnicas IPS se dividen en RSS, hora de llegada (TOA), diferencia horaria de llegada (TDOA) y ángulo de llegada (AOA). Los métodos basados en RSS aprovechan la atenuación del canal para estimar la diferencia entre el dispositivo y la baliza. Este método puede verse afectado por la propagación multitrayecto. TOA también se basa en el cálculo de la distancia, pero a través del tiempo de viaje de la señal. Sin embargo, es necesario una sincronización adecuada entre las balizas. Los métodos basados en TDOA emplean múltiples transmisores o receptores para obtener la diferencia de tiempo entre las señales recibidas, evitando el problema multitrayecto. AOA miden el ángulo entre la señal transmitida y el ángulo normal a la baliza. En RF, AOA generalmente se obtiene midiendo la diferencia de fase entre antenas, pero en LiFi no se puede medir directamente. Esto se debe a la falta de información de fase en la modulación IM/DD. Para realizar el cálculo se usan la transformación de imagen, que calcula el AOA a través de la relación trigonométrica entre las coordenadas de las balizas y sus ubicaciones de imagen en una foto, o bien a través del modelado, basado en el patrón angular de RSS en el PD.

Si nos referimos a las redes híbridas, la métrica clave para el posicionamiento es la precisión. Al tener LiFi un rango de cobertura menor el error de posicionamiento es menor que en WiFi. Además, hay que tener en cuenta que los desafíos que enfrentan los IPS basados en LiFi son bastante diferentes que los basados en WiFi. Uno de los algoritmos propuestos determina un área posible a través de un método de proximidad basado en LiFi y luego ubica la posición específica en dicha área utilizando el RSS de las señales RF, todo ello permite mantener el error de posicionamiento en el rango de 20 cm. Otro método consiste en emplear RF para detectar en qué habitación se encuentra actualmente el dispositivo y posteriormente emplear LiFi para detectar la posición exacta del dispositivo, con un error de estimación de solo 5.8 cm.

Conclusiones

Debido a la complementariedad entre LiFi y WiFi, HLWNet no solo puede aumentar la capacidad de la red, sino también beneficiar a los servicios de aplicaciones como IPS y PLS. En lo que respecta a IPS, la naturaleza de LiFi le permite ofrecer una precisión mucho mayor que WiFi para usuarios lentos. Un caso típico es navegar con el AGV en una fábrica, donde el IPS basado en RF es significativamente inexacto debido a los desvanecimientos multitrayectos. En cuanto a los usuarios que se mueven rápidamente, la información obsoleta podría degradar la precisión de los IPS basados en LiFi cuando el canal LiFi varía rápidamente. Cómo emplear HLWNets para mejorar la precisión de posicionamiento en este caso sigue siendo un tema abierto.

4.8 Desafíos y aplicaciones futuras

Los desafíos clave que enfrentan las HLWNets son la integración de las diferentes tecnologías inalámbricas de manera eficiente. En la mayoría de las investigaciones actuales, LiFi y WiFi se tratan como dos tecnologías individuales y la integración se lleva a cabo en términos de gestión de red. Para mejorar la eficiencia es importante permitir que LiFi y WiFi funcionen al mismo tiempo, objetivo que se consigue cuando el proceso

de integración no está contenido en la capa de red.

Implementación de hardware y capa física

Para permitir el funcionamiento de HLWNets, los circuitos frontales de LiFi y WiFi deben estar integrados en la misma placa. De esta forma se aprovechan los componentes comunes a ambas tecnologías y se ahorra en fabricación. En cuanto al hardware es más difícil su integración, ya que LiFi y WiFi utilizan diferentes componentes de antenas.

En cuanto a la modulación se suele emplear OFDM para WiFi, mientras que para LiFi hay varios candidatos, entre ellos O-OFDM, OOK y modulación de pulsos. La idoneidad de la modulación depende de los LED y PD empleados. En la práctica, los LEDs comerciales tienen un ancho de banda restringido, lo que genera un compromiso entre la eficiencia espectral y la eficiencia energética.

Capa de red y gestión de red

Normalmente se considera que se sirve al usuario por un solo AP a la vez. Esto está sujeto al protocolo de control de transmisión (TCP) convencional, que no admite que los paquetes enviados desde diferentes APs se reordenen en el destino. Desde 2013, el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF) ha estado trabajando en el protocolo de control de transmisión multitrayecto (MPTCP), el cual agrega un número de secuencia de subflujo en la sobrecarga del paquete para resolver el problema de reordenar los paquetes, de esta forma los usuarios pueden ser atendidos simultáneamente por LiFi y WiFi. De esta forma se ofrece una asignación de recursos más flexible, ya que la carga de tráfico de un usuario se puede distribuir entre varios AP. Esto es lo que se conoce como transmisión paralela.

Por otro lado, el componente central de HLWNets es la gestión de la red, que incluye el traspaso, la asignación de recursos y el equilibrio de carga. Los desafíos radican en la complejidad del problema y el tiempo de procesamiento. Un enfoque potencial es aplicar el aprendizaje autónomo, que es capaz de resolver problemas de optimización complejos donde es difícil establecer un modelo matemático explícito. Sin embargo, es difícil recopilar muestras en sistema en tiempo real, ya que se desconoce la mejor solución.

Capa de aplicación

En el dominio de WLAN, hay muchos casos de uso diferentes con una amplia variedad de requisitos diferentes. Esto da como resultado la demanda de una alta adaptabilidad del sistema, que HLWNets puede soportar gracias a la alta complementariedad entre LiFi y WiFi. El hecho de que es necesario considerar los diferentes requerimientos en la gestión de la red según la aplicación, hace que sea más factible converger todas las capas en una sola en vez de tener varias independientes, pero esto es algo que todavía se encuentra en estudio.

Además de WLAN, HLWNets también puede ser aprovechada para IoT. En primer lugar, las pequeñas celdas LiFi permiten admitir fácilmente una densidad muy alta de dispositivos IoT, mientras que WiFi proporciona una cobertura ubicua para garantizar la conectividad. En segundo lugar, en algunos escenarios, como una fábrica, el entorno de propagación de radio puede ser bastante desafiante. En este caso, LiFi puede complementar a WiFi para proporcionar enlaces inalámbricos robustos y confiables. En último lugar pueden ser aplicables a dispositivos IoT con un bajo consumo de energía.

4.9 Conclusiones

Junto con la crisis del espectro que se avecina en RF, LiFi ha surgido en los últimos años como una tecnología prometedora para las comunicaciones inalámbricas en interiores. Mientras tanto, WiFi continúa su amplio despliegue en la vida diaria. La coexistencia de LiFi y WiFi está cobrando importancia con el lanzamiento de productos comerciales LiFi de empresas como pureLiFi y Signify. Ubicados en la misma área local, LiFi y WiFi se pueden administrar fácilmente a través de una unidad de control central, formando la estructura de HLWNets. Combinando la alta tasa de datos de LiFi y la cobertura omnipresente de WiFi, las HLWNets pueden proporcionar mayor rendimiento de red que una sola tecnología inalámbrica. No obstante, esta

tecnología se encuentra todavía en pleno desarrollo y puede dar mucho más de sí en un futuro cercano.

Montaje experimental

5.1 Introducción

En este apartado se llevará a cabo el montaje y descripción de un sistema HLWNet, con el objetivo de caracterizar los principios básicos de funcionamiento de la red. De esta forma se corroborarán los principios de diseños descritos en el apartado de redes híbridas, así como las dificultades que presenta la puesta en marcha de un sistema de estas características frente a una red independiente LiFi o WiFi.

En cuanto a los componentes que constituyen el montaje, para la parte WiFi se ha empleado un módulo ESP8266 ESP-12F. Es de la marca AZDelivery y dispone de una tarjeta de desarrollo WiFi de 2.4 GHz. A su vez presenta compatibilidad con los estándares 802.11 b/g/n, además de disponer de una antena integrada de 20 dBm de ganancia. El hecho de disponer de un módulo completamente funcional simplifica en gran medida el esquema, ya que en caso contrario sería bastante complicado diseñar un sistema WiFi que fuera compatible con los microprocesadores empleados.

- 27.5 mm Pin Distance
- Dimensions (LxWxH): 58 x 31 x 13 mm

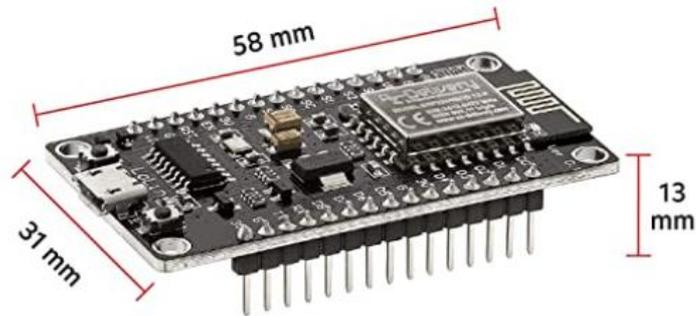


Figura 5-1. Módulo WiFi ESP8266.

El módulo WiFi se conecta al PC por puerto serie USB para la toma de alimentación y programación del mismo. La conexión WiFi se realizará conectando el dispositivo directamente a la red en la que queramos realizar las pruebas a través del código WPA del router, del mismo modo que conectamos un teléfono móvil o un ordenador. Posteriormente se empleará una aplicación móvil para poder enviar información al ESP.

El sistema LiFi está compuesto por un láser para transmitir la información y un receptor. El módulo láser es de la marca ICQUANZX, con un voltaje de 5V, una potencia de 5 Mw y una longitud de onda de 650 nm (color de emisión rojo). El receptor es fabricado por WayinTop, este presenta una resistencia fotosensible con una gran sensibilidad a la luz ambiental. Por un lado, nos obliga a trabajar en un ambiente adecuado sin interferencias, pero conseguimos detectar los pulsos luminosos de forma más precisa. Este receptor trabaja con una tensión de alimentación de entre 3.3-5V. Presenta un pin de salida digital y otro analógico, en el proyecto en cuestión emplearemos el pin digital DO.

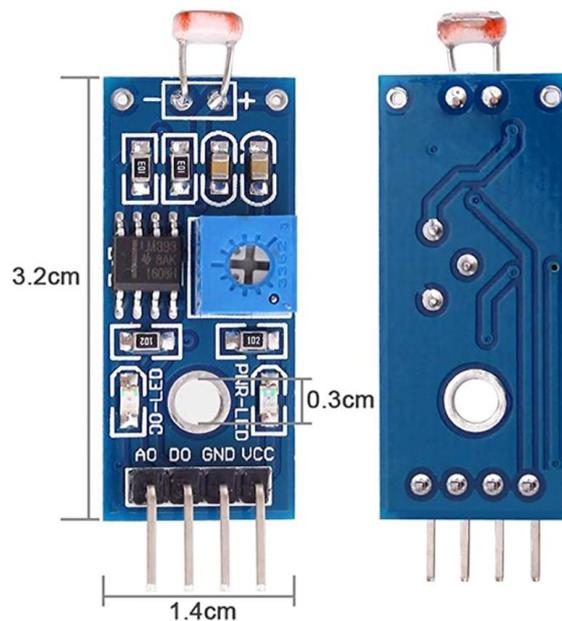


Figura 5-2. Receptor láser.

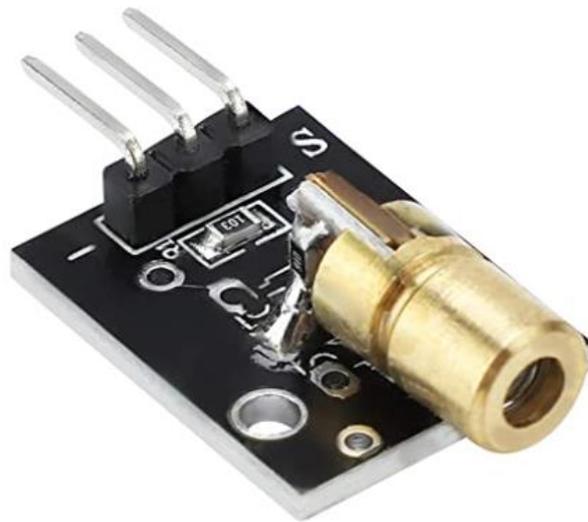


Figura 5-3. Módulo láser.

El láser y el receptor se pueden integrar en un mismo microcontrolador, pero en el esquema realizado uno de ellos se implementará en un MSP430G2ET y el otro en el módulo WiFi, de esta forma podemos cambiar de posición los componentes de la parte LiFi y ver cómo afecta al rendimiento del sistema.

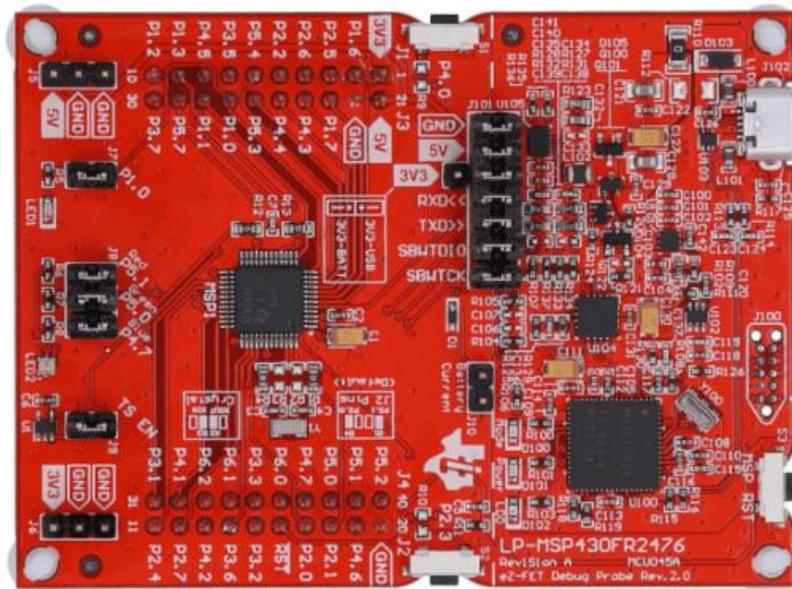


Figura 5-4. Microprocesador MSP430G2ET.

Para combinar ambas redes en una híbrida se conecta el láser en el módulo ESP8266, consiguiendo así conectar ambas redes con un mismo microcontrolador. Por otro lado, el receptor láser se conectará a un MSP430. Este sistema será por tanto unidireccional y no tendremos la posibilidad de conocer si la información se ha recibido correctamente. Esto se debe a que el objetivo del trabajo es caracterizar una red híbrida centrándonos en las dificultades de diseño, particularidades y diferencias respecto a redes independientes. Por tanto, no se busca el diseño de una red extremadamente eficiente o robusta.

5.2 Móvil + módulo WiFi (router WiFi) Nodo radio

El módulo ESP8266 integra todos los elementos necesarios para realizar la comunicación WiFi, por lo que no es necesario añadir ningún componente adicional. Tras conectarlo vía USB al PC podemos empezar a

programarlo directamente. Emplearemos para ello el entorno de simulación de Arduino, el cual es plenamente compatible con el módulo WiFi del que disponemos. El código planteado hace uso de las librerías ESP8266WiFi y WiFiUdp. Se comienza conectando el módulo ESP a la red WiFi en la que se encuentre el mismo, la red puede ser la de un router doméstico o incluso creada por otro dispositivo, como puede ser un teléfono móvil. Posteriormente se pone a la escucha un puerto (el 4210 en este caso) con el protocolo UDP, el cual nos permitirá recibir información y almacenarla en un Buffer. A través del puerto serie del ESP podemos enviar información al PC, permitiendo visualizar el contenido de los paquetes recibidos, así como el resultado de la prueba de conexión.

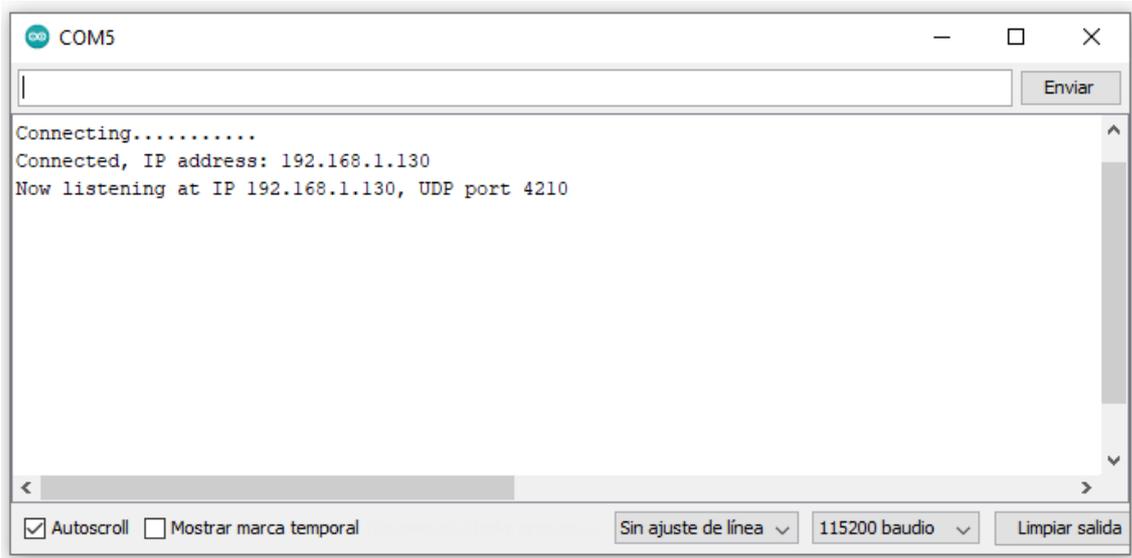


Figura 5-5. Salida del puerto serie del ESP8266.

En la figura 5-5 podemos ver que se ha conseguido conectar el dispositivo, permitiendo establecer el puerto 4210 como UDP, además nos muestra la dirección IP 192.168.1.130. La dirección IP nos permitirá enviar información desde un dispositivo diferente, lo ideal sería establecer una dirección fija pero no es posible asignar una dirección fija con las funciones disponibles en la biblioteca WiFiUdp, por lo que es necesario actualizarla cada vez que se reinicie el módulo WiFi.

Tras realizar la configuración del ESP8266 podemos emplear un teléfono móvil para comunicarnos con el micro. Al disponer de un puerto UDP debemos emplear alguna aplicación online o emplear alguna que ya esté instalada en el móvil. En este caso se ha elegido la aplicación UDP Terminal, la cual se encuentra disponible en Play Store.

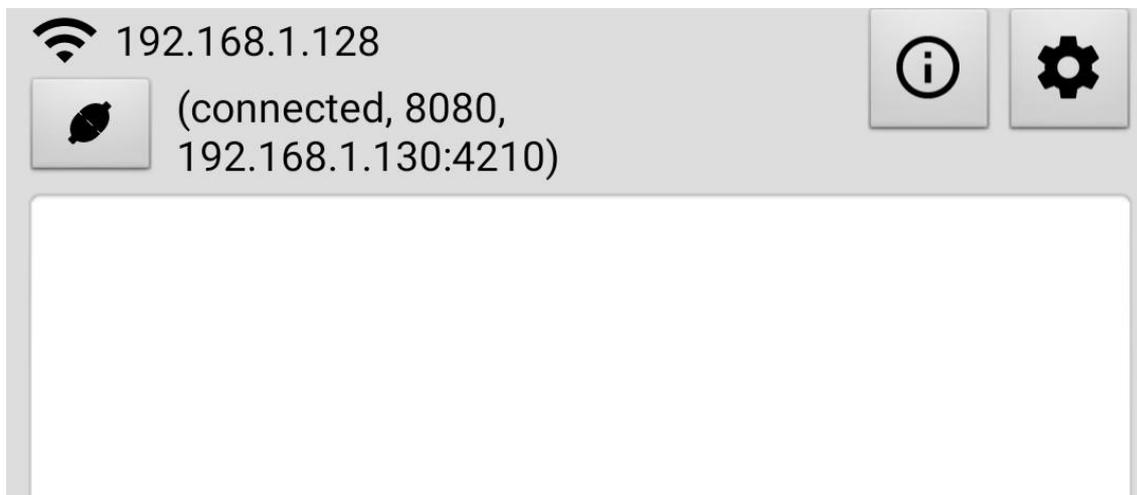


Figura 5-6. Interfaz de UDP Terminal.

En esta aplicación será necesario especificar la dirección IP y puerto de escucha para realizar la conexión. El funcionamiento de la misma se basa en una comunicación mediante mensajes de texto que pueden ser en formato ASCII o hexadecimal. En el caso de emplear algún sensor en el módulo una mejor opción sería usar la plataforma ThingSpeak, la cual nos permite visualizar gráficamente la evolución de los valores del sensor.

Con estos pasos la red WiFi estaría plenamente operativa. Como hemos podido comprobar la puesta en marcha ha sido inmediata, ya que disponemos de un módulo con una antena integrada capaz de detectar automáticamente las señales WiFi e interpretarlas. Del mismo modo disponemos de una gran cantidad de aplicaciones para comunicarnos de forma remota con el micro desde cualquier dispositivo y todo esto se debe a la popularidad de WiFi en el mercado.

5.3 PC + MSP430 (router LiFi) Nodo óptico

En el caso de la red LiFi no disponemos de módulos específicos, por lo que hay que realizar un montaje algo más complejo que sintetice el funcionamiento de LiFi. Este montaje comienza conectando el módulo láser al ESP8266, del mismo modo conectamos el receptor láser al MSP430. Para mejorar el rendimiento del sistema es preciso orientar ambos dispositivos y colocarlos lo más cerca posible. En el extremo del transmisor el código proporcionado permitirá leer los caracteres introducidos por el teclado en el puerto serie del módulo WiFi. En esta red usaremos el módulo WiFi para poder integrar ambos sistemas posteriormente, sin embargo, no se hará uso de la funcionalidad WiFi en la red LiFi inicial, ya que los datos se reciben directamente por el puerto serie.

Los datos se leen mediante la función read del puerto serie y se reciben en código ASCII. En el caso de la red WiFi el propio módulo interpretaba la señal recibida, pero en este caso debemos configurar el láser para que sea capaz de transmitir la información y al receptor para que tenga el comportamiento esperado. En el capítulo de LiFi vimos que la señal consiste en la presencia o ausencia de pulsos luminosos de una determinada duración. Esta señal debe modularse para evitar posibles interferencias y como estamos realizando una aplicación de baja tasa es recomendable emplear una modulación monoportadora (SCM). Una de las modulaciones más interesantes sería la CSK (Color Shift Modulation), propia de LiFi, pero se trata de una modulación de alta complejidad que necesita tripletes RGB (Red, Green, Blue LED) para codificar la señal.

Una posible opción para el láser del que disponemos es una modulación OOK (On Off Keying). Esta modulación se basa en transmitir pulsos encendiendo y apagando el LED. Al recibir la información en código ASCII podemos expresarla en formato binario para transmitir directamente los unos y ceros apagando y encendiendo el láser respectivamente. Los caracteres no se mezclarán si no se producen interferencias, gracias a que como cada símbolo tiene su propio código ASCII cada uno tendrá su propia secuencia binaria.

Tras probar distintas formas de enviar la secuencia binaria la mejor opción es enviar un pulso como comienzo de trama, avisando de que se va a enviar un nuevo bit. Posteriormente se espera un tiempo de 10 ms, se envía el dato tras el cual hay un nuevo intervalo de espera de 30 ms. Tras enviar el bit es posible que el láser se quede encendido, por lo que se apaga y se espera 40 ms en esta posición. Esta misma rutina se efectúa tantas veces como la longitud de bits de los que disponga el símbolo transmitido. Cuando se termina de transmitir un símbolo se espera durante 100 ms para evitar una interferencia en el caso de que haya más símbolos.

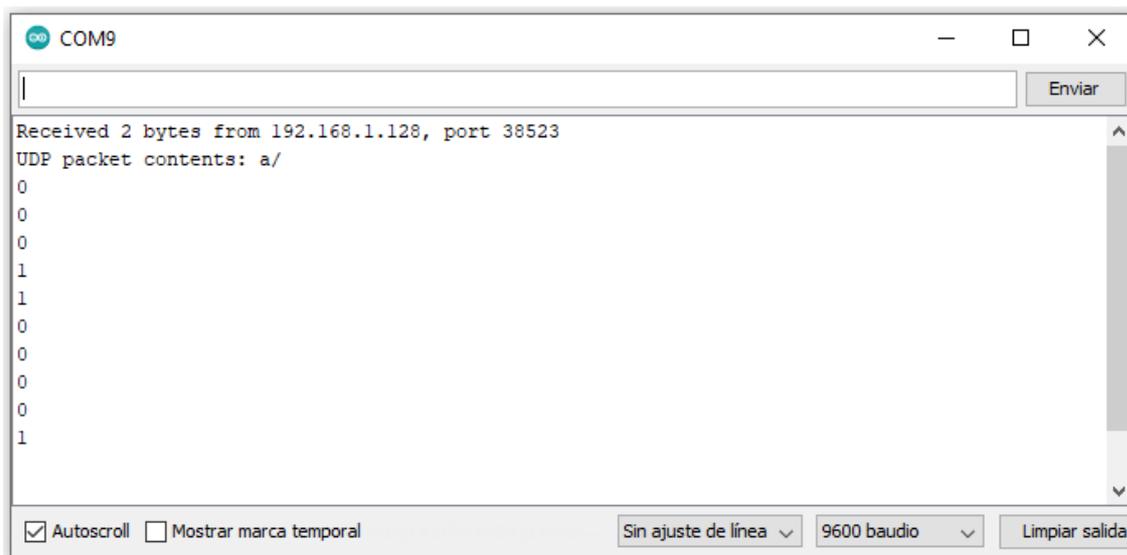


Figura 5-7. Bits transmitidos de la letra a.

En el MSP430 el receptor láser es activo a nivel bajo, tomando valor 0 cuando detecta señal y valor VCC en caso contrario. De esta forma el receptor se mantendrá a la espera hasta recibir el primer pulso luminoso, el cual informa de que se va a enviar información. Posteriormente hay un retraso de 35 ms antes de leer el bit, seguido de otro retraso de 35 ms, así conseguimos reducir la tasa de error. Nuevamente se introduce otro retraso de 100 ms tras recibir la trama completa de bits, para evitar ISI (interferencia entre símbolos). La información recibida está en binario, por lo que tenemos que realizar el proceso contrario y convertirlo a decimal para conseguir representar el carácter enviado. Los datos recibidos se imprimirán en la pantalla del ordenador a través del puerto serie del MSP430.



Figura 5-8. Bits recibidos que se corresponden a la letra a.

Tal y como se puede apreciar en la figura 5-8 los bits recibidos coinciden con los transmitidos, por lo que podemos confirmar el correcto funcionamiento de la red. Siempre se transmiten 10 bits, aunque el carácter ocupe menos espacio, esto se hace para mantener un mejor sincronismo y evitar posibles errores cuando cambie la longitud del símbolo. En la figura 5-8 se puede ver como los bits sobrantes se rellenan con ceros empezando por el bit más significativo.

Con estos pasos la red LiFi está plenamente operativa. El montaje ha sido más complejo que el de WiFi, por lo que puede parecer una tecnología más compleja, pero no es el caso. Como hemos comentado anteriormente el módulo WiFi viene de fábrica con todos los componentes necesarios para realizar la comunicación. Si tuviéramos que crear un sistema equivalente con componentes individuales sería bastante complejo, además tendríamos que cumplir con los requisitos de los estándares 802.11 b/g/n para poder conectar el módulo con un teléfono móvil u ordenador. En el caso de LiFi el montaje ha sido posible gracias a que los dispositivos empleados son más simples y se trata de una comunicación entre dos microcontroladores. si quisiéramos conectarnos con un dispositivo LiFi de algún fabricante habría que adaptarlo al mismo y aumentaría la

complejidad del sistema, pero seguiría siendo inferior al de la red WiFi.

5.4 Red Híbrida WiFi/LiFi

La red híbrida realizada se basa en la conexión de las dos redes explicadas anteriormente mediante la colocación del transmisor láser en el módulo WiFi. Así conseguiremos enviar la información del dispositivo móvil al módulo ESP, luego se enviará por LiFi al MSP430 y finalmente llegará al ordenador por puerto serie USB.

En el caso de la red WiFi no es necesario realizar ninguna modificación en código, pero la incorporación de esta obligará a que los datos enviados por el láser se lean del búfer de

Udp en vez del puerto serie. Los datos almacenados en dicho búfer son de tipo char, por lo que hay que realizar una conversión a int, la cual podemos realizar mediante las funciones `sprintf` y `atoi`. El funcionamiento sería el mismo a la hora de transmitir y recibir por LiFi.

Como se puede apreciar es fácil integrar ambas redes, se puede realizar mediante un controlador que permita conmutar la información de una red a otra, por lo que en el caso de sistema real se podrían desarrollar routers que realicen esta función.

En cuanto a las dificultades que han surgido en el diseño la mayoría se deben a la parte Lifi. Esto se debe a gran parte a la simplicidad de la red desarrollada, en los equipos comerciales no estos problemas no son tan evidentes. No obstante, le podemos sacar partido y conocer mejor los problemas de esta tecnología. El principal obstáculo que nos encontramos son las pérdidas producidas por apuntamiento. La naturaleza de la luz no es capaz de hacer frente a un obstáculo, lo que acaba cortando la comunicación, del mismo modo si la intensidad de la señal luminosa no es suficiente se producen fallos en la detección. En nuestro diseño este problema se ve agravado debido al empleo de un láser monocromático con un haz de luz muy estrecho, lo que provoca errores si no apuntamos directamente al fotodetector. Si nos ponemos a analizar la situación podría no ser malo del todo. Si bien es cierto que un haz estrecho limita mucho el movimiento de los dispositivos, pero en un entorno en el que los desplazamientos sean menores se podrían tener un mayor número de comunicaciones sin provocar interferencias, así como ofrecer una mayor seguridad. En el caso de que queramos remediar el problema se pueden emplear transmisores con un mayor haz, e incluso hay algunos que usan la iluminación de las habitaciones para tener un mayor alcance.

Otro parámetro a tener en cuenta es el compromiso entre el retardo del sistema y la movilidad de los usuarios. Si empleamos retardos muy pequeños para transmitir y recibir los pulsos luminosos cualquier movimiento del transmisor puede hacer que se pierda información. Los retardos que se explicaron en el apartado anterior se han conseguido a base de prueba y error con el objetivo de conseguir un compromiso entre movilidad y rendimiento de la red. Esto se debe a varios factores, entre ellos encontramos el uso de una modulación OOK una de las simples y menos eficientes que existen, el láser y el fotodetector utilizados están pensados para sensores de presencia y aplicaciones simples y no para transmisión de información a gran velocidad, enviar los caracteres directamente en su equivalente ASCII no es la forma óptima de enviar los datos, entre otros. Todo esto se podría solucionar empleando dispositivos que estén diseñados específicamente para LiFi y aplicando algoritmos más elaborados para realizar la comunicación, como puede ser el uso de modulaciones específicas para LiFi, CSK sin ir más lejos.

De igual manera la distancia a la que se encuentran los terminales juega un papel clave en la comunicación. Lo ideal sería que la distancia entre dispositivos fuese cero, pero esto no tiene ninguna utilidad práctica. Tras realizar varias pruebas se ha llegado a la conclusión de que lo más acertado es separar ambos dispositivos una distancia de aproximadamente 10 cm. Se podría pensar que es una distancia insignificante respecto a la velocidad de la luz, pero esto mismo es un problema para procesar los pulsos luminosos. Tras algunas pruebas se comprobó que con retrasos muy pequeños entre símbolos el receptor no era capaz de procesarlos y cuando recibía uno todavía estaba procesando el anterior. Esto ocurre porque no es un sensor adecuado para cambios rápidos de intensidad de señal lumínica, por lo que presenta un mayor retardo de procesamiento. De esta forma si durante la transmisión se acercaba o alejaba demasiado el láser se producían errores de sincronización. En el caso de aumentar los retardos la distancia es también pequeña por el simple hecho de que no es fácil apuntar con un láser monocromático a un sensor tan pequeño, en algún momento se perdería información.

Pero quizás la mejora más importante que se podría realizar es el equilibrio de carga entre ambas redes. El

sistema que se presenta en este trabajo es adecuado para alternar WiFi y LiFi según las limitaciones o parámetros que queramos priorizar, como lo pueden ser la seguridad y rapidez de LiFi o la cobertura más flexible de WiFi. No obstante, en la mayoría de redes domésticas interesa emplear ambas redes a la vez buscando siempre la máxima eficiencia. De esta forma se puede recibir datos paralelamente de LiFi y de WiFi, alternar entre uno y otro según limitaciones o requerimientos, etc. Este es el objetivo que están buscando actualmente los fabricantes y que todavía no han conseguido debido no solo a la dificultad de los algoritmos empleados, sino también a la escasez de estudios dedicados a este apartado.

5.5 Caracterización de la comunicación

Los sistemas LiFi suelen estar pensados para canales LOS (visión directa), ya que a diferencia de las ondas radio los rayos de luz no pueden atravesar obstáculos, además la atenuación que producen en la señal es tan alta que puede llegar a interrumpir la comunicación. Todas las pruebas anteriores se han realizado en este tipo de canal, por lo que han presentado una menor complejidad.

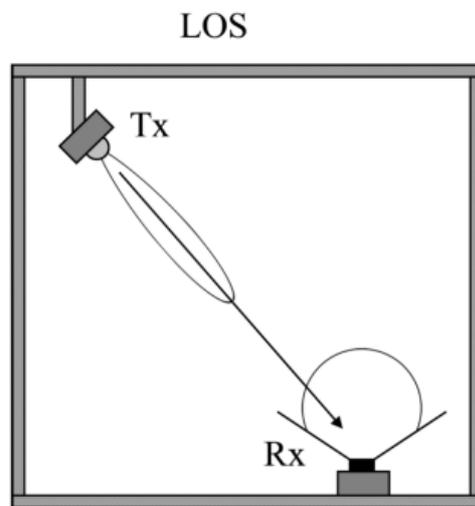


Figura 5-9. Ejemplo de canal LOS.

Si realizamos algunas medidas para este tipo de canal podemos determinar la probabilidad de error de este. Para ello hay que emplear temporizadores en los códigos de los dispositivos, lo que permite medir el tiempo total que tarda en completarse el envío y recepción de datos. Sabiendo que cada carácter tiene 10 bits el cálculo del régimen binario es inmediato (bps). En el caso de la probabilidad de error es más complejo obtenerla. En este caso se ha obtenido enviando un mensaje de 100 caracteres (1000 bits en total). El ensayo se repetirá hasta obtener un resultado congruente. En el terminal receptor se puede comprobar de forma visual los errores y podemos calcular la probabilidad de error en función del número fallos, esta probabilidad de error es la de recibir cada carácter de forma incorrecta, es decir, un fallo en alguno de los 10 bits. Estas medidas se realizarán para varias velocidades las cuales no son arbitrarias, es decir, vienen determinadas por la duración de los pulsos, los cuales deben estar correctamente sincronizados. El resto de valores se pueden conseguir interpolando para tener una estimación de los mismos. Todos estos pasos hay que repetirlos a varias distancias para determinar la influencia del canal en la comunicación. Las distancias a evaluar serán de 0 cm, 10 cm y 20 cm. No son valores muy grandes, pero hay que recordar que estamos trabajando con un láser muy monocromático pensado para aplicaciones de detección de movimiento y no para comunicaciones. En las siguientes gráficas vemos los resultados.

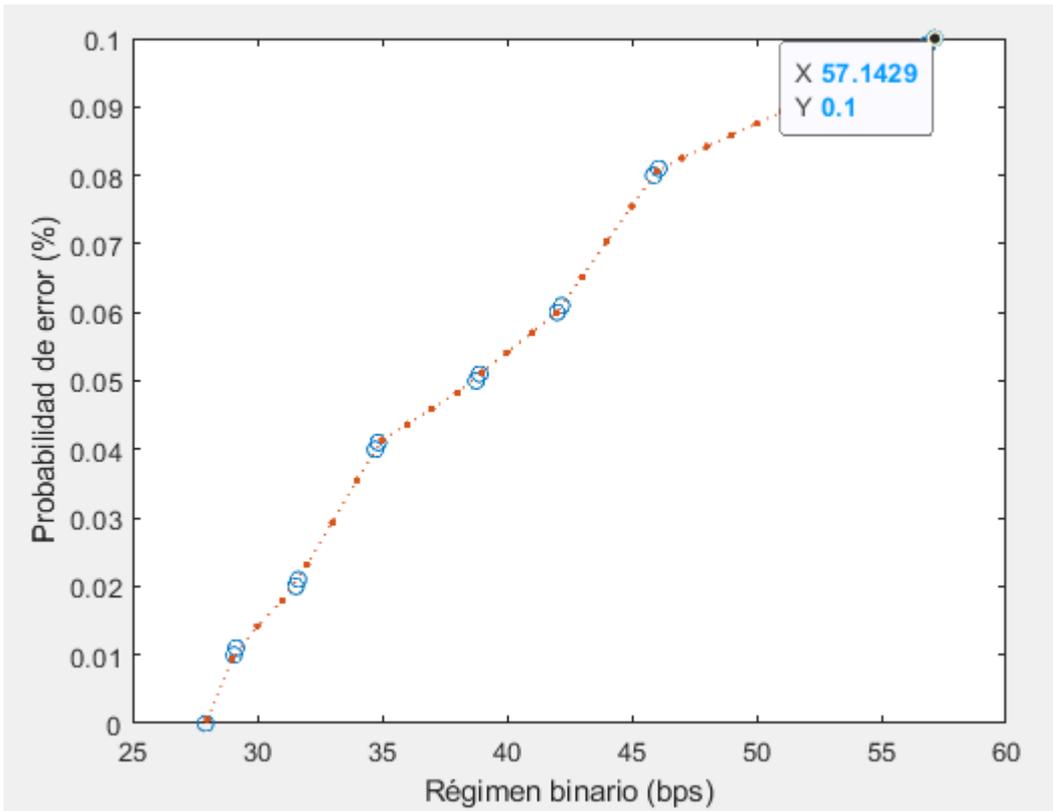


Figura 5-10. Resultados para una distancia de 0 cm.

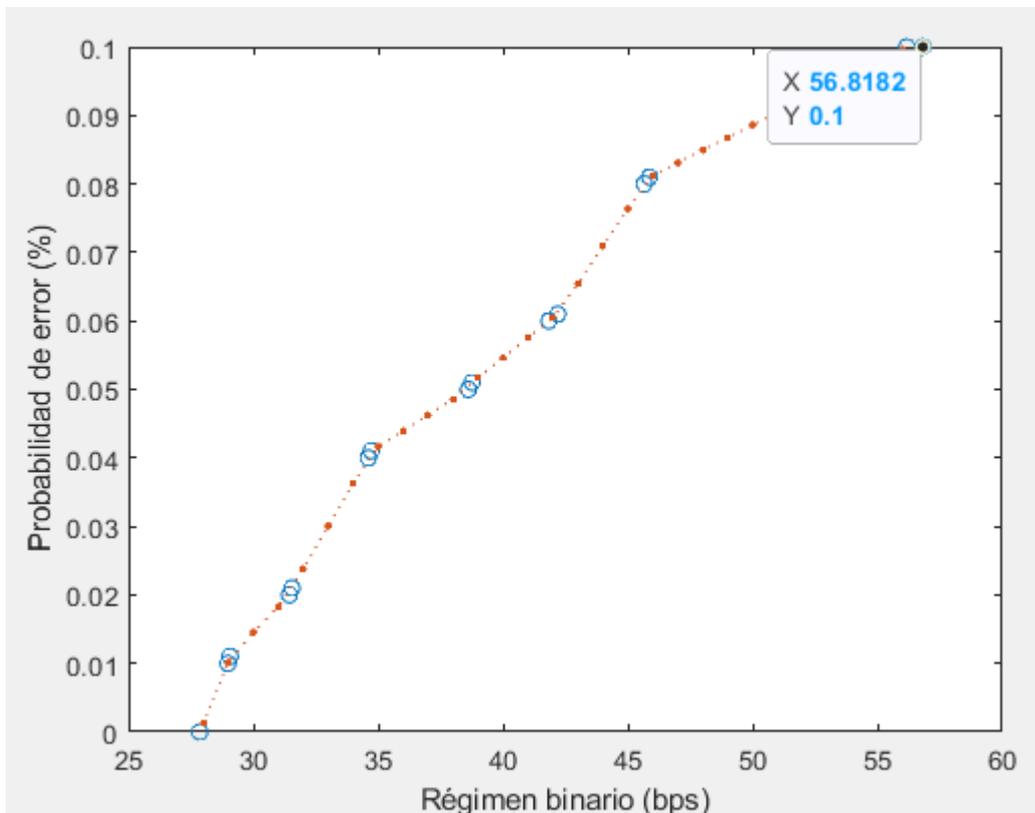


Figura 5-11. Resultados para un canal de 10 cm.

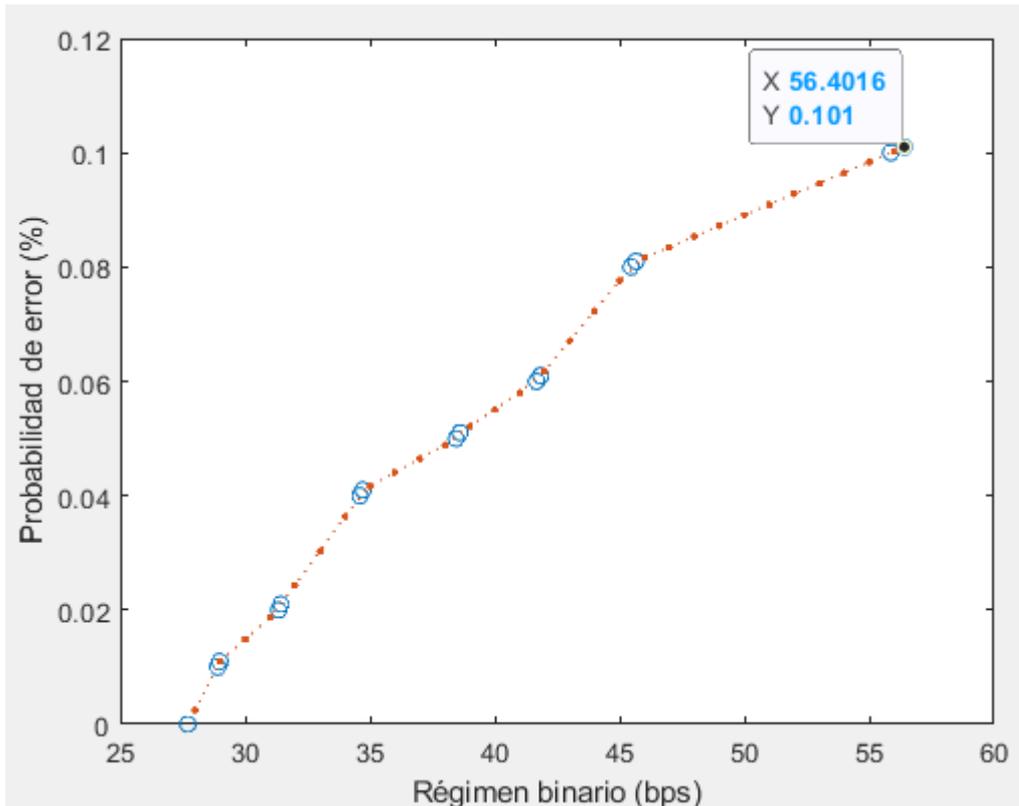


Figura 5-12. Resultados para un canal de 20 cm.

Observando las gráficas podemos ver que se consigue una probabilidad de error de un 0.1% a 57,1429 bps en el primer caso, 56,8182 en el segundo y 56,4016 en el tercero. Las medidas no son exactas, pero vemos que el régimen binario se reduce 0,4-0,5 bps por cada 10 cm de longitud de canal, lo que se traduce en que cada carácter tarda 20 ms más en completarse, o lo que es lo mismo, el canal añade un retraso de alrededor de 2 ms a cada bit transmitido. Esta diferencia se debe a que estamos transmitiendo a velocidades muy bajas, por lo que una pequeña variación en la distancia afecta a los resultados. En el caso de emplear un mayor régimen binario no se apreciaría este efecto, pero las pérdidas serían mayores si en algún momento los dispositivos no están correctamente dirigidos.

Si realizamos las mismas pruebas a una mayor distancia, en el rango de 1,5-2 m, podemos comprobar que a las mismas velocidades de transmisión la probabilidad de error aumenta enormemente y no es viable realizar la comunicación. En la figura 5-12 se aprecia que la probabilidad de error es mucho mayor de la esperada y esto se debe a que no solo influye la distancia del canal, sino también las pérdidas por apuntamiento. Aunque hagamos las medidas con un sistema fijo el haz del láser es muy fino y es complicado apuntar correctamente al fotoreceptor. También influye la atenuación de la fuente de luz, aunque sea pequeña también afecta a la correcta recepción del mensaje. Por tanto, hay que tener en cuenta la longitud del enlace para elegir los componentes adecuados. En el caso de diseñar sistemas de comunicación para exteriores hay que considerar otros parámetros como la iluminancia del ambiente de trabajo. De otra forma el receptor no sería capaz de distinguir las componentes de señal recibidas.

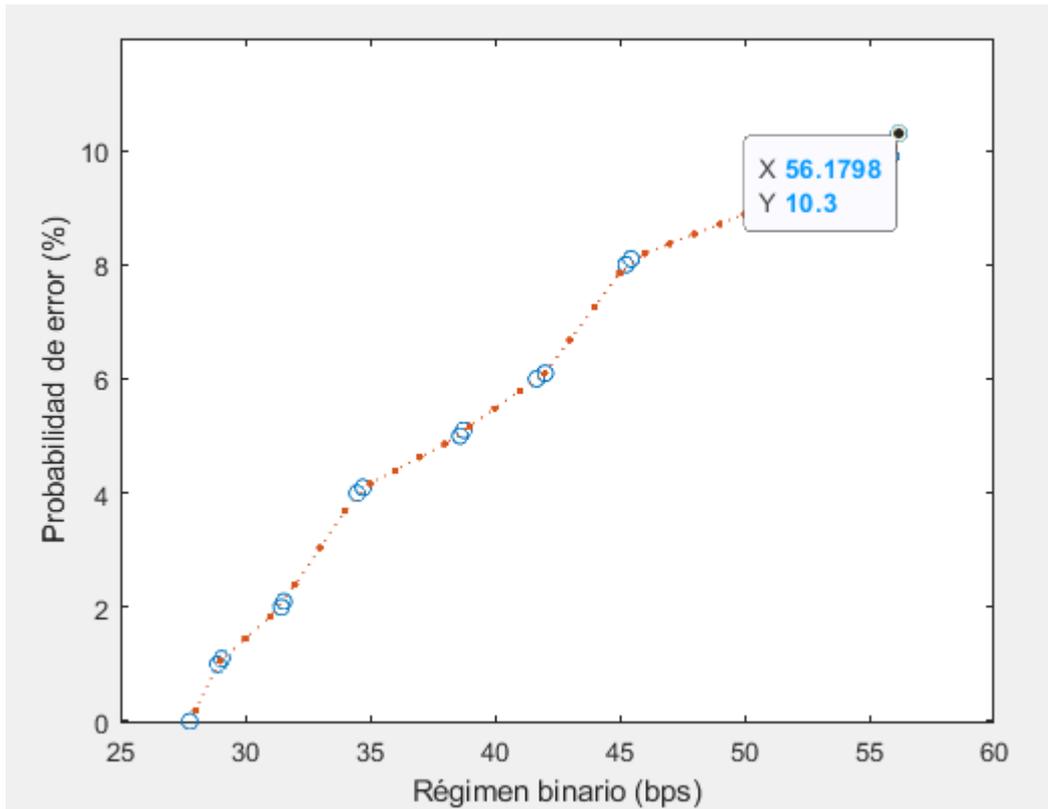


Figura 5-13. Resultados para un canal de 150 cm.

Podemos concluir por tanto que la mejor opción es adecuar la velocidad de la transmisión en función de los dispositivos utilizados y el entorno de trabajo. En el caso de que la fuente de luz sea muy monocromática es preferible que el receptor no se desplace, ya que la comunicación será mucho más complicada en caso contrario. Si el emisor tiene un mayor rango de emisión se conseguirá tener una visión directa con mayor facilidad.

El tipo de canal más común que nos encontramos en la realidad es el NLOS (sin visión directa). Podemos emplear reflectores colocados en posiciones estratégicas para conseguir recibir señal en presencia de obstáculos. Este tipo de aplicación tiene especial relevancia en aplicaciones industriales, donde la cobertura de WiFi no llega a cubrir toda la zona de trabajo debido a las grandes dimensiones de las instalaciones.

directed NLOS

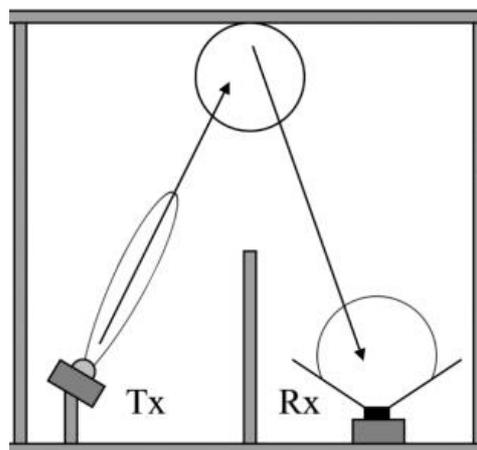


Figura 5-14. Ejemplo de canal NLOS.

En el montaje realizado en este trabajo estamos empleando un láser con una gran potencia y un haz de visión

muy pequeño, por lo que podemos aprovechar estas características y conseguir un canal NLOS. Para ello podemos colocar un reflector (un espejo) e incidir la luz del láser directamente sobre este, de modo que si el ángulo que forma el pulso luminoso con la normal del espejo es mayor al ángulo crítico se reflejará la mayoría de la energía incidente y la comunicación será viable. El ángulo crítico se puede calcular conociendo el índice de refracción del aire y del material del espejo, pero también se puede obtener de forma experimental orientando el láser hasta que incida en el fotodetector.

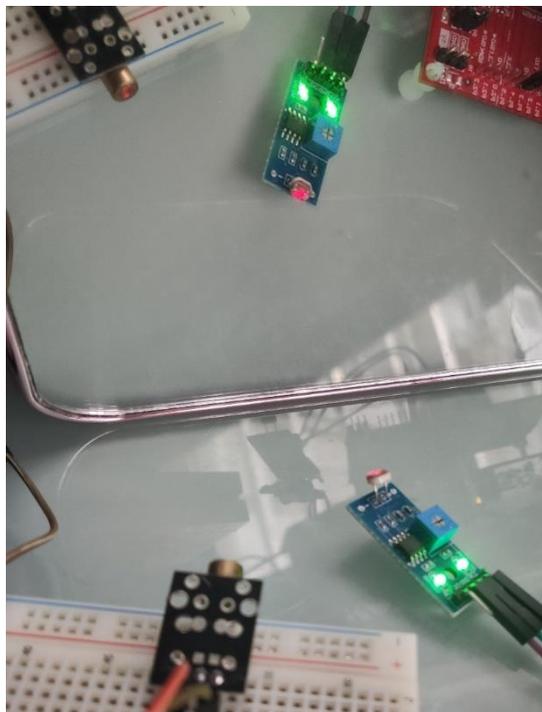


Figura 5-15. Canal NLOS del montaje.

Si repetimos las medidas en este tipo de canal obtenemos prácticamente los mismos resultados. Esto se al tipo de láser empleado. En los canales NLOS el mayor problema es la atenuación que sufren los rayos de luz con las reflexiones y la mayor distancia que recorren estos rayos respecto a los que tienen visión directa. De esta forma si colocamos los dispositivos a la misma distancia el rayo de luz recorre 2-3 cm más (en el primer caso dejan de ser 0 cm), por lo que no hay prácticamente variación. En cuanto a la atenuación el impacto es también pequeño gracias a que el láser tiene una luz muy monocromática y concentrada, por lo que el sistema seguiría funcionando del mismo modo que en el canal LOS, requiriendo en ambos casos una iluminación algo inferior a la ambiental del orden de 200-300 lux. El receptor empleado en el montaje permite variar sensibilidad en función de las necesidades.

Otra de las complicaciones que presentan los canales NLOS es el apuntamiento. El láser puede reflejarse y conseguir llegar al receptor, pero si algún dispositivo está en movimiento es muy difícil dirigir la luz correctamente, ya que el haz de luz es muy estrecho. Esto se soluciona si usamos una fuente de luz con un haz mayor, gracias a que se reflejarán un mayor número de rayos de luz y habrá más posibilidades de que alguno llegue, pero también aparecerá un problema de interferencia. Si un rayo llega retrasado respecto a otro se pueden mezclar los símbolos, por lo que el sistema debe ser robusto frente a interferencias.

Por tanto, hay que tener en cuenta el tipo de emisor empleado y la movilidad de los usuarios. En el caso de que el sistema sea fijo se puede emplear un LED con una luz muy monocromática y no afectaría a la comunicación, pero si el receptor se encuentra en movimiento la sincronización tiene que ser muy exacta para seguir funcionando a la misma tasa. Otra opción sería utilizar un emisor con una emisión menos concentrada, de forma que sea capaz de comunicarse con el receptor aunque cambie su posición.

5.6 Conclusiones

A la hora de diseñar una HLWNet es necesario realizar un estudio previo tanto de la red híbrida en sí como de las redes independientes. Hay que analizar el tipo de transmisor y receptor más adecuado en función de si el entorno es interior, exterior, presenta obstáculos, elementos que atenúen la señal, entre otros. En el caso de WiFi hay que realizar un estudio de cobertura y de planificación WiFi, calculando el estándar necesario y el número de routers necesarios para cubrir la zona de cobertura. Para LiFi es esencial conocer si el canal es LOS o NLOS, ya que para cada tipo es adecuado un tipo de transmisor y receptor, así como los reflectores que hay que emplear en NLOS.

En cuanto a la red híbrida, en el montaje experimental hemos podido corroborar los principios de diseño discutidos en los apartados anteriores. La gran mayoría de ellos se deben a las limitaciones que presenta la naturaleza de la luz y esto se debe a que LiFi aún es una tecnología reciente y todavía no se ha explotado todo su potencial. Por otro lado, WiFi es una tecnología mucho más madura, con un gran impacto en el mercado y en la vida cotidiana de todos nosotros. En el caso de las HLWNets se desconocen todavía la mayoría de sus posibilidades. En gran parte esto se debe a que en un comienzo LiFi se planteó como una tecnología sustituta de WiFi, pero con el tiempo se ha llegado a la conclusión de que la mejor opción es integrarlas y aprovechar la complementariedad que presentan entre ellas. En un futuro cercano es muy posible que se extienda el uso de estas redes híbridas y se consiga paliar la escasez de espectro radioeléctrico que existe hoy en día.

REFERENCIAS

- [1] <https://ipoint-tech.com/wireless-networking-wi-fi-advantages-and-disadvantages-to-wireless-networking/>
- [2] <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-WiFi.html>
- [3] <https://www.muycomputerpro.com/movilidad-profesional/2015/02/04/conectividad-inalambrica/>
- [4] <https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/que-es-wifi-como-funciona/>
- [5] https://www.researchgate.net/figure/Figura-A1-Componentes-de-la-arquitectura-de-redes-IEEE-80211_fig15_31553016
- [6] <https://zaragozmakerspace.com/index.php/introduccion-al-iot/>
- [7] https://www.profesionalreview.com/2020/03/07/wlan-que-es/#Diferencias_con_una_LAN_80211_vs_8023
- [8] <https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/wifi.pdf>
- [9] <https://www.computerworld.es/telecomunicaciones/80211-explicacion-de-las-normas-y-velocidades-de-wifi>
- [10] https://www.coit.es/sites/default/files/informes/pdf/la_situacion_de_las_tecnologias_wlan_basadas_en_el_estandar_ieee_802.11_y_sus_variantes_wi-fi.pdf
- [11] <https://www.wifisafe.com/blog/componentes-basicos-del-ieee-802-11/>
- [12] <https://internetpasoapaso.com/wifi/>
- [13] <https://softwarelab.org/es/que-es-wifi-que-significa-y-para-que-sirve/>
- [14] https://moodle2019-20.ua.es/moodle/pluginfile.php/54921/mod_resource/content/13/tema/elementos_basicos_de_una_red_wifi.html
- [15] <https://www.profesionalreview.com/2020/08/15/componentes-fisicos-de-una-red/>
- [16] <https://www.redeszone.net/2017/09/02/componentes-router-parte-externa-e-interna/>
- [16] <https://sites.google.com/site/cbl011012/ieee-802-11>
- [17] https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf

- [18] https://www.ecured.cu/Est%C3%A1ndar_inal%C3%A1mbrico_802.11b
- [19] <https://www.compartirwifi.com/blog/origen-de-donde-viene-y-que-significa-la-palabra-wi-fi/>
- [20] <https://es.ihowto.tips/did-you-know/ce-reprezinta-standardele-wi-fi-ieeee-802-11a-802-11b-g-n-si-802-11ac-ale-unui-router-wireless.html>
- [21] https://shopdelta.eu/802-11g-estandar-de-la-red-inalambrica_l6_aid727.html
- [22] <https://www.computerworld.es/wifi/80211-estandares-de-wifi-y-velocidades>
- [23] https://shopdelta.eu/802-11n-estandar-de-la-red-inalambrica_l6_aid756.html
- [24] https://shopdelta.eu/802-11ac-estandar-de-la-red-inalambrica_l6_aid898.html
- [25] https://www.wni.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=75:80211ac&catid=31:general
- [26] https://www.cisco.com/c/es_mx/products/wireless/what-is-wifi.html
- [27] https://www.ecured.cu/Tecnolog%C3%ADa_Wi-Fi
- [28] https://techlandia.com/funciona-tecnologia-wifi-como_10752/
- [29] <https://www.netspotapp.com/es/blog/all-about-wifi/what-is-wifi.html>
- [30] https://www.researchgate.net/publication/28141277_Analisis_experimental_de_un_ambiente_wi-fi_multicelda
- [31] <http://marismas-emtt.blogspot.com/2010/11/canales-80211.html>
- [32] http://www.reydes.com/d/?q=Canales_802_11_b_g
- [33] <https://spie.org/news/photronics-focus/janfeb-2021/lifi?SSO=1>
- [34] J. Patel, P. Trivedi and D. Patel, "A Performance Analysis of "Light Fidelity" and "Internet of Things" & It's Application," *2017 International Conference on Transforming Engineering Education (ICTEE)*, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTEED.2017.8585696.
- [35] K. T. Swami and A. A. Moghe, "A Review of LiFi Technology," *2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRAIE51050.2020.9358340.
- [36] V. Jungnickel *et al.*, "LiFi for Industrial Wireless Applications," *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2020, pp. 1-3.
- [37] S. H. Ali, S. P., G. R. Embedded and M. J., "Design and Evaluation of LiFi Module for Audio Applications," *2018 15th IEEE India Council International Conference (INDICON)*, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/INDICON45594.2018.8987134.
- [38] R. A. A. Othman, D. a. Sagarán, M. Mokayef and W. I. I. R. b. W. M. Nasir, "Effective LiFi communication for IoT applications," *2018 IEEE 4th International Symposium in Robotics and*

Manufacturing Automation (ROMA), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ROMA46407.2018.8986698.

- [39] H. Haas, L. Yin, Y. Wang and C. Chen, "What is LiFi?," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, 15 March 2016, doi: 10.1109/JLT.2015.2510021.
- [40] http://www.homepages.ed.ac.uk/hxh/Li-Fi_PAPERS/LiFi_Workshop_Haas.pdf
- [41] Cárdenas Villavicencio, O. E., Molina Ríos, J. R., Morocho Román, R. F., Novillo Vicuña, J. P., & Moreno Sotomayor, G. R. (2017). Estudio entre las tecnologías WIFI – LIFI en la optimización del servicio de internet. *Journal of Science and Research*, 2(8), 50-53. <https://doi.org/10.26910/issn.2528-8083vol2iss8.2017pp50-53>
- [42] M. A. Leguizamón-Páez, J. Rojas-Pineda y E. C. Rodríguez-Sánchez, “Luz visible y su integración con la internet de las cosas”. *Revista Vínculos*, vol. 16, no. 1, enero-junio de 2019, pp. XX-XX. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.15281>
- [43] <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/li-fi-communication-between-two-arduino>
- [44] B. Sukanya and V. Palliyembil, "Performance Improvement of Indoor Lifi Mobile Users with Random Orientation Using Hybrid Lifi and Wifi Networks (HLWNets)," *2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2021, pp. 390-394, doi: 10.1109/WiSPNET51692.2021.9419442.
- [45] X. Wu, M. D. Soltani, L. Zhou, M. Safari and H. Haas, "Hybrid LiFi and WiFi Networks: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 1398-1420, Secondquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3058296.
- [46] <https://electronics-project-hub.com/simple-li-fi-circuit-using-transistor/>
- [47] <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/sending-email-using-arduino-and-esp8266-wi-fi-module>
- [48] <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/sending-email-using-msp430-and-esp8266>
- [49] <https://www.luisllamas.es/arduino-wifi-esp8266-esp01/>
- [50] <https://www.luisllamas.es/guia-de-programacion-del-esp8266-en-entorno-arduino/>
- [51] <https://github.com/esp8266/Arduino>
- [52] <https://learn.adafruit.com/adafruit-huzzah-esp8266-breakout/using-arduino-ide>
- [53] <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/doc/esp8266wifi/udp-examples.rst#an-udp-packet-arrived>
- [54] <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/doc/esp8266wifi/udp-examples.rst#an-udp-packet-arrived>
- [55] <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/doc/esp8266wifi/station-examples.rst>
- [56] <https://github.com/esp8266/Arduino/tree/master/doc/esp8266wifi>

- [57] https://nerd-corner.com/sending-text-messages-with-visible-light-communication/#google_vignette
- [58] <https://create.arduino.cc/projecthub/hamiran1997/li-fi-system-36ff5b>
- [59] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light," in *IEEE Std 802.15.7-2011*, vol., no., pp.1-309, 6 Sept. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195.
- [60] <https://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/Download.html>
- [61] https://www.researchgate.net/profile/Syifaul-Fuada/publication/341401378_Prototyping_the_Li-Fi_System_Based_on_IEEE_802157_PHYII1_Standard_Compliance/links/5ec20c17299bf1c09ac4c286/Prototyping-the-Li-Fi-System-Based-on-IEEE-802157-PHYII1-Standard-Compliance.pdf

ANEXO

En este anexo se muestran los códigos empleados en cada microprocesador. El código del módulo WiFi sería el siguiente.

```
WiFiUDP Udp;

unsigned int localUdpPort = 4210; // Puerto de escucha
char incomingPacket[255]; // buffer para recibir los paquetes
char replyPacket[] = "The message was recived"; // Mensaje de respuesta

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  Serial.println();

  WiFi.begin("MIWIFI_2G_hrxa", "aiwv4y4vm3vh");

  Serial.print("Connecting");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println();

  Serial.print("Connected, IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  Udp.begin(localUdpPort);
  Serial.printf("Escuchando en IP %s, puerto UDP %d\n", WiFi.localIP().toString().c_str(), localUdpPort);
}

void loop()
{
```

```

int packetSize = Udp.parsePacket();
if (packetSize)
{
  // receive incoming UDP packets
  Serial.printf("Recividos %d bytes de %s, puerto %d\n", packetSize, Udp.remoteIP().toString().c_str(),
Udp.remotePort());
  int len = Udp.read(incomingPacket, 255);
  if (len > 0)
  {
    incomingPacket[len] = 0;
  }
  Serial.printf("Contenido paquete UDP: %s\n", incomingPacket);

  // Enviamos la respuesta
  Udp.beginPacket(Udp.remoteIP(), Udp.remotePort());
  Udp.write(replyPacket);
  Udp.endPacket();
}
}

```

El código del transmisor LiFi se encuentra a continuación.

```

int incomingByte = 0; // Datos recibidos por el puerto serie
const int LED = 16;

void setup()
{
  pinMode(LED, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if (Serial.available() > 0)
  {
    incomingByte = Serial.read();
    int a[10], i;
    for(i=0; i<10; i++)

```

```

{
  a[i]=incomingByte%2;
  incomingByte= incomingByte/2;
  if(incomingByte<0)
  {
    a[i]=0;
  }
}

for(i=i-1 ;i>=0 ;i--)
{
  digitalWrite(LED,HIGH);
  delay(10);
  digitalWrite(LED,a[i]);
  delay(30);
  digitalWrite(LED,LOW);
  delay(40);
}
delay(100);
}
}

```

En el extremo receptor se emplea este código. Es válido para la red LiFi y para la híbrida.

```

#define Receptor P1_3
int sensorValue=1;
int a[10];

void setup()
{
  pinMode(Receptor, INPUT_PULLUP);
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if(digitalRead(Receptor)==LOW)

```

```

{
  for (int i=0;i<10;i++)
  {
    while(digitalRead(Receptor)==HIGH);
    delay(35);
    a[i]=!digitalRead(Receptor);
    delay(35);
  }
  delay(100);
  int m=decimal(a);
  char l= char(m);
  Serial.print(l);
}
}

```

```

int decimal(int c[])
{
  int i, j=0 , decimal=0, temp;
  for(i=9;i>=0;i--)
  {
    temp=c[i];
    for(int m=0;m<j;m++)
    temp=temp*2;
    decimal=decimal +temp;
    j++;
  }
  return decimal;
}

```

En caso de usar la red híbrida el primer código queda de la siguiente forma.

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>

```

```

WiFiUDP Udp;

```

```

unsigned int localUdpPort = 4210; // local port to listen on
char incomingPacket[255]; // buffer for incoming packets
char replyPacket[] = "Hi there! Got the message :-)"; // a reply string to send back
const int LED = 16;
int incomingByte = 0;
char numero[10];

void setup()
{
  pinMode(LED, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println();

  WiFi.begin("MIWIFI_2G_hrx", "aiwv4y4vm3vh");

  Serial.print("Connecting");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println();

  Serial.print("Connected, IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  Udp.begin(localUdpPort);
  Serial.printf("Now listening at IP %s, UDP port %d\n", WiFi.localIP().toString().c_str(), localUdpPort);
}

void loop()
{
  int packetSize = Udp.parsePacket();
  if (packetSize)
  {
    // receive incoming UDP packets

```

```

Serial.printf("Received %d bytes from %s, port %d\n", packetSize, Udp.remoteIP().toString().c_str(),
Udp.remotePort());
int len = Udp.read(incomingPacket, 255);
if (len > 0)
{
    incomingPacket[len] = 0;
}
Serial.printf("UDP packet contents: %s\n", incomingPacket);

// send back a reply, to the IP address and port we got the packet from
Udp.beginPacket(Udp.remoteIP(), Udp.remotePort());
Udp.write(replyPacket);
Udp.endPacket();
for(int j = 0; j<String(incomingPacket).length()-1; j++)
{
    sprintf(numero,"%d",int(incomingPacket[j]));
    incomingByte = atoi(numero);
    int a[10], i ;
    for(i=0; i<10; i++)
    {
        a[i]=incomingByte%2;

        incomingByte= incomingByte/2;
        if(incomingByte<0)
        {
            a[i]=0;
        }
    }
}

for(i=i-1 ;i>=0 ;i--)
{
    digitalWrite(LED,HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(LED,a[i]);
    delay(30);
    digitalWrite(LED,LOW);
    delay(40);
}

```

```
    delay(100);
```

```
  }
```

```
}
```

```
}
```