

Tecnología LiFi en la práctica: Diseño e implementación de pruebas de desempeño en dispositivos LiFi

LiFi technology in practice: Design and implementation of LiFi device performance tests

Johan Castro - Fernández¹, Oscar Tobar-Rosero ², Octavio Díaz-Mendoza ³, Germán Zapata-Madrigal⁴, Oscar Área-Salamanca⁵, Rodolfo García- Sierra⁶

¹Grupo T&T, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. correo electrónico: jocastro@unal.edu.co

²Grupo T&T, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. correo electrónico: oatobarr@unal.edu.co

³Grupo T&T, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. correo electrónico: oddiazm@unal.edu.co

⁴Grupo T&T, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. correo electrónico: gdzapata@unal.edu.co

⁵Generation Energies Digital Hub, Enel Colombia, Colombia. correo electrónico: oscar.arias@enel.com

⁶Observatorio Innovación, Enel Colombia, Colombia. correo electrónico: rodolfo.garcia@enel.com

Recibido: 28/06/2023. Aceptado: 27/08/2023. Versión final: 01/10/2023

Resumen

La tecnología de comunicación inalámbrica por luz visible, conocida también como Li-Fi, surge como una de las tecnologías de comunicación más prometedoras debido a su capacidad de transmitir datos de una manera no convencional. Aunque existen estudios que sugieren que Li-Fi puede ser un complemento valioso a las tecnologías inalámbricas existentes, estas investigaciones no abordan de lleno la conectividad constante y la seguridad cibernética necesarias para el uso de protocolos de comunicación en tiempo real en sistemas de automatización industrial. En este trabajo, se evalúa el desempeño de la conexión inalámbrica de dispositivos Li-Fi comerciales. Para esto, se diseñó e implementó una estructura para evaluar la conectividad constante, velocidad de transmisión y recepción utilizando protocolos de red como ICMP, así como la compatibilidad con protocolos industriales de subestaciones como PTP, GOOSE, y MMS. Se encontró que Li-Fi tiene una buena compatibilidad con estos protocolos, pero presenta desafíos en términos de disponibilidad, rendimiento y tiempos de transferencia prolongados en algunos casos particulares. En síntesis, aunque Li-Fi puede ser un complemento valioso a las tecnologías inalámbricas existentes, todavía hay desafíos importantes a resolver antes de su adopción generalizada en sistemas de automatización industrial.

Palabras clave: Tecnología Li-Fi, pruebas de desempeño, tiempo real, comunicación industrial, Light Fidelity (Li-Fi), IEC61850, automatización industrial.

Abstract

Visible light wireless communication technology, also known as Li-Fi, is emerging as one of the most promising communication technologies due to its ability to transmit data in an unconventional manner. Although there are studies

Como citar: J. Castro, O. Tobar, O. Díaz, G. Zapara, O. Área, R. García., “Tecnología LiFi en la práctica: Diseño e implementación de pruebas de desempeño en dispositivos LiFi,” in *XI Simposio Internacional de Calidad de la Energía Eléctrica*, Valledupar: Universidad Nacional de Colombia, Nov. 2023. doi: <https://doi.org/10.15446/sicel.v11.109690>

suggesting that Li-Fi can be a valuable complement to existing wireless technologies, these investigations do not fully address the constant connectivity and cyber security required for the use of real-time communication protocols in industrial automation systems. In this work, the wireless connectivity performance of commercial Li-Fi devices is evaluated. For this, a framework was designed and implemented to evaluate the constant connectivity, transmission and reception speed using network protocols such as ICMP, as well as the compatibility with industrial protocols at substation such as PTP, GOOSE, and MMS. Li-Fi was found to have good compatibility with industrial substation protocols, but presents challenges in terms of availability, performance and long transfer times in some cases. In summary, while Li-Fi can be a valuable complement to existing wireless technologies, there are still significant challenges to resolve before its widespread adoption in industrial automation systems.

Keywords: Li-Fi technology, performance tests, real time, industrial communication, Light Fidelity (Li-Fi), IEC61850, industrial automation.

1. Introducción

La tecnología de comunicación por luz visible, también conocida como Li-Fi, se ha destacado en el campo de las comunicaciones debido a su capacidad para enviar información utilizando la parte del espectro de radiofrecuencia que raramente se utiliza [1][2][3].

Los sistemas Li-Fi ofrecen velocidades de transmisión de datos que varían desde Mbps hasta Gbps, llegando incluso a superar los 90 Gbps, lo que es aproximadamente 100 veces más rápido que 5G [4][5]. Además de su velocidad, Li-Fi se considera una opción más segura en comparación con las comunicaciones convencionales, ya que codifica y transmite datos a través de un canal directo [6]; A diferencia de las ondas de radio, la luz no atraviesa las paredes, lo que dificulta que los intrusos intercepten las comunicaciones Li-Fi a través de una red inalámbrica [7][8].

Li-Fi es objeto de investigación continua en diversos ámbitos de aplicación, que incluyen la comunicación entre vehículos y semáforos inteligentes, instalaciones de generación de energía, comunicaciones submarinas y aeronáuticas, así como en cualquier entorno donde no sea viable la transmisión mediante ondas de radio o donde se vean posibilidades de mejorar la transferencia de datos mediante esta tecnología [2][9][10]. En los últimos 10 años, se han llevado a cabo investigaciones significativas sobre los sistemas de comunicación Li-Fi, en aspectos como el aumento de la velocidad de transmisión de datos, la seguridad de la comunicación, la mejora de la eficiencia espectral y el desarrollo de dispositivos y sistemas Li-Fi más avanzados [11][12].

En [1], se exponen los resultados obtenidos de una prueba de concepto que involucra la implementación de redes híbridas Li-Fi /Wifi en una escuela en Escocia, con la participación simultánea de 22 usuarios. Los hallazgos indican que las redes Li-Fi muestran un rendimiento ligeramente inferior en comparación con la red Wifi cuando se consideran velocidades objetivo de 1 y 3 Mbps para cada usuario. Además, se observó que la presencia

de Li-Fi generó un aumento en la velocidad de transmisión de datos en las aulas adyacentes que solo utilizaban Wifi. Este fenómeno se debe a la capacidad de Li-Fi para descargar parte del tráfico de datos de la red Wifi, reduciendo así la congestión en esta.

De manera similar, en el artículo [13], se lleva a cabo una comparación entre la tecnología Li-Fi de la marca TruLi-Fi, la conexión por cable Gigabit-Ethernet y la conexión inalámbrica Wifi en la banda de 2.4 GHz. Se emplean métricas de calidad de servicio, tales como Throughput, ancho de banda y velocidades de subida y bajada, y se concluye que los dispositivos Li-Fi compiten con estas tecnologías y, en algunos casos, mejoran la calidad de servicio en redes locales, especialmente en lo que respecta a la estabilidad en la transmisión de recursos multimedia y la descarga de archivos desde internet. Además, se observa que estos dispositivos Li-Fi tienen un mayor consumo de energía en comparación con sus competidores y presentan un precio más elevado.

En [14], se realizan aplicaciones orientadas a la integración de las tecnologías 5G y Li-Fi para mejorar la eficiencia de las fábricas inteligentes en la empresa WeidMuller. En este contexto, 5G se encarga de proporcionar una cobertura completa de movilidad, mientras que Li-Fi desempeña un papel crucial al aliviar la infraestructura basada en radio frecuencia y mejorar la comunicación en redes inalámbricas en áreas con una alta densidad de datos. Estas mejoras se logran mediante el uso de técnicas de adaptación de enlace MIMO (Multiple Input Multiple Output), que permiten ajustar de manera automática los parámetros de transmisión y recepción para optimizar la eficiencia del enlace. Además, se emplean técnicas de traspaso vertical entre 5G y Li-Fi, lo que habilita la transición de una red a otra sin que el usuario perciba cambios notables en la conectividad.

Los estudios experimentales presentados en estos artículos sugieren que existen áreas clave que pueden ser optimizadas para mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas, y que Li-Fi puede ser un complemento valioso para ello. A pesar de los avances y beneficios

potenciales que LiFi podría ofrecer, ha encontrado su principal aplicación en oficinas e instituciones educativas como un nodo de acceso a Internet [11], [15]. Sin embargo, su adopción en aplicaciones industriales plantea desafíos y cuestionamientos en cuanto a su rendimiento y compatibilidad en este entorno específico.

Por lo tanto, es importante analizar y calificar la tecnología LiFi y su impacto en el desarrollo de estas comunicaciones [12][16]. Aquí, es importante considerar la compatibilidad de la tecnología para la transferencia de diferentes tipos de datos, así como las velocidades requeridas en ciertos procesos industriales, particularmente aquellos de mayor criticidad [9][11].

En este documento, se lleva a cabo una evaluación de la tecnología LiFi en aplicaciones industriales. Inicialmente, en una primera etapa se realizará una comparación directa con Ethernet, la tecnología líder en comunicaciones, en términos de velocidad de transmisión, latencia y ancho de banda. Posteriormente, se examina la capacidad de LiFi para mantener una conectividad constante en diferentes escenarios operativos y los tiempos requeridos para restablecer la conexión después de una interrupción.

Como segunda etapa, se estudia su integración con protocolos industriales en un entorno de subestaciones eléctricas; como PTP (Precision Time Protocol) para la sincronización de tiempo y MMS (Manufacturing Message Specification) utilizado para la supervisión y el control de equipos desde el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Asimismo, se estudia el protocolo GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event), empleado en la transmisión de eventos críticos y señales de control en subestaciones, con el propósito de evaluar su desempeño en relación con un protocolo que implica tiempos de transmisión relativamente cortos. Estas evaluaciones se ejecutan utilizando sistemas de comunicación LiFi comerciales, ya que inicialmente representan la opción más accesible y adecuada para pruebas piloto o aplicaciones en entornos industriales operativos [17], además de switches de comunicación, un relé de protección y computadores con un software sniffer capturar el tráfico.

El resto del documento sigue la siguiente estructura. En la Sección II, se presenta el funcionamiento de la tecnología LiFi, específicamente como punto de acceso a internet. La Sección III abarca la descripción detallada de las pruebas realizadas. La Sección IV presenta los resultados obtenidos tras la implementación. Finalmente, en la Sección V se exponen las conclusiones del trabajo.

2. Operación de la Tecnología LiFi

Li-Fi es un sistema de transmisión de datos que utiliza la luz emitida por un diodo LED (Light Emitting Diode) para lograr velocidades de transmisión elevadas [1][18]. Su funcionamiento se basa principalmente en el uso de diodos LED, que son dispositivos semiconductores contruidos con materiales de alta conductividad térmica y eléctrica, además de baja capacitancia. Estas características les permiten una conmutación (encendido y apagado) de la corriente y la iluminación muy rápida [19].

Esto posibilita la transmisión de información al modular (encriptar) la luz a diferentes frecuencias e intensidades, que luego es capturada por un fotodetector encargado de convertir la energía lumínica de vuelta en una señal eléctrica [20].

La Figura 1 ilustra una infraestructura típica utilizada para acceder a Internet mediante la tecnología Li-Fi, que requiere dispositivos específicos conocidos como transceptores y dongles. El transceptor emite los datos a través de un haz de luz modulado, generado por una bombilla LED, hacia el dongle, que puede estar instalado en un techo o una pared. El dongle, por su parte, se conecta a otros dispositivos como computadoras o smartphones e incorpora su propio transceptor Li-Fi, que desmodula la información del haz de luz, permitiendo así una transmisión bidireccional e inalámbrica de datos [21].

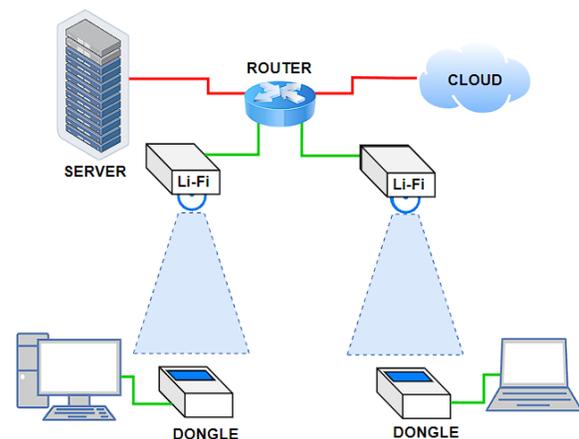


Figura 1. Arquitectura LiFi para acceso a internet

3. Metodología propuesta

Los dispositivos LiFi utilizados en estas pruebas son de la marca Trulifi de Signify, que distribuye en Colombia y cuyas especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones Generales Del Dispositivo Lifi Trulifi 6014.01

Mode of operation	Point-to-Point/Point-to-Multipoint
Modulation	OFDM (ITU G.9991 standard ready)
Max. operating range	0.7m – 20 m
Wavelength	940 nm
Net Speed	528 Mbps upload / 528 Mbps Download
Latency	< 3 ms
Security	128-bit AES CCMP Encryption
Network connections	Ethernet (100/1000Base-T LAN interface)
Device powering options	1. Via IEEE 802.3af PoE (Type 1)

El dispositivo fue configurado mediante una interfaz web tal como especifica el fabricante, eligiendo el modo automático de emparejamiento y una encriptación de los datos. A continuación, se describen las pruebas consideradas en el proceso de evaluación.

3.1. Pruebas de velocidad de transmisión, latencia y ancho de banda

La latencia se mide como el intervalo de tiempo necesario para que los datos se desplacen de un punto a otro, considerando cualquier retraso adicional. Por otro lado, el ancho de banda y la velocidad de transmisión son conceptos interrelacionados pero distintos.

El ancho de banda refleja la capacidad máxima de un canal de comunicación, mientras que la velocidad de transmisión indica la cantidad de información por unidad de tiempo que efectivamente se transmite en un instante específico. Ambos se expresan en términos de bits por segundo o sus unidades derivadas (Kbps, Mbps, Gbps) [22].

En esta evaluación se comparan la tecnología LiFi con una arquitectura de comunicación convencional Ethernet, en la que se incluyen 2 dispositivos tipo Switches con puertos Gigabit-Ethernet como componentes centrales en la red y cable de red UTP CAT 6 como medios de conexión entre los elementos de la infraestructura y dos computadores para la captura de información. Estos equipos tienen un excelente rendimiento en la transferencia de información y sus capacidades de procesamiento y nivel de tráfico pueden variar en función del entorno y los requisitos técnicos.

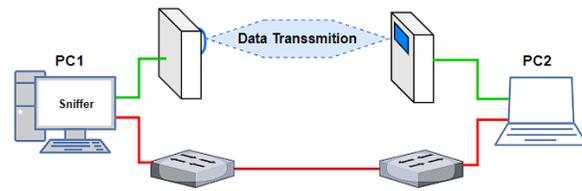


Figura 2. Arquitectura de referencia utilizada para pruebas de ancho de banda, latencia y velocidad de transmisión con tecnología LiFi

Para comparar los parámetros de evaluación entre una red convencional y una que utilice la tecnología LiFi, se realizaron dos pruebas descritas a continuación:

3.1.1 Envío de paquetes con el protocolo ICMP para medir latencia y velocidad de transmisión

En esta prueba, se realiza el envío de 100 mensajes mediante el protocolo ICMP estándar, conocido como Ping. Se emplea un tamaño de paquete de 80 bytes y se registra la información generada utilizando un analizador de tráfico. Este protocolo permite supervisar el tiempo que tarda cada mensaje en recibir respuesta, lo que facilita el cálculo de la latencia de los dispositivos y a su vez la velocidad de transmisión calculada como el tamaño del paquete dividido el tiempo de transmisión.

3.1.2 Envío de paquetes con el protocolo UDP para medir el ancho de banda efectivo

En esta prueba, se transmiten mensajes utilizando el Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP) a velocidades de transmisión predefinidas. El objetivo es someter a prueba los dispositivos Li-Fi y alcanzar su máxima velocidad de transmisión. UDP es un protocolo de transporte del modelo OSI que se asemeja a TCP, pero a diferencia de este último, no requiere confirmación, lo que lo convierte en una opción adecuada para aplicaciones que demandan alta velocidad y no tienen una necesidad crítica de integridad de datos, como la transmisión de video, audio, juegos en línea y VoIP [22].

3.2. Prueba de disponibilidad

La figura 3 ilustra la estructura utilizada en las pruebas de disponibilidad, que analiza la habilidad del sistema para recuperarse después de fallos. Esta estructura involucra dos computadoras portátiles conectadas exclusivamente a través de dispositivos LiFi.

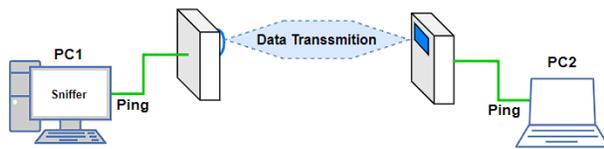


Figura 3. Arquitectura de referencia utilizada para pruebas LiFi

La evaluación comprende dos pruebas en las cuales se reserva la red exclusivamente para el análisis, asegurando que no haya otros dispositivos conectados. En ambas pruebas, se emplea la utilidad "ping" para mantener una conexión constante entre la dirección IP de origen y la de destino.

3.2.1 Capacidad de mantener una conectividad estable obstaculizando el haz de luz

El propósito de esta prueba es evaluar la capacidad de recuperación de la conexión de los sistemas Li-Fi cuando se enfrentan a obstáculos en la transmisión de luz. Se registrarán los tiempos necesarios para que la conexión se restablezca después de interrupciones causadas por la inserción de un obstáculo sólido, todo ello en un entorno donde la luz natural y sus reflejos están controlados. Esto se logra enviando un ping ICMP de manera continua y midiendo el tiempo transcurrido desde la pérdida de la conexión hasta su restauración. Este proceso se repite en tres ocasiones, con un intervalo de 1 minuto entre cada recuperación de la conexión.

3.2.2 Capacidad de mantener una conectividad estable movilizándolo uno de los módulos

En esta prueba, se efectúa un ping ICMP de forma constante, al mismo tiempo que se modifica de manera continua la distancia entre los módulos, asegurando que la altura se mantenga constante y que la conexión siga siendo directa. El propósito de esta prueba es confirmar la estabilidad de la conexión frente a pequeñas variaciones en el movimiento y el ángulo de incidencia de la luz. Se realizó en un espacio de trabajo de 10 metros con uno de los módulos desplazándose de manera continua.

3.3 Prueba de compatibilidad de protocolos de tipo industrial

Dado el rango de aplicaciones potenciales de esta tecnología, se vuelve relevante examinar su compatibilidad con los protocolos de comunicación de subestaciones eléctricas. Estos protocolos engloban aspectos esenciales como sincronización, control, monitoreo, así como ráfagas de mensajes en tiempos en

cuestiones de milisegundos. Esta evaluación permite conocer el desempeño real de LiFi en entornos industriales críticos y su adaptabilidad a otras áreas similares. La selección de estos protocolos para las pruebas se realizó debido a que por norma (IEC61850), tienen características de desempeño y operación particulares, lo cual permite a su vez, contrastar estos requerimientos con los atributos de la tecnología LiFi.

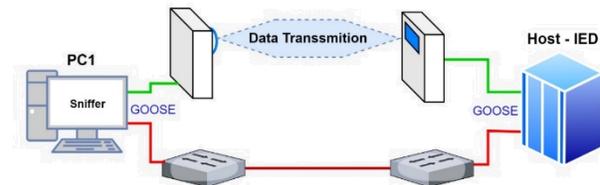


Figura 4. Arquitectura de referencia utilizada para pruebas de compatibilidad con protocolos

La evaluación de la transmisión de datos con LiFi se llevó a cabo utilizando los siguientes protocolos, los cuales están establecidos de acuerdo a la norma IEC 61850.

3.3.1 PTP (Precision Time Protocol)

Se trata de un protocolo esencial en la capa 3 de red o la capa 2 de enlace que se emplea en subestaciones digitales y en infraestructuras críticas. Su función principal es garantizar una marca de tiempo precisa para la sincronización de dispositivos en toda la arquitectura de la red de comunicaciones. La evaluación de la compatibilidad con este protocolo se fundamenta en la correcta transmisión de los mensajes "Sync," "Follow-up," y "Announce" pertenecientes al PTP (Precision Time Protocol) por parte de LiFi en la red. "Sync" inicia la sincronización, "Follow-up" proporciona información de tiempo adicional, y "Announce" notifica la calidad de un dispositivo como fuente de tiempo

3.3.2 MMS (Multimedia Messaging Service)

Este protocolo, situado en la capa tres de la red, se utiliza en subestaciones digitales e infraestructuras críticas para supervisar variables de operación, estados, comandos y otras características en un sistema específico.

La evaluación de su compatibilidad se basa en mantener la integridad de la información transmitida, ya que este protocolo incorpora mecanismos de verificación que permiten analizar los paquetes de extremo a extremo. Para llevar a cabo esta evaluación, se genera tráfico booleano en 3 variables GGIO entre un servidor IEC 61850 MMS simulado (PC1) y un cliente (relé de protección).

3.3.3 GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events)

Este es un protocolo de mensajería instantánea de alta velocidad de la capa 2 de enlace, diseñado para notificar eventos críticos, fallas, alarmas y cambios de estado en un sistema de monitoreo de subestaciones eléctricas.

Para la transmisión de mensajes GOOSE, se utiliza un método que combina el envío periódico y el envío inmediato. Inicialmente, se envían mensajes GOOSE en intervalos regulares llamados T0. No obstante, cuando se detecta un evento, se envía inmediatamente un mensaje GOOSE sin esperar al próximo intervalo T0. Posteriormente, se genera una secuencia de mensajes GOOSE que se transmiten a una velocidad creciente hasta alcanzar una tasa de retransmisión constante, tal como se ilustra en la Figura 5.

La evaluación de la compatibilidad de LiFi con este protocolo se basa en la existencia de pérdida de paquetes ante eventos que produzcan ráfagas de mensajes.

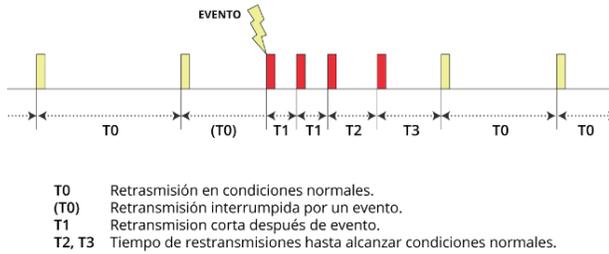


Figura 5. Comportamiento de mensajería Goos, Autor: Incibe. Avalible: <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/seguridad-el-protocolo-goose>

4. Resultados

El registro de valores se llevó a cabo a partir de los datos y gráficos producidos por el software de monitoreo de red Wireshark, registrando el flujo de información en el sistema durante un período de tiempo específico.

4.1. Pruebas de velocidad de transmisión, latencia y ancho de banda

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas para evaluar la velocidad de transmisión, la latencia y el ancho de banda en nuestro estudio.

4.1.1 Envío de paquetes con el protocolo ICMP para medir latencia y velocidad de transmisión

En las Figs. 6 y 7 se puede observar el resultado tras enviar los paquetes ICMP mediante la red LiFi y

Ethernet, donde se evidencia en primera instancia que no hubo una pérdida de información.

```

Respuesta desde 192.168.1.170: bytes=80 tiempo=4ms TTL=128
Estadísticas de ping para 192.168.1.170:
  Paquetes: enviados = 100, recibidos = 100, perdidos = 0
  (0% perdidos),
  Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
  Mínimo = 0ms, Máximo = 4ms, Media = 1ms
    
```

Figura 6. Prueba de envío de 100 mensajes ICMP con el dispositivo LiFi

```

Respuesta desde 192.168.1.170: bytes=80 tiempo<1m TTL=128
Estadísticas de ping para 192.168.1.170:
  Paquetes: enviados = 100, recibidos = 100, perdidos = 0
  (0% perdidos),
  Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
  Mínimo = 0ms, Máximo = 2ms, Media = 1ms
    
```

Figura 6. Prueba de envío de 100 mensajes ICMP con cable de cobre

En la figura 7 se exponen algunos datos extraídos de la captura con la tarjeta llamada “LiFi 6014”, correspondiente a la tarjeta de comunicación virtual en la estación de trabajo, asociada al sistema LiFi 6014 ahí conectado. En esta captura, se observa el tipo de protocolo, tiempos de respuesta y algunas características base de este.

Time	Interface description	Response time	Length	Info
0.002886	LiFi 6014	2.886	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3721/35086, ttl=128 (request in 1)
1.01198	LiFi 6014	1.137	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3722/35342, ttl=128 (request in 3)
2.02598	LiFi 6014	0.966	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3723/35596, ttl=128 (request in 5)
3.031918	LiFi 6014	1.583	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3724/35854, ttl=128 (request in 7)
4.046881	LiFi 6014	0.970	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3725/36110, ttl=128 (request in 9)
5.060998	LiFi 6014	0.885	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3726/36366, ttl=128 (request in 11)
6.070866	LiFi 6014	1.012	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3727/36622, ttl=128 (request in 13)
7.084475	LiFi 6014	1.712	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3728/36878, ttl=128 (request in 15)
8.102717	LiFi 6014	1.105	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3729/37134, ttl=128 (request in 17)
9.116933	LiFi 6014	1.599	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3730/37390, ttl=128 (request in 19)
10.131779	LiFi 6014	1.853	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3731/37646, ttl=128 (request in 21)
11.141401	LiFi 6014	0.970	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3732/37902, ttl=128 (request in 23)
12.15532	LiFi 6014	1.008	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3733/38158, ttl=128 (request in 25)
13.169865	LiFi 6014	1.992	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3734/38414, ttl=128 (request in 27)
14.173191	LiFi 6014	1.926	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3735/38670, ttl=128 (request in 29)
15.191742	LiFi 6014	1.164	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3736/38926, ttl=128 (request in 31)
16.200413	LiFi 6014	1.594	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3737/39182, ttl=128 (request in 33)
17.213442	LiFi 6014	1.006	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3738/39438, ttl=128 (request in 35)
18.229883	LiFi 6014	1.480	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3739/39694, ttl=128 (request in 37)
19.235478	LiFi 6014	1.156	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3740/39950, ttl=128 (request in 39)
20.252408	LiFi 6014	1.949	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=3741/40206, ttl=128 (request in 41)

Figura 7. Datos de respuesta al ping extraídos de la captura en el analizador de datos con LiFi

De igual manera, utilizando la arquitectura de comunicación convencional, se tomaron los registros correspondientes, identificando el elemento de comunicación, tiempo de respuesta y las características propias del protocolo (figura 8).

Time	Interface description	Response time	Length	Info
0.000532	Ethernet 4	0.532	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=77/18176, ttl=128 (request in 1)
1.003748	Ethernet 4	0.521	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=72/18432, ttl=128 (request in 3)
2.016475	Ethernet 4	0.699	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=73/18688, ttl=128 (request in 5)
3.025828	Ethernet 4	1.663	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=74/18944, ttl=128 (request in 7)
4.035858	Ethernet 4	1.579	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=75/19200, ttl=128 (request in 9)
5.046127	Ethernet 4	1.894	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=76/19456, ttl=128 (request in 11)
6.055121	Ethernet 4	0.737	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=77/19712, ttl=128 (request in 13)
7.065268	Ethernet 4	0.596	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=78/19968, ttl=128 (request in 15)
8.077111	Ethernet 4	1.616	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=79/20224, ttl=128 (request in 17)
9.086676	Ethernet 4	0.794	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=80/20480, ttl=128 (request in 19)
10.092324	Ethernet 4	1.498	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=81/20736, ttl=128 (request in 21)
11.107923	Ethernet 4	1.622	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=82/20992, ttl=128 (request in 23)
12.118701	Ethernet 4	1.411	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=83/21248, ttl=128 (request in 25)
13.12825	Ethernet 4	0.841	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=84/21504, ttl=128 (request in 27)
14.139464	Ethernet 4	1.614	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=85/21760, ttl=128 (request in 29)
15.149533	Ethernet 4	1.690	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=86/22016, ttl=128 (request in 31)
16.158995	Ethernet 4	1.383	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=87/22272, ttl=128 (request in 33)
17.168835	Ethernet 4	0.676	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=88/22528, ttl=128 (request in 35)
18.178741	Ethernet 4	0.702	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=89/22784, ttl=128 (request in 37)
19.188762	Ethernet 4	0.835	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=90/23040, ttl=128 (request in 39)
20.199307	Ethernet 4	1.029	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=91/23296, ttl=128 (request in 41)
21.209141	Ethernet 4	0.650	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=92/23552, ttl=128 (request in 43)
22.218844	Ethernet 4	0.592	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=93/23808, ttl=128 (request in 45)
23.230676	Ethernet 4	0.715	80	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=94/24064, ttl=128 (request in 47)

Figura 8. Datos extraídos de la captura en el analizador de datos con cable de cobre

La figura 9 muestra la asignación de los tiempos de respuesta obtenidos a partir de las pruebas con el protocolo ICMP, donde se puede ver la respuesta del sistema con tecnología LiFi y las tecnologías de red tradicionales.

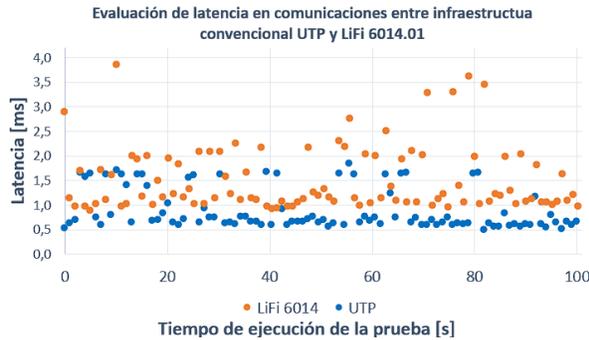


Figura 9. Tiempos de transmisión medidos en las pruebas de comunicación realizadas con tecnología LiFi y un sistema con cableado convencional.

Basándonos en estos resultados, se ha observado que los tiempos relacionados con la red convencional tienden a mantenerse relativamente estables, con un valor máximo de respuesta cercano a 1 ms utilizando el protocolo ICMP. En contraste, al emplear la tecnología LiFi, se observa un incremento en los tiempos de respuesta, llegando en algunos casos hasta 3,853 ms. Esto refleja una mayor variabilidad en los tiempos de respuesta obtenidos durante la prueba con esta tecnología.

Para resumir esta información de manera más concisa, a continuación, se presenta una tabla que compara los tiempos de respuesta promedio de ambas tecnologías evaluadas, muestra la desviación estándar de los resultados, y destaca los valores máximos y mínimos detectados durante la medición.

Tabla 2. Comparación de latencias máximas, mínimas y promedio de la tecnología cableada convencional (cobre) y la tecnología LiFi.

	Convencional	Trulifi6014.01
Tiempo promedio	0,895 ms	1,503 ms
Desviación estándar	0,416 ms	0,658 ms
Tiempo máximo	1,839 ms	3,853 ms
Tiempo mínimo	0,493 ms	0,885 ms

Los resultados indican que, en comparación con la tecnología de red convencional, la tecnología LiFi experimentó una latencia y velocidad promedio

aproximadamente dos veces más baja. Esta diferencia en el rendimiento es un factor crítico a tener en cuenta al tomar decisiones sobre qué tecnología implementar en circunstancias específicas. La velocidad de transmisión desempeña un papel fundamental en la eficiencia de los procesos, ya que afecta la capacidad de procesar una mayor cantidad de datos en un período de tiempo más corto.

Tabla 3. Comparación de velocidades de transmisión máximas, mínimas y promedio de la tecnología cableada convencional (cobre) y la tecnología lifi

	Convencional	LiFi 6014.01
Velocidad promedio	1430,695 kbps	851,449 kbps
Velocidad máxima	2596,349 kbps	1446,328 kbps
Velocidad mínima	696,030 kbps	332,209 kbps

Los resultados muestran que la latencia y velocidad promedios registrados durante la prueba con tecnología LiFi es aproximadamente dos veces más lento que la tecnología de red convencional. Esto es importante a considerar al elegir qué tecnología implementar en situaciones particulares, ya que la velocidad de transmisión influye en la eficiencia de los procesos, permitiendo una mayor cantidad de datos ser procesados en un tiempo menor.

4.1.2 Envío de paquetes con el protocolo UDP para medir el ancho de banda efectivo

La Tabla 4 presenta los resultados de las tasas de transferencia alcanzadas por cada tecnología al enviar paquetes UDP a una tasa de transferencia específica. Al utilizar esta información, podemos determinar el ancho de banda efectivo de los dispositivos utilizados en la prueba.

Tabla 4. Comparación de velocidades de transmisión enviando mensajes UDP entre la tecnología cableada convencional y la tecnología LiFi.

Tasa de transferencia	Ethernet	LiFi 6014.01
100 Mbps	97 Mbps	106 Mbps
250 Mbps	269 Mbps	266 Mbps
500 Mbps	530 Mbps	500 Mbps
800 Mbps	848 Mbps	493 Mbps

Se encontró que en la tecnología inalámbrica LiFi obtuvo un ancho de banda de aproximadamente 500 Mbps. Para el caso de Ethernet su ancho de banda para las pruebas

fue de 848 Mbps, que al tener tarjetas de red del tipo Giga, podría soportar aún más tráfico.

Con los resultados anteriores podemos afirmar que las características técnicas entregadas por los fabricantes de los dispositivos LiFi corresponden a las encontradas en las pruebas.

4.2. Prueba de disponibilidad

4.2.1 Capacidad de mantener una conectividad estable obstaculizando el haz de luz

Durante las pruebas de LiFi, se realizó un experimento específico donde se colocó un objeto sólido en medio de la conexión. Los resultados revelaron tiempos de latencia un poco elevados, alcanzando hasta 5 segundos en algunas instancias.

Este fenómeno se atribuye principalmente a la interrupción física causada por el objeto obstruyendo la línea de visión entre el emisor y el receptor LiFi. Es importante destacar que, en condiciones normales sin obstáculos, la tecnología LiFi demostró un rendimiento rápido y confiable, pero la presencia de obstáculos sólidos puede afectar significativamente la calidad de la conexión. Estos resultados destacan la importancia de mantener una línea de visión clara en las implementaciones de LiFi para garantizar un rendimiento óptimo. En entornos críticos, esto puede tener consecuencias graves.

Tabla 5. Tiempo de reconexión tras obstaculizar la luz

Prueba	LiFi 6014.01
Prueba 1	5.23 s
Prueba 2	4.7 s
Prueba 3	4.79 s
Promedio	4.90

4.2.2 Capacidad de mantener una conectividad estable movilizand uno de los módulos

En la figura 10 se ilustran los gráficos que reflejan los paquetes ICMP de entrada y salida transmitidos por segundo, entre PC1 y PC2, mientras son alejados entre sí. Donde el valor de dos representa una correcta conexión, uno representa un envío del mensaje sin respuesta y el cero representa una pérdida total de la conexión

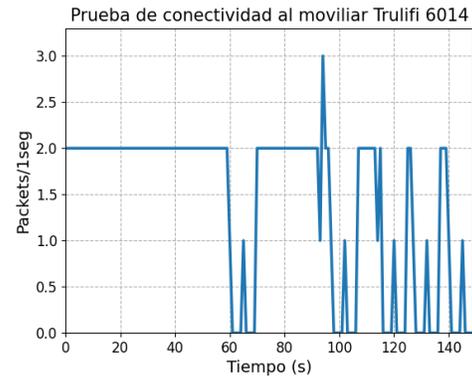


Figura 2. Prueba de conectividad ante un aumento continuo de la distancia entre módulos LiFi

También es importante mencionar que el módulo LiFi logró alcanzar los 10 metros establecidos para la prueba. No obstante, se necesitó mover horizontalmente el dispositivo para restablecer la conexión lo que puede ser considerado un perturbación de bajo impacto en sistemas de comunicación donde el volumen y la importancia de la información son bajos. Sin embargo, en sistemas con alta criticidad, es fundamental hacer evaluaciones previas que consideren el tráfico máximo del sistema para determinar si la tecnología se adapta o no a sus necesidades.

4.3. Prueba de compatibilidad de protocolos de tipo industrial

A continuación, se presentarán los resultados de la prueba de compatibilidad de protocolos de tipo industrial, en la que se evaluaron la compatibilidad de LiFi con los protocolos PTP, GOOSE y MMS en entornos industriales.

4.3.1 PTP

En la figura 16 se muestra la captura de tráfico realizada desde la tarjeta de red "Ethernet 2" correspondiente a LiFi. Como se puede observar, soporta el envío de este protocolo sin ningún inconveniente.

Time	Interface description	Destination	Protocol	Length	Info
0.162978	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Sync Message
0.163292	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Follow Up Message
0.163436	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	124	Announce Message
1.162434	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Sync Message
1.162626	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Follow Up Message
1.162922	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	124	Announce Message
2.162632	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Sync Message
2.162666	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Follow Up Message
2.162917	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	124	Announce Message
3.162330	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Sync Message
3.162827	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Follow Up Message
3.162858	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	124	Announce Message
4.162547	Ethernet 2	IEEE1588_00:00:00	PTPv2	60	Sync Message

```

> Frame 5: 124 bytes on wire (992 bits), 124 bytes captured (992 bits) on interface \
> Ethernet II, Src: Meinberg_00:60:1a (ec:46:70:00:60:1a), Dst: IEEE1588_00:00:00 (01
> Precision Time Protocol (IEEE1588)
  > 0000 ... = TransnetSpecific: 0x0
  
```

Figura 11. Análisis de tráfico con mensajería GOOSE utilizando LiFi

Los resultados indican que el protocolo PTP (Precision Time Protocol) es compatible con LiFi, como se evidencia en la trama de la figura 11, donde se observan claramente los tres mensajes esenciales: Announce, Follow Up y Sync Message. Esto demuestra que PTP puede integrarse efectivamente en entornos de comunicación LiFi.

4.3.2 GOOSE

En la figura 12 se muestra la captura de tráfico LiFi soportando el envío de la mensajería GOOSE proveniente de un único dispositivo IED comparado con la conexión directa mediante Ethernet y donde se observa que no existe una pérdida de paquetes por parte de LiFi pues cada diez segundos vemos la recepción de un mensaje GOOSE, en donde se solapan las gráficas de las tres tecnologías de comunicación utilizadas

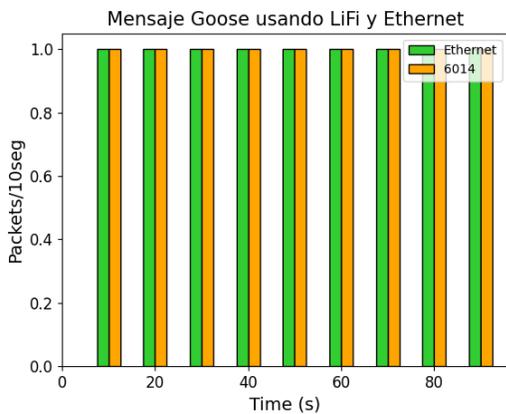


Figura 12. Tráfico con mensajería GOOSE utilizando los dispositivos LiFi y Ethernet

4.3.3 MMS

La figura 13 muestra las capturas de tráfico realizadas desde los dos extremos de la comunicación que demuestran la transmisión de este protocolo. A la izquierda se encuentra la captura tomada mediante el analizador de tráfico Wireshark para el servidor, mientras que a la derecha se encuentra la captura realizada para el cliente desde su propio analizador de tráfico. Analizando las capturas, se puede observar un componente llamado OptFlds = 0x7f 0x80, que se muestra en el recuadro naranja de la figura 13.b. Este es un valor hexadecimal que indica qué tipo de datos se encuentran en el reporte dentro del paquete. También se puede ver un valor similar en la figura 13.a, en el recuadro naranja, aunque sin el nombre del elemento y en un formato diferente, 7f80.

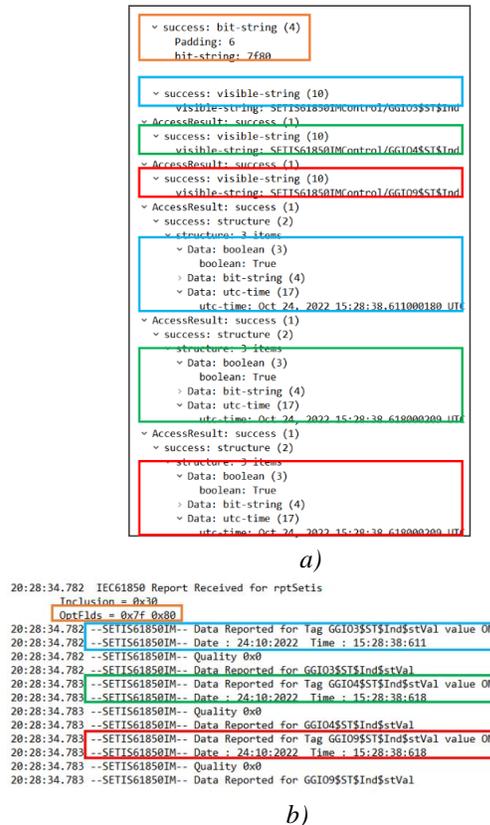


Figura 13. Captura de tráfico IEC 61850 MMS. Captura de la primera trama con datos booleanos. a) Captura de tráfico en el servidor (Wireshark). b) Captura de tráfico en el cliente (software propio del cliente).

Este valor permite verificar que la información dentro de la trama no ha sido alterada, comparándolo con el resto del PDU. Además, se comprueban los datos de los GGIO3 (recuadros azules), GGIO4 (recuadros verdes) y GGIO9 (recuadros rojos).

La trama examinada es un informe donde todos los booleanos tienen un valor verdadero, así que, además de este valor, también se analiza la estampa de tiempo con la que fue enviada ese valor. Se puede concluir que los datos viajan sin cambios de un extremo a otro de cada GGIO en la figura, ya que tanto el valor de la variable como la marca de tiempo enviada desde el servidor son iguales a las recibidas por el cliente.

De esta manera, se verifica que los parámetros de verificación de la trama y la información transferida viajan a través de los módulos LiFi sin ser alterados de extremo a extremo.

5. Conclusiones

Los resultados del artículo exponen la buena compatibilidad que tiene la tecnología LiFi con los protocolos industriales evaluados, no obstante, aún existen algunos desafíos en términos de disponibilidad para aquellos protocolos de alta criticidad, evidenciando esto en la pérdida de paquetes y tiempos de transferencia prolongados, tal como se comprobó al contrastar la transferencia de datos entre una arquitectura de comunicación convencional y la arquitectura de comunicación mediante LiFi.

Las características funcionales y técnicas de la tecnología LiFi, hacen que su uso tenga buena acogida en ambientes hostiles, susceptibles principalmente a ruidos electromagnéticos o limitaciones por radiofrecuencia, donde las infraestructuras convencionales pueden ver limitado su uso. No obstante, el continuo desarrollo de estos sistemas ha demostrado que cada vez son más eficientes en el intercambio de información y brindan adicionalmente un factor determinante que es la ciberseguridad, por lo cual su implementación cada vez podría tener mayor acogida.

Bajo el contexto actual y la correspondiente disponibilidad tecnológica, los sistemas LiFi pueden verse como un complemento de valor agregado a la infraestructura de comunicación tradicional, con el potencial de usarse en zonas o instalaciones con requerimientos de seguridad o ambientes de operación, garantizando confiabilidad en la transferencia de información con protocolos de comunicación usados en infraestructuras empresariales y algunos protocolos de tipo industrial con criticidad media.

6. Agradecimientos

Este trabajo de investigación se realizó con el Grupo T&T y el Laboratorio LACI de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín en el marco del proyecto “Diseño e implementación de una arquitectura para comunicación con tecnología Li-Fi partiendo de aspectos considerados fundamentales en esquemas de comunicación” ejecutado con Enel Colombia.

7. Referencias

- [1] H. Haas et al., “Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 2, pp. A190–A203, 2020, doi: 10.1364/JOCN.12.00A190.
- [2] C. Science and M. Studies, “LiFi Technology : Data Transmission through Visible Light,” *International*

Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies, vol. 3, no. 6, pp. 1–12, 2015.

- [3] C. Lee et al., “26 Gbit/s LiFi system with laser-based white light transmitter,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 5, pp. 1432–1439, Mar. 2022, doi: 10.1109/JLT.2021.3124942.
- [4] G. Albert, G. Dekel, S. Kurland, M. Ran, D. Malka, and G. Katz, “Which LiFi’s apps may fit mostly to 5G and beyond-5G Technology?,” *2019 Global LIFI Congress, GLC 2019*, Jun. 2019, doi: 10.1109/GLC.2019.8864118.
- [5] KYOCERA SLD Laser. (2022). KYOCERA SLD Laser Achieves World Record LiFi Communications Data Rate 100 times faster than 5G, [Online]. Available: <https://www.kyocera-sldlaser.com/news/kyocera-sld-laser-achieves-world-record-LiFi-communications-data-rate-100-times-faster-than-5g> (accessed Feb. 5, 2023).
- [6] L. Hamada, P. Lorenz, and M. Gilg, “Security Challenges for Light Emitting Systems,” *Future Internet 2021*, Vol. 13, Page 276, vol. 13, no. 11, p. 276, Oct. 2021, doi: 10.3390/FI13110276.
- [7] Iberdrola. (2018). LiFi , Internet a la velocidad de la luz, [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/tecnologia-LiFi> (accessed Feb. 8, 2023).
- [8] S. Paramita et al., “Demo of Hybrid LiFi /Wifi Network for an Indoor Environment,” *2023 15th International Conference on COMMunication Systems and NETworkS, COMSNETS 2023*, pp. 213–215, 2023, doi: 10.1109/COMSNETS56262.2023.10041414.
- [9] R. Badeel, S. K. Subramaniam, Z. M. Hanapi, and A. Muhammed, “A Review on LiFi Network Research: Open Issues, Applications and Future Directions,” *Applied Sciences 2021*, Vol. 11, Page 11118, vol. 11, no. 23, p. 11118, Nov. 2021, doi: 10.3390/APP112311118.
- [10] H. Alshaer, H. Haas, and O. Y. Kolawole, “An Optimal Networked LiFi Access Point Slicing Scheme for Internet-of-Things,” *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2021 - Proceedings*, Jun. 2021, doi: 10.1109/ICCSWORKSHOPS50388.2021.9473868.
- [11] G. Matta, R. Bahl, and M. Agarwal, “Capacity Analysis of Indoor Visible Light Communication Systems,” *2019 Global LIFI Congress, GLC 2019*, Jun. 2019, doi: 10.1109/GLC.2019.8864139.

- [12] V. D. Mukku, S. Lang, and T. Reggelin, "Integration of LiFi Technology in an Industry 4.0 Learning Factory," *Procedia Manufacturing*, vol. 31, pp. 232–238, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.03.037.
- [13] L. J. Ramírez-López, E. Ramírez-Maldonado, and A. Rodríguez-García, "La calidad del servicio de comunicación óptica LiFi (Light Fidelity) en redes de último metro," *Información tecnológica*, vol. 33, no. 3, pp. 15–22, 2022, doi: 10.4067/s0718-07642022000300015.
- [14] WeidMuller, "LiFi with 5G for the Smart Factory," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, vol. 2022-April, pp. 2310–2315, 2022, doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771969.
- [15] Luk, G. (2020). Global Li-Fi B2B Revenue Forecast by Vertical Industry, [Online]. Available: <https://www.strategyanalytics.com/access-services/enterprise/iot/market-data/report-detail/global-li-fi-b2b-revenue-forecast-by-vertical-industry> (accessed Feb. 15, 2023).
- [16] S. Edirisinghe, C. Ranaweera, E. Wong, C. Lim, and A. Nirmalathas, "A Novel Network Architecture for Indoor Optical Wireless Communication," *2019 Global LIFI Congress, GLC 2019*, Jun. 2019, doi: 10.1109/GLC.2019.8864137.
- [17] A. Petrosino, D. Striccoli, O. Romanov, G. Boggia, and L. A. Grieco, "Light Fidelity for Internet of Things: A survey," *Optical Switching and Networking*, vol. 48, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.osn.2023.100732.
- [18] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is LiFi?," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, Mar. 2016, doi: 10.1109/JLT.2015.2510021.
- [19] M. R. Ghaderi, "LiFi and Hybrid Wifi/LiFi indoor networking: From theory to practice," *Optical Switching and Networking*, vol. 47, p. 100699, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.OSN.2022.100699.
- [20] G. Madhuri, K. Anjali, and R. Sakthi Prabha, "Transmission of data, audio and text signal using LiFi technology," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 872, no. 1, pp. 0–7, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/872/1/012010.
- [21] RF Wireless World. (n.d.). LiFi Dongle | LiFi Transceiver | Block diagram and Working, [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LiFi-Transceiver-based-LiFi-Dongle.html> (accessed Feb. 13, 2023).
- [22] Wendell Odom, *CCNA 200-301 Official Cert Guide*, 1st ed. 2019