

Sistema VLC con modulación externa: hacia las comunicaciones por luz solar



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.39
Enero-Junio de 2023
Reia3901 pp. 1-11

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

FABIÁN GUTIERREZ-CASTILLO¹

JEISON E. DURANGO¹

✉ ANDRÉS BETANCUR-PÉREZ¹

1. Institución Universitaria ITM

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Gutierrez-Castillo, F.; Durango, J.;
Betancur-Pérez, A. (2023) Sistema vlc
con modulación externa: hacia las
comunicaciones por luz solar.
Revista EIA, 20(39), Reia3901.
pp. 1-11.
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1600>

✉ *Autor de correspondencia:*

Betancur-Pérez, A. (Andrés)
MSc. Ingeniería de
Telecomunicaciones
Docente T.C Instituto Tecnológico
Metropolitano – ITM
Correo electrónico:
andresbetancur@itm.edu.co

Resumen

En este trabajo implementamos un sistema de comunicación por luz visible con modulación externa a través de una válvula de luz de \$1.5 USD, un sensor de luz analógico de escala logarítmica, un lente de Fresnel de \$5 USD, un LED de 12 V operando de forma continua, y 2 Raspberry Pi 3. Este trabajo es una iniciativa para explotar de manera directa la luz solar como fuente de radiación para complementar los sistemas VLC con un bajo costo de implementación. La válvula de luz permitió transmitir datos a una velocidad de 100 bps que sugiere un escenario de aplicación como las redes de sensores inalámbricos y en general para la Internet de las Cosas (IoT). Dado que no hay mucho espacio en el espectro radioeléctrico para dar lugar a nuevos servicios y tecnologías de comunicación inalámbrica, los sistemas VLC prometen ser un gran complemento a las redes de acceso inalámbricas convencionales, para balancear la carga del tráfico presente cuando exista una conexión masiva de dispositivos en el paradigma de IoT.

Palabras claves: IoT, Luz solar, válvula de luz, sensores inalámbricos, VLC.

Recibido: 21-02-2022

Aceptado: 12-09-2022

Disponible online: 01-01-2023

VLC system with external modulation: towards sunlight communications

Abstract

In this work we implemented a visible light communication system with external modulation through a \$1.5 USD light valve, a logarithmic scale analog light sensor, a \$5 USD Fresnel lens, a 12 V LED operating continuously, and 2 Raspberry Pi 3. This work is an initiative to directly exploit sunlight as a radiation source to complement VLC systems with a low implementation cost. The light valve allowed transmitting data at a rate of 100 bps which suggests an application scenario such as wireless sensor networks and in general for the Internet of Things (IoT). Since there is not much room in the radio spectrum to accommodate new wireless communication services and technologies, VLC systems promise to be a great complement to conventional wireless access networks to balance the traffic load present when there is a massive connection of devices in the IoT paradigm.

Keywords: IoT, light valve, sunlight, VLC, wireless sensors.

Sistema VLC Com Modulação Externa: Em Direção A Comunicações Por Luz Do Sol

Resumo

Neste trabalho, implementamos um sistema de comunicação de luz visível com modulação externa através de uma válvula de luz de \$1,5 USD, um sensor de luz analógica em escala logarítmica, uma lente Fresnel de \$5 USD, um LED de 12 V operando continuamente, e 2 Raspberry Pi 3. Este trabalho é uma iniciativa para explorar diretamente a luz solar como fonte de radiação para complementar os sistemas VLC com um baixo custo de implementação. A válvula de luz permitiu transmitir dados a uma taxa de 100 bps sugerindo um cenário de aplicação como redes de sensores sem fio e, em geral, para a Internet das Coisas (IoT). Como não há muito espaço no espectro de rádio para acomodar novos serviços e tecnologias de comunicação sem fio, os sistemas VLC prometem ser um grande complemento às redes de acesso sem fio convencionais, para equilibrar a carga de tráfego presente quando há uma conexão massiva de dispositivos no paradigma IoT.

Palavras-chave: IoT, luz solar, válvula de luz, sensores sem fio, VLC.

1. Introducción

La comunicación por luz visible (*VLC: Visible Light Communication*) es una tecnología de transmisión óptica inalámbrica que como su nombre lo indica, utiliza luz en el rango visible del espectro electromagnético. El primer uso conocido de la comunicación inalámbrica con luz visible proviene de Alexander Graham Bell, quien en 1880 implementó un fonógrafo que transmitía voz a través de 200m utilizando los rayos del sol y un detector de Selenio (Forrest, 1976). Tal trabajo marcó un hito en el concepto de la comunicación óptica que solo tomaría nuevamente fuerza después de un siglo. En 1998 se demostró un transceptor digital con lámpara fluorescente a una tasa de bit baja (Jackson et al., 1998), luego, con el hallazgo del diodo emisor de luz (*LED: Light Emitting Diode*) de color azul por los ganadores del premio nobel Suji Nakamura, Isamu Akasaki y Hiroshi Amano, se comenzó la exploración de la conmutación de LED para la transmisión de datos, en donde el primer trabajo fue el uso de las luces de tráfico como dispositivo de comunicación (Pang et al., 1999). A partir de este punto se comenzó a trabajar con diversas técnicas de modulación de LED para la transmisión de datos explotando la luz blanca de los LED, ya que a partir de estos se podría brindar iluminación de interiores y comunicación al mismo tiempo (Tanaka et al., 2000). Existen diversos trabajos orientados a aumentar la velocidad de transmisión en los sistemas VLC. Los esfuerzos abarcan esquemas de modulación tan simples como la modulación de encendido y apagado (*OOK: On-Off Keying*), o tan exóticos como la modulación por desplazamiento de color (*CSK: Color Shift Keying*) hasta esquemas de modulación tan avanzados como la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) (IEEE Standard Association, 2011). Todas las técnicas de modulación tienen en común que conmutan directamente los LED ya que estos tienen una respuesta en frecuencia mayor con respecto a otras fuentes lumínicas, además ofrecen un ahorro de energía mayor al modularlas y modificar el ancho de los pulsos (Karunatilaka et al., 2015).

Existen aún retos por superar en los sistemas VLC como lo es su limitado ancho de banda en comparación con los sistemas inalámbricos que emplean ondas de radio (Martínez Ciro et al., 2016), pues la respuesta en frecuencia de los LED no es muy alta debido a la capacitancia parasita y a los materiales presentes en estos (Navarro Restrepo et al., 2020). Otra limitante es la rápida atenuación de la luz con la distancia y enfrentar otras fuentes de radiación lumínica como la luz ambiente, y entre estas, el sol (Karunatilaka et al., 2015). Este último restringe el uso de VLC a interiores y en la noche para el caso de exteriores. Durante el día en exteriores el uso de VLC puede llevarse a cabo bajo condiciones de distancia e intensidad adecuadas que sugieren usos muy específicos. La pregunta que surge es ¿Por qué no hacer la luz del sol nuestro aliado? La luz del sol es una fuente potencial de ondas de luz en el rango visible del espectro para sistemas VLC, y ya existe un antecedente funcional con el fonógrafo gracias a Alexander Graham Bell. En ese entonces no era práctico por las limitaciones tecnológicas, pero ahora tenemos a nuestra disposición una incontable cantidad de herramientas que pueden hacer de este concepto algo viable e incluso eficiente con el uso de la energía, alineándose así con los esfuerzos mundiales que impulsa el panel intergubernamental sobre el cambio climático de la ONU (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change).

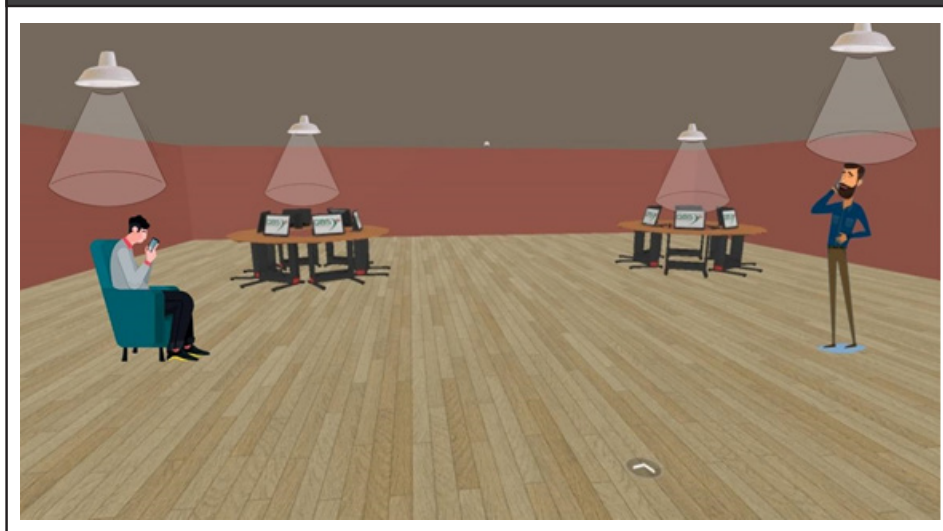
En este trabajo proponemos un sistema de comunicación VLC con modulación externa con el propósito de explotar la luz solar para la transmisión de datos. Como elemento de modulación externa se utilizó una válvula de luz de cristal líquido de bajo costo y un sensor de luz de Adafruit Ga1a12s202. Este artículo tiene la siguiente estructura: Primero daremos una breve introducción de los sistemas VLC, luego informaremos sobre los elementos usados y los parámetros del experimento. A continuación, presentaremos los resultados y después las respectivas conclusiones.

1.1. Sistemas VLC

La comunicación por luz visible (VLC: *Visible Light Communication*), es aquella en la cual se puede usar la luz de una fuente artificial o natural para transmitir datos (ver Figura 1). Estas fuentes lumínicas están en el rango de longitudes de onda visible (entre 400nm y 700nm). Un sistema VLC es atractivo porque tiene un doble propósito; brinda iluminación de entornos y además habilita las comunicaciones (Rehman et al., 2019). Dada la tendencia de que el tráfico de información esté en continuo crecimiento, VLC ofrece una alternativa viable en la red de acceso para sustentar la necesidad de conectar cada vez más dispositivos.

Los sistemas RF, por su parte, actualmente se ven limitadas por la poca disponibilidad de bandas de frecuencias para habilitar nuevas tecnologías, la seguridad y la restricción de su uso en ciertos espacios sensibles al uso de ondas de radio. VLC ofrece una mayor seguridad de las conexiones ya que las señales no atraviesan muros y en espacios como zonas militares, aviones u hospitales, los sistemas VLC no presuponen una amenaza por compatibilidad electromagnética.

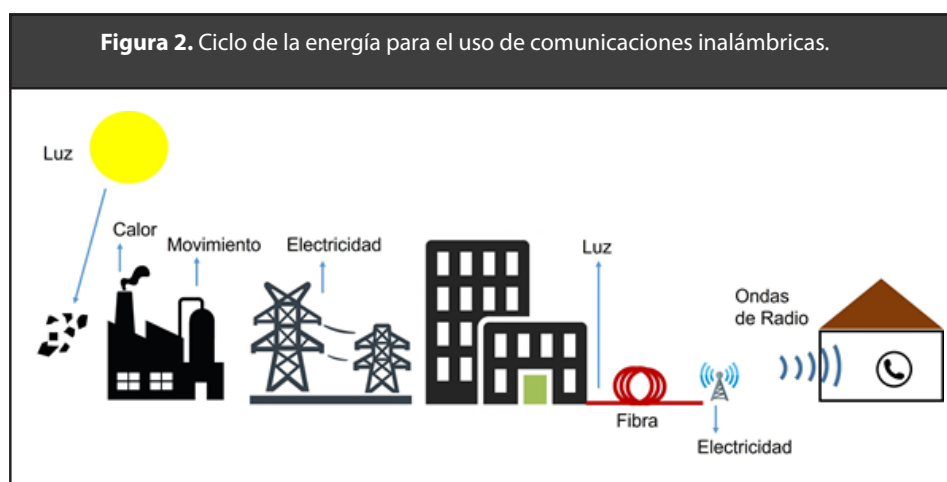
Figura 1. Ilustración de un entorno con comunicación por luz visible. A parte de servir los LED para iluminar los espacios, permiten la conexión y la conexión está restringida al espacio que una lámpara ilumine.



VLC utiliza como transmisor componentes como los LED, y para la recepción sensores que sean lo suficientemente veloces y sensibles para detectar cambios rápidos en las señales y que posean una potencia muy reducida (un ejemplo de esto son los fotodetectores PIN). Aun así, cualquier fuente lumínica viable puede servir como transmisor en un sistema VLC, solo que la velocidad de transmisión será restringida por la respuesta en frecuencia, pero puede ser suficiente en ciertos escenarios de aplicación.

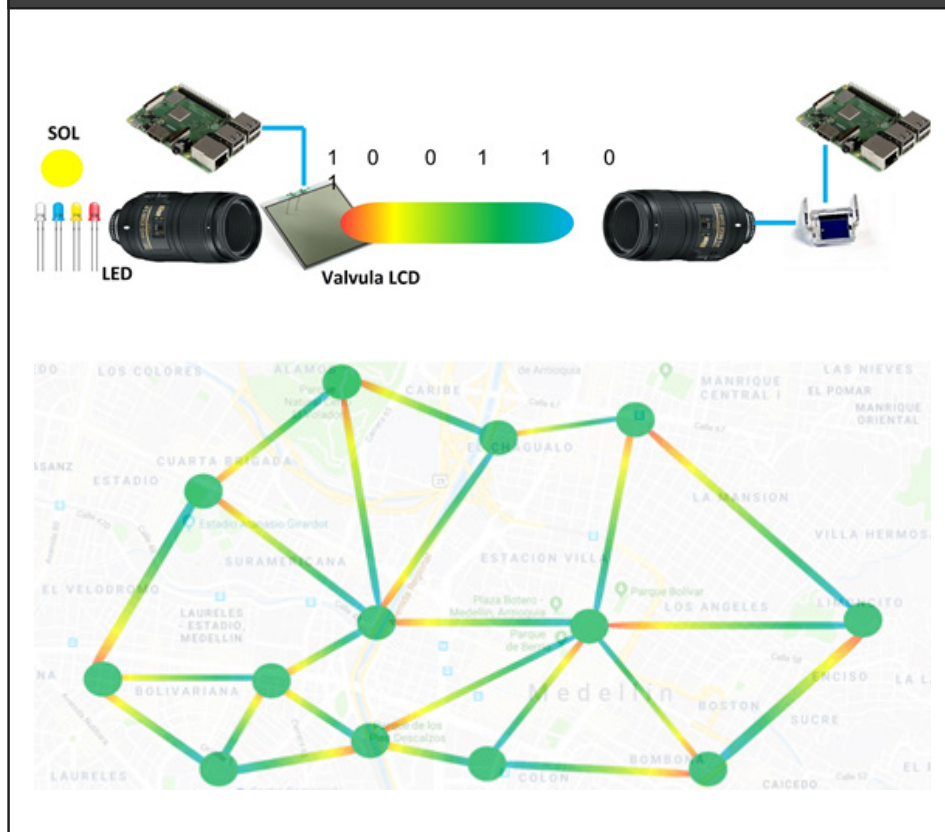
El empleo de los LED como elementos de transmisión está motivado principalmente por su consumo energético, sin embargo, debemos entender que siempre podemos usar la energía de forma más eficiente. Para que funcionen los sistemas VLC la energía sigue el ciclo a continuación: 1) Puede partir del sol, 2) luego se almacena en el carbón o petróleo, 3) cuando se combustiona se genera energía mecánica, 4) la energía mecánica genera energía eléctrica, 5) la energía eléctrica se transporta en grandes distancias por cables, 6) La energía eléctrica

se convierte en radiación electromagnética confinada en una fibra óptica, 7) La energía vuelve a convertirse en eléctrica, 8) Luego se convierte a radiación electromagnética, 9) Vuelve a convertirse en eléctrica, 10) La energía eléctrica se transforma en algún otro tipo de energía que entreguen los dispositivos de salida. Este ciclo se ilustra en la Figura 2. En todo el ciclo anterior suele perderse energía por la disipación de la potencia en energía calórica, indicando que una gran parte de la energía extraída no se vuelve útil para el consumo. Es entonces que surge otra pregunta de investigación: si el origen de la energía es el sol y usamos luz visible para transmitir información ¿por qué no usar directamente la luz solar para las comunicaciones? Esta pregunta motiva la investigación a buscar alternativas de comunicaciones inalámbricas eficientes con el uso de la energía. En efecto, la luz solar solo está disponible durante un periodo de tiempo en el día (casi medio día en países sobre el ecuador) y puede ser aún menos el tiempo si existen obstáculos como nubes densas, pero los sistemas VLC pueden conmutar al uso de fuentes artificiales como los LED cuando las condiciones no son indicadas para usar la luz solar. Lo anterior para un sistema VLC que es afectado por fuentes lumínicas externas puede resultar benéfico (Chow et al., 2013; Quintana Sánchez, 2013) ya que la luz solar al estar mitigada para los LED les será más fácil sortear esta interferencia, y en condiciones de alta luminosidad solar el sistema puede conmutar al uso directo del sol.



El concepto de usar fuentes de iluminación externa requiere de dispositivos que permitan la modulación externa, dejando las fuentes lumínicas operando de forma continua. En el caso de luz solar que es una fuente de luz no coherente, lo más sencillo es usar algún componente que opere bajo el fenómeno de electro-absorción o alguno que permita opacar la luz tras ser activado con un pulso eléctrico, como lo es una válvula de luz ver Figura 3a. En este trabajo se empleó una válvula LCD de bajo costo que conmuta hasta una frecuencia de 30 Hz. Aunque es una prueba de concepto, este sistema puede ser usado en el paradigma del internet de las cosas (IoT: Internet of Things), ya que el tráfico en muchos de los escenarios puede ser de periodos tan largos como la transmisión de 140 mensajes por día. Un posible escenario de aplicación es el uso de la luz solar junto con lentes para implementar redes de sensores inalámbricos para monitorear aspectos críticos de una ciudad o en el campo para apoyar la agricultura (ver Figura 3b). En la actualidad tenemos la capacidad de controlar espejos de manera que automáticamente siga el movimiento del sol y así mantener el reflejo en una sola dirección.

Figura 3. a) Esquema de un enlace de comunicación por luz visible de larga distancia. b) Red de sensores inalámbricos desplegada en una ciudad.

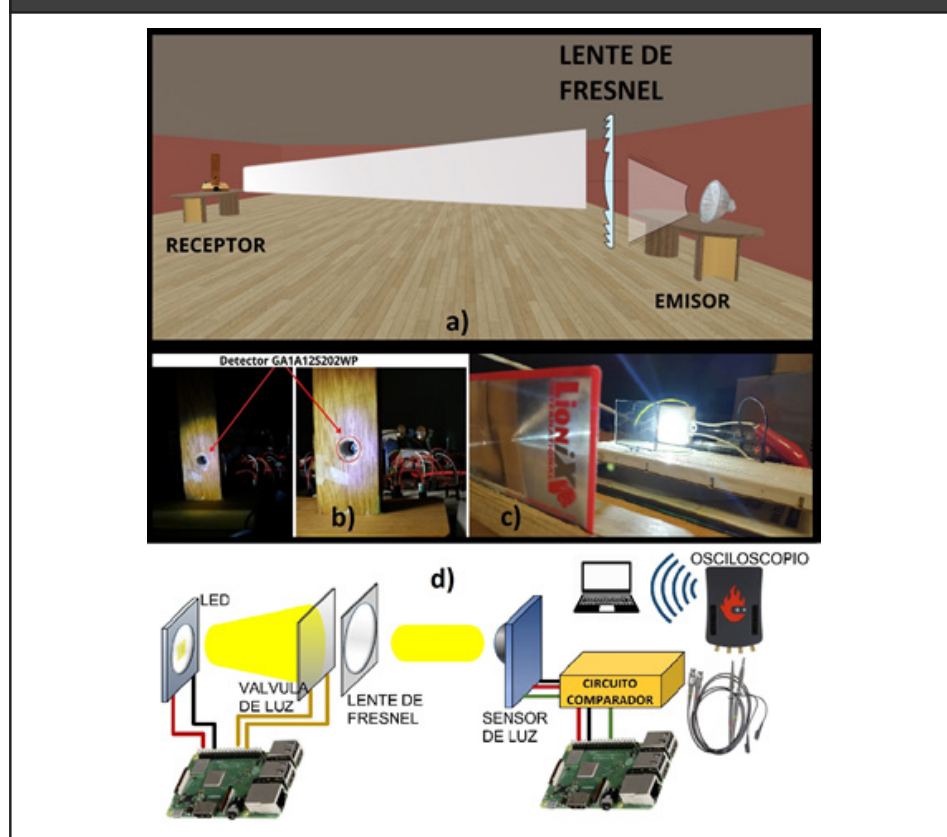


1.2. Montaje experimental

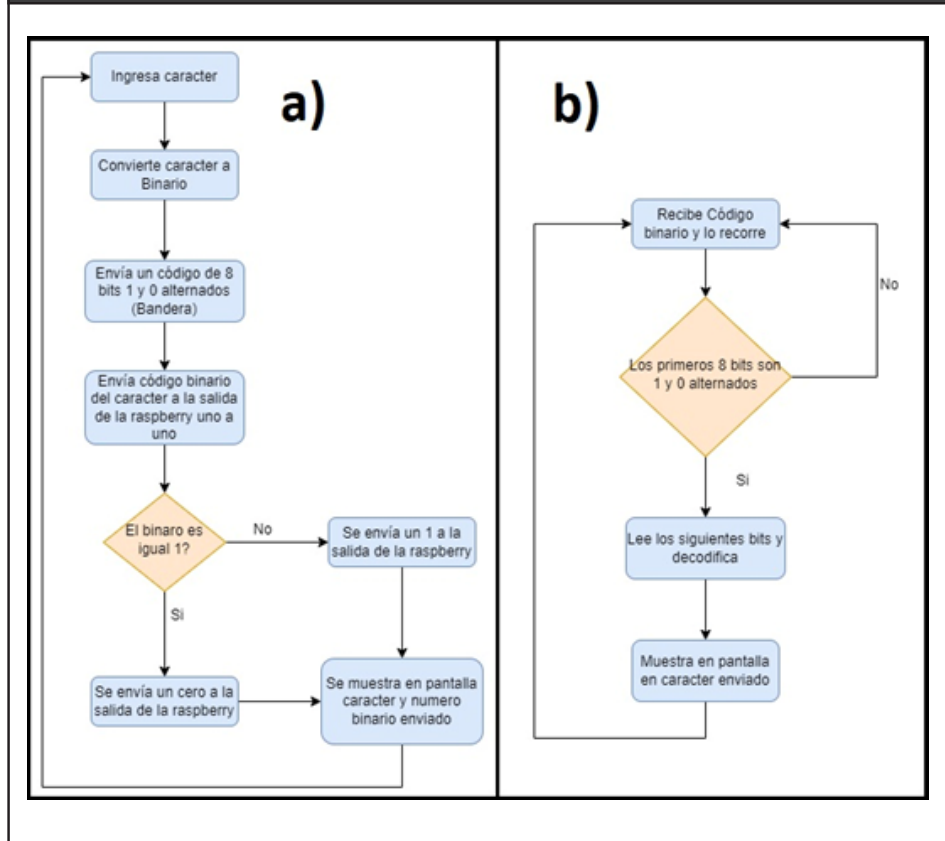
En este experimento se implementó un sistema que transmite un carácter ASCII. Este se realizó por medio de una lámpara LED fija, una válvula de luz de cristal líquido que bloquea o permite el paso de la luz emitida de una fuente lumínica externa. Para enfocar la luz emitida por el LED se usa un pequeño lente de Fresnel. La distancia del enlace es de 2.5 metros aproximadamente. Para aumentar la relación de extinción, el experimento se realiza en un ambiente oscuro donde solo la fuente LED está presente. El sensor de luz se adaptó a una base de madera para evitar desalineamientos, y en la base de madera se acondiciona un agujero para disminuir la luz con incidencia indirecta, bien sea por las reflexiones o porque existan fuentes de luz externas, aunque esta última no presupone un inconveniente ya que el experimento se realizó en oscuridad. Para la implementación del sistema se usan dos Raspberry Pi 3, que por medio de la configuración de los puertos GPIO se usan para emitir y recibir la señal de datos. A la Raspberry que emite se le configuran los puertos GPIO como salida, que por medio de un código en Python se activa un puerto, enviando 3,3 V o 0 V, que acciona así una válvula de luz de cristal líquido. De esta forma, se permite o no el paso del haz de luz del LED. El algoritmo del transmisor convierte un carácter tipo ASCII en su respectiva codificación binaria de 8 bits. Para este caso, sabiendo que un número binario está compuesto por “unos” y “ceros”, se relacionó la salida GPIO así: si el carácter enviado es “a”, que en su codificación binaria es igual a “01100001”, entonces a la salida se le envían 3.3 voltios DC por

cada número cero, para que de esta forma la válvula se active y no permita el paso del haz de luz, y para cada número uno se envía cero voltios, para que ahora la válvula permita el paso de esta luz. Después de la lámpara led y la válvula de luz se ubica el lente de Fresnel para concentrar la radiación en un área donde se encuentre el sensor de luz análogo GA1A12S202. Este sensor es estimulado cada vez que llega un haz de luz, el cual convierte esta señal a un voltaje que oscila entre 1.5 a 3.5 voltios, por lo cual fue necesario realizar un comparador de voltaje con un amplificador operacional LM324N, que envía 0 o 2.5 voltios hacia el puerto GPIO de la Raspberry Pi 3 que recibe. En el receptor el algoritmo capta las señales de voltaje entregadas por el comparador para decodificar la señal emitida y obtener nuevamente el caracter ASCII. El montaje experimental se ilustra en la Figura 4.

Figura 4. Disposición experimental. a) Panorama del experimento, b) Receptor, c) Transmisor. d) Diagrama del montaje experimental.



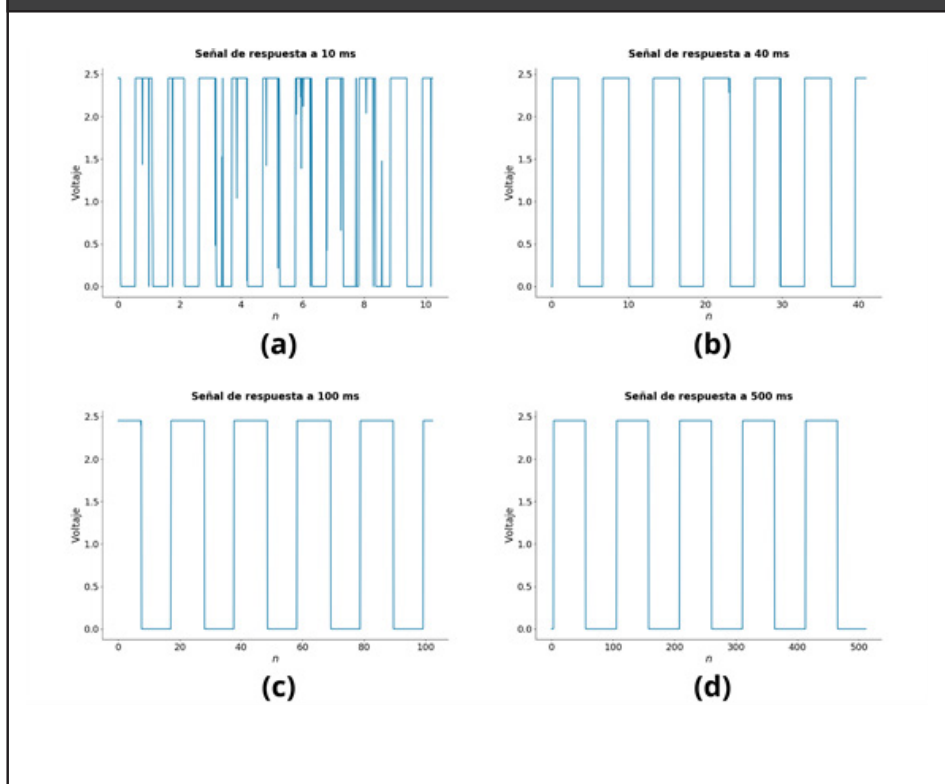
Para facilitar la detección de la información, en el algoritmo se adaptó una sección que permite añadir un encabezado al carácter que se emite. Estas son secuencias de inicio que habilitan una bandera para comenzar a almacenar la secuencia correspondiente al carácter ASCII emitido. De no realizarse esto, el algoritmo del receptor puede tomar como bits emitidos el estado de no transmisión (es decir, cuando la válvula de luz está permitiendo el paso de la luz para la iluminación) previo a comenzar al envío del carácter. El diagrama de flujo del algoritmo para el transmisor y el receptor se pueden observar en la Figura 5. La válvula de luz tiene una frecuencia de conmutación de 30 Hz, según sus especificaciones, por lo que en el algoritmo usamos retardos entre cada bit de 30 ms aproximadamente para observar su comportamiento en el caso extremo. Aun así, realizamos pruebas con retardos tan bajos como 10 ms (100 Hz) para verificar sus limitaciones.

Figura 5. Diagrama de flujo de los algoritmos de: a) transmisor y b) receptor.

2. Resultados

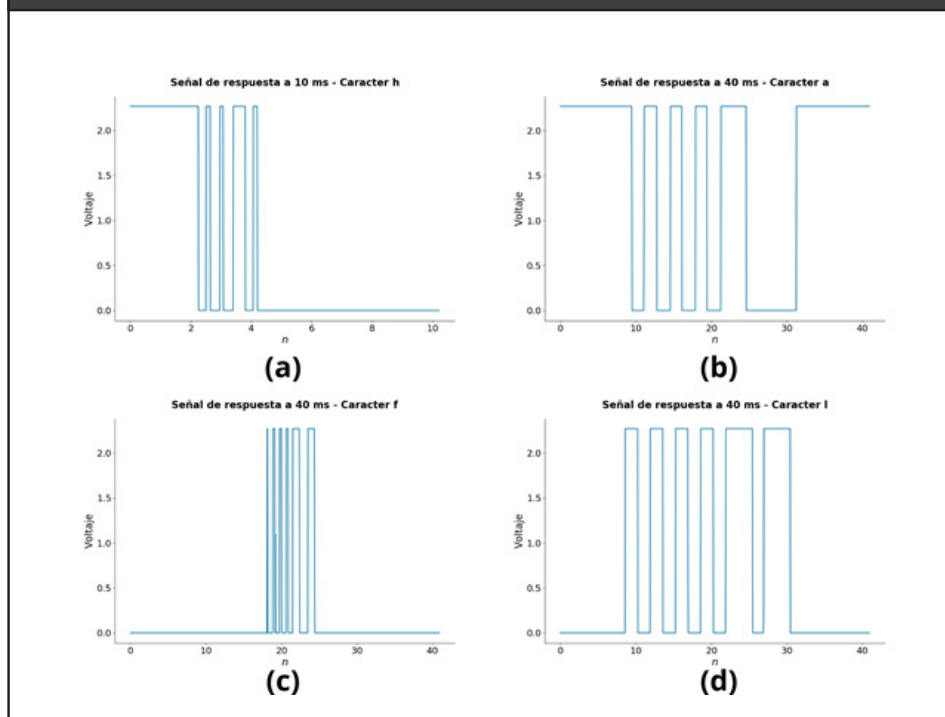
En el experimento, inicialmente medimos a la salida del comparador una señal periódica cuadrada que se generó en la Raspberry del transmisor. La duración del pulso se estableció equivalente al periodo de bit pretendido en la emisión de datos. Las medidas se llevaron a cabo con un osciloscopio integrado de una Redpitaya, cuyo DAC es de 10 bits y con tasa de muestreo de 125 Msps. Medimos diferentes periodos de bit en el experimento y reportamos en este trabajo los datos más relevantes en la Figura 6. A 500 ms y 100 ms de periodo de bit, se puede observar en la Figura 6d y 6c que la válvula de luz funciona muy estable y los pulsos capturados no presentan irregularidades u oscilaciones espontáneas. Cuando medimos pulsos con 40 ms de duración, la forma de los pulsos es bastante definida, pero presentan ligeras transiciones al final del pulso cuando la señal pasa de un estado alto a uno bajo (ver Figura 6b). Este comportamiento es debido a que ya estamos alcanzando el umbral de conmutación de los 30 Hz y la válvula de luz tiene distintos tiempos de establecimiento cuando va de bajo a alto que de alto a bajo. Esto es debido a que las moléculas no tienen un campo eléctrico externo que ejerza un torque sobre ellas cuando el voltaje es removido y dependen solo de las fuerzas que resultan de la interacción entre ellas, por lo que los tiempos de relajación son más lentos que cuando se aplica un voltaje. Cuando medimos con 30 ms, 20 ms y 10 ms, la señal presentó fluctuaciones que presuponen un problema para distinguir la forma del pulso en la detección (ver Figura 6a), aunque con algoritmos de sincronización, muestreando en los puntos adecuados e implementando mecanismos de corrección de errores se pueden afrontar tales impedimentos.

Figura 6. Señales en el tiempo del tren de pulsos periódico transmitido con el uso de la válvula de luz con distintos periodos de pulso. La señal fue medida a la salida del comparador.



A continuación, se procedió a transmitir datos al receptor. En forma de caracteres ASCII. En la Figura 7 se puede observar cómo la señal emitida viene ya sea con emisión de luz o con ausencia de esta, e inicia con una bandera de 8 bits (10101010), después de este inicia el carácter codificado en binario. Se observa en la Figura 7a la señal del carácter enviado “h”, el cual tiene como codificación binaria 01101000; en la Figura 7b la señal del carácter “a” el cual tiene codificación binaria 01100001; en la Figura 7c la señal del carácter “f” con su codificación binaria 01100110; por último, en la Figura 7d la señal del carácter “l” con la secuencia 01101100. Aunque se logró transmitir el carácter h a un periodo de bit de 10 ms, en ocasiones se presentaron errores en la decodificación que al final se traduce en un carácter distinto al transmitido. Usando un periodo de bit de 40 ms no se obtuvieron desaciertos.

Figura 7. Señales de los caracteres recibidos. a) caracter "h" = 01101000, b) caracter "a" = 01100001, c) caracter "f" = 01100110, d) caracter "l" = 01101100.



En el experimento no se utilizó un control de ganancia automática (*AGC: Automatic Gain Control*). Sin embargo, la expectativa es que el alcance del enlace pueda ser mucho mayor y con umbrales de decisión fijos para diversificar su uso en todo tipo de condiciones.

3. Conclusiones

Se presenta una primera aproximación de un sistema de comunicación por luz visible con modulación externa para explotar la luz solar. La velocidad alcanzada de transmisión sin errores fue de 25 bps y de 100 bps con errores. El uso de válvulas de luz, aunque no es adecuado para aplicaciones de alta velocidad por su reducida rapidez de conmutar, pueden ser adecuados para la implementación de sistemas de bajo costo ya que cada una vale tan solo \$1.5 USD. Este sistema encontraría un nicho en las redes de sensores inalámbricos que sean autónomos en energía ya que, al estar expuestos a la luz solar, podrían además almacenarla para condiciones de poca luz y las noches.

Este trabajo abre las puertas a una serie de trabajos futuros que buscarán la forma de explotar de manera más directa y eficiente la luz solar para las comunicaciones. El siguiente paso en la agenda es desarrollar un sistema de control para un espejo que siga el sol y a la vez mantenga la reflexión de los rayos en una sola dirección determinada. Por otro lado, está la implementación de un AGC y desarrollar algoritmos que permitan la regeneración de la señal, y por último implementar en el software algún mecanismo de corrección de errores. Desde el punto de vista de la capa física, para aumentar más la velocidad de transmisión, se tiene programado investigar en dispositivos que exploten fenómenos rápidos como lo es el electro-óptico, acusto-óptico o el de electro-absorción para desarrollar sistemas de comunicación

más competentes en entornos que exigen una mayor velocidad bajo la restricción de un bajo costo de implementación y despliegue. Esto nos lleva a investigar desde un punto de vista de teórico, la naturaleza de la radiación del sol y sobre las posibilidades de lograr a partir de esta una radiación coherente en espacio y tiempo. Esto podría abrir la posibilidad de llevar a cabo comunicaciones VLC de alta velocidad.

4. Referencias

- Chow, C. W.; Yeh, C. H.; Liu, Y. F.; Huang, P. Y. (2013). Mitigation of optical background noise in light-emitting diode (LED) optical wireless communication systems. *IEEE Photonics Journal*, 5(1). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2013.2238618>
- Forrest, M. M. I. (1976). Alexander Graham Bell and the Invention of the Telephone. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 123(12), pp. 1387–1388. <https://doi.org/10.1049/piee.1976.0281>
- Jackson, D. K.; Buffaloe, T. K.; Leeb, S. B. (1998). Fiat lux: A fluorescent lamp digital transceiver. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(3), pp. 625–630. <https://doi.org/10.1109/28.673734>
- Karunatilaka, D.; Zafar, F.; Kalavally, V.; Parthiban, R. (2015). LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3), pp. 1649–1678. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2417576>
- Martínez Ciro, R. A.; López Giraldo, F. E.; Betancur Perez, A. F. (2016). RGB Sensor Frequency Response for a Visible Light Communication System. *IEEE Latin America Transactions*, 14(12), pp. 4688–4692. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7816998>
- Navarro Restrepo, J. D.; Rojas Úsuga, J.; Martínez Ciro, R.; Betancur Pérez, A.; López Giraldo, F. (2020). Caracterización de un convertidor de luz a frecuencia TSL235R-LF, para su aplicación en un sistema de comunicación por luz visible. *Revista EIA*, 17(34), pp. 1–7. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1139>
- Pang, G.; Kwan, T.; Chan, C. H. (1999). LED traffic light as a communications device. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, pp. 788–793. <https://doi.org/10.1109/itsc.1999.821161>
- Quintana Sánchez, C. (2013). Transmisión de datos por medio de sistemas VLC. *Vector Plus*, 38, pp. 34–41. <http://acceda.ulpgc.es/handle/10553/11881>
- Rehman, S. U.; Ullah, S.; Chong, P. H. J.; Yongchareon, S.; Komosny, D. (2019). Visible light communication: A system perspective—Overview and challenges. *Sensors (Switzerland)*, 19(5), pp. 1–22. <https://doi.org/10.3390/s19051153>
- Standard, I., & Society, I. C. (2011). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks — Audio Video Bridging (AVB) Systems IEEE Computer Society Sponsored by the (Issue September).
- Tanaka, Y.; Haruyama, S.; Nakagawa, M. (2000). Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 2, pp. 1325–1329. <https://doi.org/10.1109/pimrc.2000.881634>