

Evaluation of an AGC for a Solar Panel as a Receiver in a VLC System Applied to Access Control

S. Valencia-Lozano , R. A. Martínez-Ciro , and F. E. López-Giraldo 

Abstract— Visible light communication (VLC) technology allows data to be transmitted using the optical power emitted by light-emitting diodes (LEDs). The optical receiver usually employs light sensors such as photodiodes, image sensors, photoresistors or solar panel. In the last decades, VLC technology has explored the use of solar panels as data receivers, since they offer the service of power generation, in addition to, a larger surface area to capture the light beam. In this paper, we present the performance evaluation of a VLC system based on solar panel and automatic gain control (AGC) with application in access control systems. Three experiments are proposed to evaluate the uses of the solar panel as information receiver in VLC systems: bandwidth (BW) estimation, VLC system performance and panel viewing angle variation. As a result, we were able to determine a BW of 10 kHz and 190 kHz considering the panel without AGC and with AGC. In the context of digital modulation, a RS-232 module of an Arduino UNO development system was used in order to execute the technique of intensity modulation and direct detection IM/DD. The NRZ line code of the serial interface was used to modulate the electric current of the LED with a maximum symbol rate of 38400 baud with a data effectiveness of 91%. Furthermore, we found that AGC strengthens the dynamic range of the solar panel's viewing angle and the performance of the VLC system.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/8591>

Index Terms— Visible light communication (VLC), Light-emitting diodes (LEDs), Optical communication system, Light sensors, solar panel, Automatic gain control (AGC).

I. INTRODUCCIÓN

La tecnología de comunicación por luz visible (VLC, visible light communication) se fundamenta sobre la premisa de que la luz visible puede desempeñar un papel crucial en la transmisión de datos, de manera análoga a las radiofrecuencias convencionales. Sin embargo, en lugar de emplear ondas de radiofrecuencia, la tecnología VLC aprovecha el rango de luz visible para transmitir información [1], [2]. Esto no solo libera la congestión del espectro electromagnético, sino que también ofrece ventajas únicas, como la reutilización de la infraestructura de iluminación existente en diferentes escenarios. A diferencia de las comunicaciones RF, la creciente demanda de espectro radioeléctrico ha impulsado a los entes reguladores y la industria a buscar soluciones innovadoras para mitigar la congestión del espectro, incluso ha llegado al punto

en donde las bandas de frecuencia deben ser subastadas [3]. Adicionalmente, otra regulación se ve en la potencia transmitida por las antenas, que a menudo debe ser regulada para evitar interferencias y efectos adversos en la salud [4]. VLC no presenta estas restricciones. Esta capacidad inherente de operar sin restricciones de potencia confiere a las tecnologías VLC un potencial significativo para aplicaciones en áreas sensibles o densamente pobladas.

La evolución de los diodos emisores de luz (LEDs, light-emitting diodes) ha sido fundamental para el avance de las tecnologías ópticas inalámbricas [5], [6]. Estos dispositivos han demostrado ser buenos candidatos para transmitir información codificada a través de la luz y forman la base de la infraestructura VLC. Los LEDs no solo son eficientes en términos energéticos, sino que también ofrecen una vida útil prolongada y una capacidad de conmutar a altas frecuencias, lo que les permite modular a altas velocidades. Estas características han permitido que VLC se consolide como una solución viable para aplicaciones de corto alcance, como la comunicación en interiores, en entornos como oficinas, hospitales y espacios públicos [7]–[9].

Existen diversos estudios para mejorar la distancia del enlace y la capacidad de recepción de diferentes sensores ópticos en sistemas VLC [10]. Entre ellos, los paneles solares son propuestas atractivas debido al bajo costo, fácil acoplamiento con sistemas electrónicos y la generación de energía de manera simultánea [11]–[13]. Tales características son indispensables en aplicaciones como sistemas de control de acceso, localización en interiores o internet de las cosas [14], [15]. Por lo anterior, el trabajo propuesto en [16], presenta una técnica basada en modulación por amplitud de pulso para mejorar el desempeño del panel solar como receptor óptico. En otra propuesta de menor complejidad de implementación, sugieren utilizar circuitos análogos de equalización para mejorar la respuesta en frecuencia del sensor óptico [17]. En dicha línea de trabajo, también se está explorando el uso de unidades de control automático de ganancia (AGC, automatic gain control), como el propuesto por Fuada et al. [18], donde adaptan un AGC LM13700 en la tecnología VLC para acondicionar una señal lumínica en beneficio de mitigar problemas de recepción en sistemas de movilidad en interiores. Sin embargo, estos AGC son diseñados específicamente para dichos ambientes y no se considera la utilización de AGC comerciales ajenos a las implementaciones de comunicaciones ópticas inalámbricas.

Por otra parte, el panel solar se ha explorado como receptor óptico en sistemas de comunicación por luz visible, el cual posee diferentes estudios en los cuales se determinan de qué

R. A. Martínez-Ciro, F. E. López-Giraldo and S. Valencia-Lozano are with the Metropolitan Institute of Technology of Medellín, Medellín, Colombia (e-mails: rogermartinez@itm.edu.co, franciscolopez@itm.edu.co and simonvalencia255587@correo.itm.edu.co).

forma las condiciones ambientales afectan las celdas fotovoltaicas [19], y su efecto en las comunicaciones. En dicha línea, el trabajo propuesto en [20], presenta un sistema de comunicación óptico basado en una celda solar para aplicaciones de comunicación en entornos de exteriores, donde reportan el compromiso de la respuesta en frecuencia del panel solar frente a variaciones de iluminación externa. El panel solar ofrece características útiles para generación de energía y también en aplicaciones de comunicaciones ópticas, sin embargo, su baja respuesta en frecuencia ha conducido a trabajos de investigación donde exploran diferentes tecnologías de construcción de paneles solares orgánicos [21], [22], lo cual hace complejo su uso en aplicaciones VLC prácticas. Adicionalmente, se conoce como afecta la irradiación de la luz solar en los sistemas VLC con respecto a los ángulos que forma el sol en el cielo, como lo son la media de Greenwich o la ascensión recta [23]. Sin embargo, pocos estudios indagaron sobre los ángulos a los cuales el panel solar puede recibir datos de modulaciones digitales de manera efectiva en sistemas VLC. También, se evidencia la necesidad de evaluar algún sistema de acondicionamiento electrónico de las señales eléctricas entregadas por el panel solar que puedan ser procesadas por un sistema digital.

Por las razones expuestas, en este trabajo se proponen tres experimentos fundamentales. En primer lugar, se llevó a cabo un experimento centrado en la medición del ancho de banda del panel solar acoplado a un AGC y su utilidad en un sistema VLC. El segundo experimento se enfocó en analizar la relación entre el error de bit y la distancia de transmisión de un sistema con modulación digital. Dicho experimento está basado en dos Arduinos que cumplen funciones de TX y RX, incluyendo un circuito comparador de ventana para acondicionar la señal entregada del panel para que se mantenga en los límites en los que el Arduino RX la pueda reconocer. Finalmente, el tercer experimento se dedicó a explorar el rendimiento del sistema VLC bajo la influencia de diferentes ángulos de incidencia de la luz modulada sobre la superficie del panel solar.

El resto del artículo tiene la siguiente estructura: La Sección II describe la metodología implementada, así como los detalles técnicos de la arquitectura VLC y los experimentos. En la sección III se presentan y discuten los resultados obtenidos alrededor de la respuesta en frecuencia del sistema VLC y la capacidad de transmisión en función de la distancia del enlace. Por último, la Sección VI presenta las conclusiones de este artículo.

II. DISEÑO EXPERIMENTAL

Inicialmente, se proyectó un experimento para indagar la respuesta de un control automático de ganancia comercial como el AGC MAX 9814 acoplado a un panel solar. Tenga en cuenta que dicho dispositivo está perfectamente acoplado a las señales de un micrófono electret. Sin embargo, es de interés conocer su funcionalidad con un panel solar y determinar la capacidad de dicho sistema en la recepción de señales ópticas. Por lo tanto, se estimó la respuesta en frecuencia del receptor óptico bajo las siguientes configuraciones, como se observa en la Fig. 1. El experimento fue realizado en un espacio de laboratorio donde se consideró la fuente de iluminación del escenario como fuente de ruido óptico (iluminación externa). La fuente de iluminación corresponde a una luminaria blanca de tecnología LED de 40

vattios de potencia, situada en el techo y a una distancia del sistema VLC de 2.5 metros. Tenga en cuenta que el sistema VLC está ubicado sobre una mesa de trabajo con altura del piso de 0.9 metros. Por otra parte, el módulo fotovoltaico es una fuente de corriente que, adaptado a la resistencia de carga de 220Ω se comporta como una fuente de voltaje. Este se conectó directamente a un osciloscopio TELEDYNE LECROY waveAce2032. El montaje experimental consta de los siguientes elementos: el generador de señales RIGOL DG4162 suministra al transmisor VLC una señal sinusoidal de amplitud constante y frecuencia variable. El transmisor VLC está conformado por un LED azul de 10 mm de diámetro, voltaje de polarización de 3 V y corriente nominal de 20 mA. Dicho diodo emite luz modulada a través del espacio libre hasta la superficie del panel solar. Dicho panel solar tiene un área física de 34 cm^2 con voltaje de trabajo de 5 V y corriente máxima de 100 mA. Finalmente, la señal eléctrica entregada por el receptor óptico es analizada con el osciloscopio para estimar la respuesta en frecuencia.

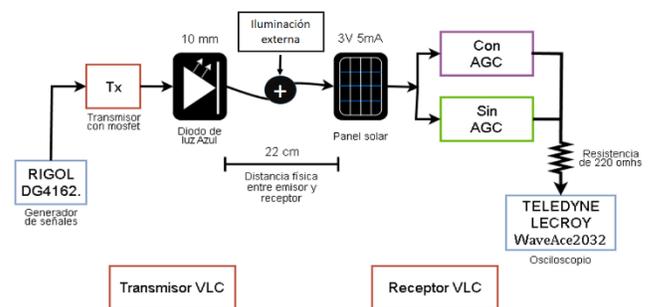


Fig. 1. Diagrama a bloques del sistema VLC para estimar la respuesta en frecuencia.

En la Fig. 2 se muestra el diagrama del prototipo del sistema VLC para la aplicación de control de acceso. En dicha figura se puede apreciar el enlace de comunicación por luz visible y dos sistemas de desarrollo Arduino UNO que representan el control de acceso mediante la manipulación de dos LEDs. Por lo tanto, en el apartado de comunicaciones digitales se lleva a cabo el estudio y la implementación del protocolo de comunicación serial RS232 empleando la plataforma de desarrollo libre Arduino UNO. Este protocolo se utiliza en conjunto con el sistema de comunicación por luz visible. El objetivo principal es hacer control de acceso con dos diodos emisores de luz verde de 5 mm conectados a cada Arduino, designados como a, b, y A, B, como se observa en la Fig. 2

El transmisor óptico está integrado por una placa Arduino UNO que se encarga de generar los datos binarios modulados en formato de encendido y apagado (OOK, on-off keying) bajo el protocolo de comunicación serial RS-232. El protocolo de comunicación consta de una trama de 8bits para datos y dos bits para inicio y fin. Dicho protocolo es gestionado por el microcontrolador Atmega 328 el cual permite configurar diferentes velocidades de transmisión. Tenga en cuenta que la velocidad de transmisión debe ser la misma en ambas terminales (TX y RX). En ese sentido, los datos binarios a transmitir son representados por una señal eléctrica digital.

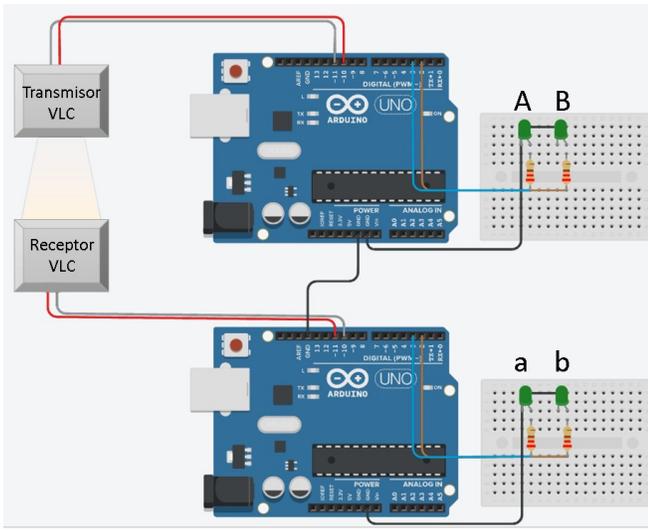


Fig. 2. Prototipo del sistema VLC para control de acceso.

Dicha señal es utilizada por el driver VLC para controlar la potencia óptica emitida por el LED de 10 mm. Las señales ópticas son portadoras de información y son propagadas por el espacio libre hasta el receptor VLC (panel solar). Es importante destacar que en el transmisor no se utilizan capacitores de acople, ya que este emite y recibe señales digitales, como se puede observar en la Fig. 3.

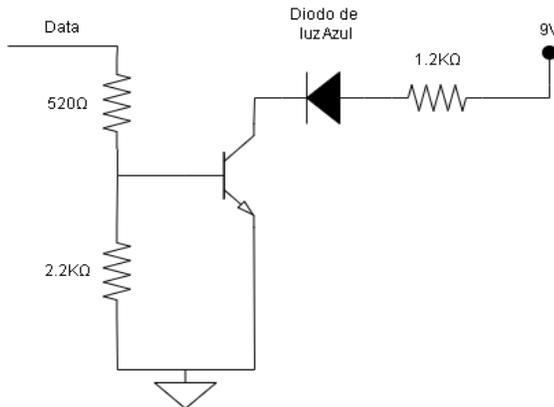


Fig. 3. Driver del transmisor VLC para modulaciones digitales.

El receptor VLC está integrado por un panel solar, un amplificador operacional configurado como comparador de ventana y un sistema de desarrollo Arduino UNO, como se muestra en la Fig. 4. El panel solar convierte las señales ópticas en señales de voltaje que contienen la información de los datos transmitidos. Dichas señales se encuentran sobre niveles DC y fuera del rango soportado por sistemas digitales TTL. Por lo tanto, un capacitor es utilizado en la salida del panel solar para eliminar la componente DC. Adicionalmente, un comparador de ventana es configurado con el amplificador operacional TL 071 para reconstruir los pulsos eléctricos y convertir los niveles de voltaje a rangos permitidos (0v – 5v). Finalmente, las señales reconstruidas por el comparado de ventana son llevadas al Arduino UNO mediante los pines de comunicación serial. Es importante que la velocidad del receptor sea la misma del transmisor, ya que de lo contrario el sistema estaría fuera de sincronización para la identificación de la información. El

microcontrolador Atmega 328 de la tarjeta Arduino UNO del receptor se encarga de gestionar el protocolo de comunicación serial mediante la identificación del bit de inicio, trama de datos y bit de parada. Dicho dispositivo se encarga de decodificar los datos transmitidos y extraer la información que permitirá hacer control de procesos en un sistema de acceso.

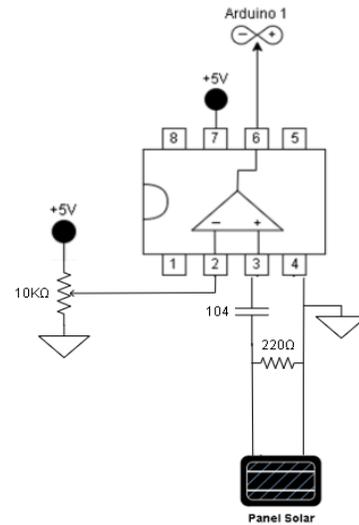


Fig. 4. Receptor VLC para modulaciones digitales

En el último experimento, se buscó determinar los ángulos óptimos para la recepción de datos por parte del panel solar. Para ello, se utiliza la configuración de transmisión y recepción del experimento previo. El panel solar se coloca en una plataforma giratoria de Thorlabs LJ750 situada a 20 cm del transmisor VLC.

Se procede a configurar el transmisor para enviar datos de forma continua, mientras se realiza un control exhaustivo de la recepción de estos datos por parte del receptor óptico. La plataforma giratoria se ajusta en orientación derecha e izquierda, ver Fig. 5, con el objetivo de determinar en qué ángulos el panel solar no es capaz de captar de manera efectiva los datos transmitidos.

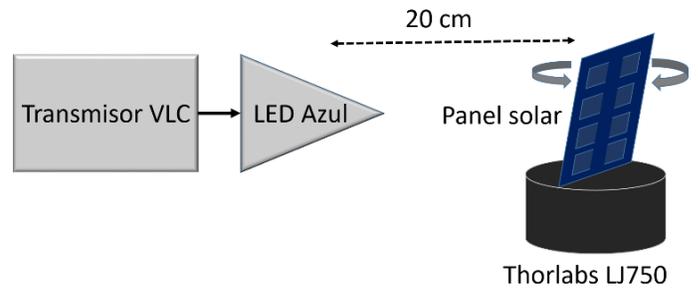


Fig. 5. Evaluación del desempeño del sistema VLC en función del ángulo de rotación del panel solar.

La Tabla I resume los valores de variables y características técnicas de los dispositivos electrónicos y ópticos utilizados en este trabajo. Aquí se muestra una breve descripción del dispositivo electrónico utilizado y sus características más relevantes.

TABLA I
IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICO Y ÓPTICOS

Nombre	Descripción	Característica
LED azul	LED utilizado como transmisor VLC	LED de 10 mm de diámetro, 3 V, 20 mA
LED verde	LED utilizado como indicador en el sistema de control de acceso	LED de 5 mm de diámetro, 1.5 V, 20 mA
Panel solar	Actúa como receptor óptico	Área física de 34 cm ² , 5 V, 100 mA
AGC	Control automático de ganancia	MAX 9814
Arduino	Plataforma de desarrollo para el Tx y Rx	Arduino UNO con MCU Atmega 328p
Transistor	Se configura como driver para el LED azul	2N3904
Amplificador	Se configura como comparador	TL 071

III. RESULTADOS

El montaje experimental del sistema de comunicación por luz visible basado en un panel solar acoplado a un AGC es mostrado en la Fig. 6. Se puede evidenciar la disposición de las tarjetas Arduino UNO que actúan como transmisor y receptor para el sistema VLC. También, la plataforma para configurar la distancia del enlace de comunicación, el dispositivo mecánico de Thorlabs LJ750 para controlar la orientación del panel solar y los equipos de medición científica como el osciloscopio y el generador de señales utilizados en la estimación del ancho de banda (BW, bandwidth).

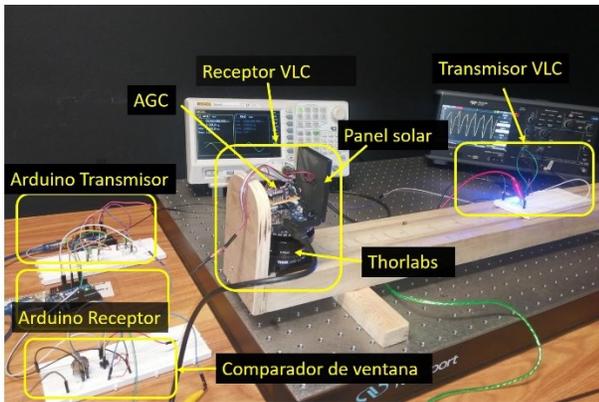


Fig. 6. Montaje experimental del sistema VLC basado en panel solar y AGC

La respuesta en frecuencia del sistema VLC utilizando un panel solar con y sin resistencia de carga (RL) es mostrada en la Fig. 7. Se puede observar que el panel solar actuando como receptor VLC ofrece un mejor BW que sin resistencia de carga. Específicamente, se encontró una respuesta en frecuencia de 3.5 kHz sin considerar resistencia de carga y de 10 kHz considerando una resistencia de carga de 220 Ω. Tenga presente que, si bien la respuesta en frecuencia del panel solar puede mejorar considerablemente al utilizar una resistencia de carga < 220 Ω, la amplitud del voltaje de salida es considerablemente baja < 1 V_{pp}. Esto debe ser considerado en el diseño del receptor óptico puesto, que la calidad de la señal se puede ver

comprometida.

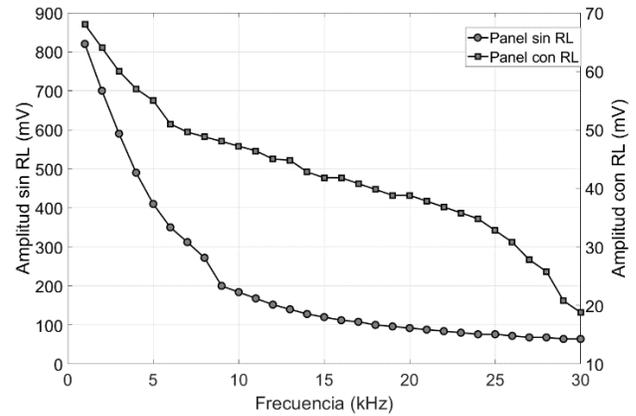


Fig. 7. Respuesta en frecuencia del receptor VLC. La parte derecha del eje y, representa la amplitud considerando resistencia de carga en el panel solar. Mientras que la otra parte del eje y, representa la amplitud del sistema sin considerar resistencia de carga.

Por otra parte, la respuesta en frecuencia del panel solar acoplado a un AGC es mostrada en la Fig. 8. Para esto, dos configuraciones fueron establecidas. La primera consistió en conectar el panel solar directamente a la entrada del AGC. La segunda configuración consistió en conectar una resistencia de carga en paralelo con el panel solar y el AGC con el fin de observar su respuesta en frecuencia. Se observó un mejor rendimiento del panel solar acoplado al AGC y con resistencia de carga. El BW obtenido fue de 190.2 kHz, mientras que para el primer caso fue de 89.6 kHz. Sin duda, el panel solar ofrece un mejor comportamiento en frecuencia al ser acoplado al AGC, incluso sin requerir resistencia de carga. Tenga en cuenta que las mediciones de la respuesta en frecuencia fueron realizadas considerando la iluminación del escenario de trabajo.

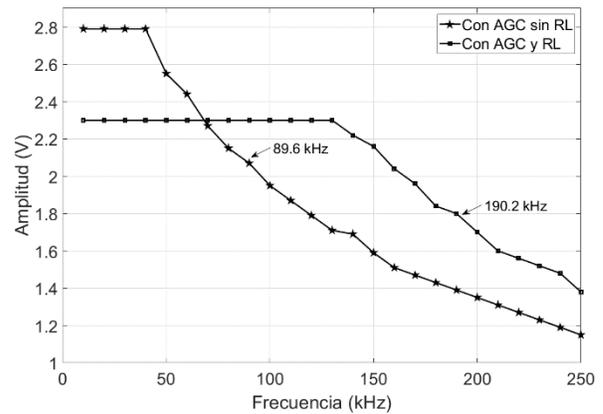


Fig. 8. Respuesta en frecuencia del sistema VLC con AGC

Respecto a la evaluación del rendimiento del sistema VLC para señales con modulación digital, la Fig. 9 muestra la velocidad de modulación máxima soportada, en un enlace de 20 cm de distancia. Para cada experimento de comunicación se generaron 1500 bytes de información, los cuales fueron transmitidos por el sistema VLC empleando el protocolo de comunicación serial. En este trabajo se considera una efectividad de datos recibidos por lo menos del 90%, debido a que es funcional para ser aplicado en un sistema de control de

acceso. Se puede evidenciar la utilidad del control automático de ganancia acoplado al panel solar, el cual mostró una velocidad de baudio de 38.4 kbps con una efectividad del 91%. Mientras que para el panel sin acople al AGC, la velocidad máxima fue de 9.6 kbps con una efectividad de datos del 92%.

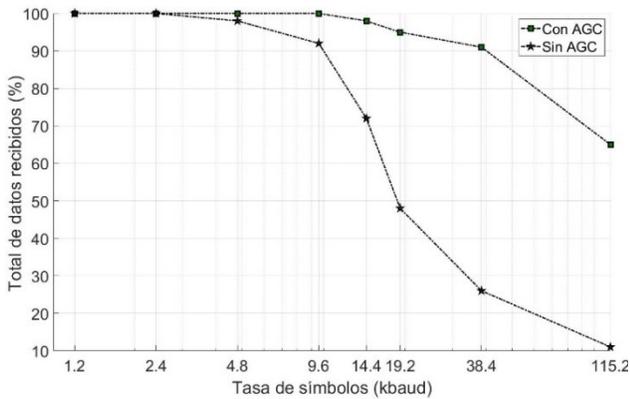


Fig. 9. Velocidad máxima del sistema VLC para el panel solar con y sin AGC

Por otra parte, se registró el desempeño del sistema VLC en función de la distancia del enlace, para una velocidad de transmisión de símbolo efectiva de 4.8 kbps, como se muestra en la Fig. 10. Se puede evidenciar que el panel solar acoplado al AGC ofrece una mejor distancia del enlace de comunicación, aproximadamente de 100 cm con una efectividad de datos del 93%, mientras que sin AGC la distancia máxima es de 60 cm con una efectividad de datos del 92%.

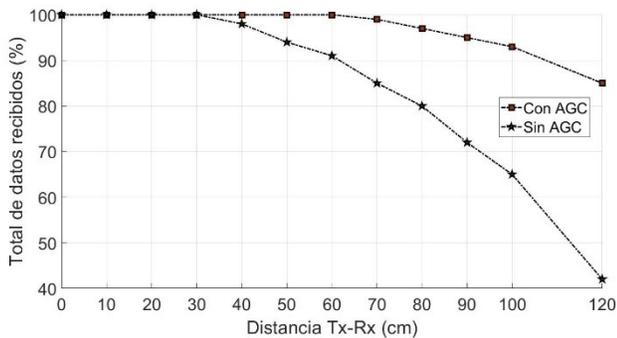


Fig. 10. Desempeño del sistema VLC para diferentes distancias del enlace

Finalmente, el sistema VLC también fue evaluado en función del ángulo de llegada de la luz a la superficie del panel solar, como se aprecia en la Fig. 11. Se puede observar que el panel sin AGC posee efectividad de recepción de datos superior al 96% con un ángulo de incidencia de la luz menor o igual a los 60°. Adicionalmente, se observó la mayor pérdida de información de datos con ángulos de visión del panel superior a 61°. Sin embargo, para el panel acoplado al AGC ofrece un mayor rango de funcionamiento (efectividad de datos del 91% para un ángulo del panel $\leq 80^\circ$). Este fenómeno se origina debido a que las señales de luz, al abarcar un área superficial reducida sobre el panel solar, generan niveles de voltaje mínimos, los cuales son controlados y amplificados por el AGC.

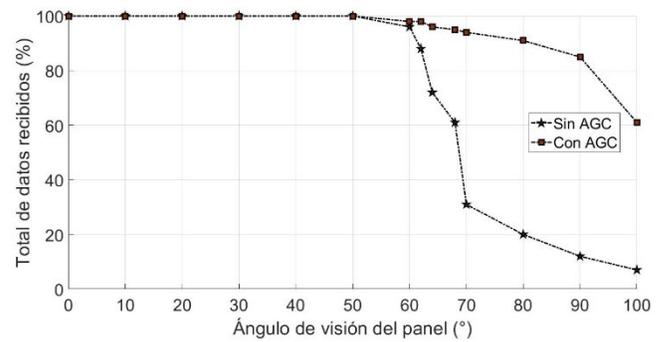


Fig. 11. Desempeño del sistema VLC en función del ángulo de visión del panel solar

Los resultados de ancho de banda y desempeño en la comunicación del sistema VLC con panel solar y AGC, tienen potencial para ser aplicados en sistemas de control de acceso. Dicha aplicación exige sistemas de comunicación de baja capacidad de información con distancias de enlace reducidas, similar a los sistemas RFID. Por lo tanto, para garantizar una efectividad de los datos recibidos, es recomendable emplear la arquitectura VLC propuesta en este trabajo considerando el panel acoplado al AGC y velocidad de transmisión menor o igual a 9600 baudios con distancias de enlace menores a 50 cm.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un método para evaluar el desempeño de un sistema VLC considerando un panel solar con y sin acople a un control automático de ganancia.

El sistema propuesto aborda el problema de baja capacidad de ancho de banda y de comunicación de datos digitales de un panel solar, en su figura como receptor de luz en un sistema de comunicación óptico inalámbrico. Esta solución ofrece un compromiso entre mejorar el ancho de banda y reducir el error de recepción de datos al incluir un AGC comercial de micrófono en el acoplamiento del panel solar con resistencia de carga de 220 Ω . En particular, se mostró que con la configuración mencionada se logró un BW de 190.2 kHz y un desempeño del sistema de comunicación de 38400 baudios con efectividad de datos del 91%, lo que lo hace potencial en aplicaciones de bajo régimen binario, teniendo en cuenta el ángulo de visión del panel solar con el fin de garantizar los mínimos valores prácticos de rendimiento del sistema VLC. Quiere decir que los cambios de iluminación externa afectan en menor medida la capacidad de recepción del panel solar. Finalmente, el sistema VLC propuesto es robusto con respecto a la iluminación externa y el desempeño de la comunicación, siempre que la potencia óptica externa no sobre pase el nivel de saturación del panel solar (5 V).

Como trabajo futuro, se vislumbra realizar un estudio a fondo del acople de impedancias entre el panel solar y el AGC de tal forma que la señal de voltaje generada por el panel pueda tener el máximo aprovechamiento por el sistema VLC. Por otro lado, se plantea realizar un estudio con modulaciones multinivel para maximizar la capacidad de información del panel solar, considerando espacios de trabajo reales con diferentes condiciones ambientales que permitan evaluar la robustez y la eficiencia energética del panel solar considerando la baja potencia óptica emitida por el LED transmisor y su aprovechamiento con técnicas de almacenamiento de energía.

V. REFERENCIAS

- [1] IEEE Consumer Electronics Society and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Implementation of Visible Light Communication System with Auto Gain Control*. Osaka, Japan, 2019. doi: 10.1109/GCCE46687.2019.9015589.
- [2] R. A. Martínez, F. E. López, and A. F. Betancur, “RGB Sensor Frequency Response for a Visible Light Communication System,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 12, pp. 4688–4692, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7816998.
- [3] C. D. Calero Maila, “Análisis de tecnología Li-fi como comunicación por luz visible (VLC) y su integración al internet de las cosas (IOT),” *Repos. Inst. la Univ. Politécnica Sales.*, vol. 67(1), 60–, p. 80, 2020.
- [4] F. Barnes and B. Greenebaum, “Some Effects of Weak Magnetic Fields on Biological Systems: RF fields can change radical concentrations and cancer cell growth rates,” *IEEE Power Electron. Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 60–68, Mar. 2016, doi: 10.1109/MPLEL.2015.2508699.
- [5] R. A. Martínez-ciro, F. E. López-giraldo, J. M. Luna-rivera, and A. M. Ramírez-aguilera, “An Indoor Visible Light Positioning System for Multi-Cell Networks,” *photonics*, vol. 9, no. 146, pp. 1–13, 2022.
- [6] P. A. Loureiro, F. P. Guiomar, and P. P. Monteiro, “Visible Light Communications: A Survey on Recent High-Capacity Demonstrations and Digital Modulation Techniques,” *Photonics*, vol. 10, no. 9, 2023, doi: 10.3390/photonics10090993.
- [7] R. A. Martínez, F. E. López, A. F. Betancur, and J. M. Luna, “Characterization of Light-To-Frequency Converter for Visible Light Communication Systems,” *electronics*, vol. 7, no. 165, pp. 1–11, 2018, doi: 10.3390/electronics7090165.
- [8] R. A. Martínez, F. E. López, A. F. Betancur, and J. M. Luna, “Design and Implementation of a Multi-Colour Visible Light Communication System Based on a Light-to-Frequency Receiver,” *Photonics*, vol. 6, no. 42, pp. 1–17, 2019, doi: 10.3390/photonics6020042.
- [9] R. A. Martínez-Ciro, D. M. Morales-Morales, F. E. López-Giraldo, and J. D. Rojas-Usuga, “Visible light communication channel with a smartphone screen as a transmitter and color shift keying modulation for access control applications,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1547, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1547/1/012002.
- [10] L. E. Mendes Matheus, A. Borges Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira, and O. Gnawali, “Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3204–3237, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2913348.
- [11] Z. Wang, D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, “On the Design of a Solar-Panel Receiver for Optical Wireless Communications with Simultaneous Energy Harvesting,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 8, pp. 1612–1623, 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2391811.
- [12] M. Kong *et al.*, “Survey of energy-autonomous solar cell receivers for satellite–air–ground–ocean optical wireless communication,” *Prog. Quantum Electron.*, vol. 74, no. October, p. 100300, 2020, doi: 10.1016/j.pquantelec.2020.100300.
- [13] W. Zhao, M. Kamezaki, K. Yamaguchi, M. Konno, A. Onuki, and S. Sugano, “Investigation on image signal receiving performance of photodiodes and solar panel detectors in an underground facility visible light communication system,” *Opt. Express*, vol. 29, no. 2, p. 692, 2021, doi: 10.1364/oe.413026.
- [14] C.-Y. Hong *et al.*, “Visible light positioning (VLP) system using low-cost organic photovoltaic cell (OPVC) for low illumination environments,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 18, p. 26137, 2020, doi: 10.1364/oe.399711.
- [15] M. Kong *et al.*, “AquaE-lite Hybrid-Solar-Cell Receiver-Modality for Energy-Autonomous Terrestrial and Underwater Internet-of-Things,” *IEEE Photonics J.*, vol. 12, no. 4, 2020, doi: 10.1109/JPHOT.2020.3013995.
- [16] H. Y. Wang *et al.*, “Using pre-distorted PAM-4 signal and parallel resistance circuit to enhance the passive solar cell based visible light communication,” *Opt. Commun.*, vol. 407, no. April 2017, pp. 245–249, 2018, doi: 10.1016/j.optcom.2017.09.010.
- [17] H. Li, X. Chen, B. Huang, D. Tang, and H. Chen, “High Bandwidth Visible Light Communications Based on a Post-Equalization Circuit,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 2, pp. 119–122, Jan. 2014, doi: 10.1109/LPT.2013.2290026.
- [18] S. Fuada, T. Adiono, and A. Pradana, “Employing LM13700 as AGC for mobile visible light communication system,” *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 9, no. 2, pp. 88–93, 2020, doi: 10.18178/ijeetc.9.2.88-93.
- [19] F. R. Riccio Anastacio, “Seguidor solar a dos ejes cuya posición se calcula utilizando los ángulos de elevación y Azimut del sol en Guayaquil,” *Recimundo*, vol. 6, no. 1, pp. 225–231, 2022, doi: doi.org/10.26820/recimundo/6.(1).ene.2022.225-231.
- [20] N. Lorriere *et al.*, “Photovoltaic Solar Cells for Outdoor LiFi Communications,” *J. Light. Technol.*, vol. 38, no. 15, pp. 3822–3831, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.2981554.
- [21] S. Zhang *et al.*, “Organic solar cells as high-speed data detectors for visible light communication,” *Optica*, vol. 2, no. 7, pp. 607–610, 2015, doi: 10.1364/optica.2.000607.
- [22] I. Tavakkolnia *et al.*, “Organic photovoltaics for simultaneous energy harvesting and high-speed MIMO optical wireless communications,” *Light Sci Appl.*, vol. 10, no. 41, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1038/s41377-021-00487-9.
- [23] M. S. Islim *et al.*, “The Impact of Solar Irradiance on Visible Light Communications,” *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 12, pp. 2376–2386, 2018, doi: 10.1109/JLT.2018.2813396.



Simon Valencia Lozano received his Telecommunications Technologist degree from the Instituto Tecnológico Metropolitano in the year 2022. He is currently studying Engineering at the same University and is a young researcher at the ITM.



Roger Alexander Martínez Ciro received the bachelor's degree in telecommunication engineering, the master's degree in automation and industrial control and the Ph.D. degree in Engineering from the Metropolitan Institute of Technology of Medellín, Colombia in 2015, 2018 and 2023 respectively. He is currently a research professor at engineering Faculty of the Metropolitan Institute of Technology, Colombia since 2018. His research interests includes Optical Wireless Communication, Indoor Positioning and Visible Light Communication.



Francisco Eugenio López Giraldo received the B.Sc. degree in Physics on Quantum Optics in 2003, the M.Sc. degree in Physics on Many-Body Interactions in Semiconductors in 2007 and Ph.D in Physics on Semiconductor Nanostructures in 2009 from the Antioquia University of Colombia. During his Ph.D. studies in Semiconductor Nanostructures at the Antioquia University (2006 - 2009), he study of electronic and optic properties of semiconductor nanostructures, specifically the Landè g Factor. In 2008, he worked in UNICAMP on Optical Properties of Semiconductor Heterostructures. He is currently a research professor at engineering faculty of the Metropolitan Institute of Technology, Colombia since 2009. His research interests includes Antennas, Wireless Communication and Visible Light Communication.