

# Experimental Validation of Inverse M-PPM Modulation for Dimming Control and Data Transmission in Visible Light Communications

J.L. Henao-Rios, *Member, IEEE*, N. Guerrero-González and J. C. García-Álvarez, *Senior, IEEE*

**Abstract**—A hybrid-coding scheme based on Multi-Pulse Position Modulation (M-PPM) and Pulse Width Modulation (PWM) is proposed and experimentally validated for simultaneous control of illumination and data transmission in a visible light communication system VLC (Visible Light Communications). The implemented VLC system complies with the dual functionality of indoor lighting and data transmission using low cost components. The codification implemented allows data transmission at a constant speed despite the lighting levels supported by the VLC system. The proposed and experimentally validated coding solves the problem of the interdependence between the data transmission rate and the variation of the lighting levels. Such interdependence is caused by the variation of the useful cycle available for data transmission after the lighting control performed by PWM. In this work, the feasibility of the implementation of the proposed scheme is demonstrated using low cost elements and commercial photodetectors. A constant transmission speed of 30 kbit/s was obtained with two 10W RGB LEDs at 0.9 meters from the OPT101 photodetector from Texas Instruments, with a range of illumination ranging from 25% to 85% of the possible luminous power of the LED sources.

**Index Terms**—Lighting control, RGB LEDs, M-PPM, PWM, VLC.

## I. INTRODUCTION

Las redes de comunicación por luz visible (VLC) para uso interior denominadas “Indoor OWC” (Optical Wireless Communication por sus siglas en ingles), permitirán en un futuro cercano implementar servicios de Internet de las cosas (IoT) [1]. Para cumplir este fin, se deben proporcionar simultáneamente niveles de iluminación aceptables, y altas tasas de transmisión de datos para un número variable de usuarios y dispositivos.

De hecho, el uso de esta tecnología de ancho de banda no regulado, técnicas de modulación en intensidad con detección directa (IM/DD) de baja complejidad y la ausencia de interferencia con sistemas de RF, han puesto a VLC en la vanguardia de las tecnologías de acceso inalámbrico para satisfacer las demandas de los sistemas de IoT [1], [2]. Además de una conexión inalámbrica eficiente y manejable para todos los dispositivos en la red, el consumo sostenible

de energía y la rápida reconfiguración de red en entornos heterogéneos potencialmente habilitados por VLC, también se puede implementar iluminación interior inteligente para lograr reducciones significativas en el consumo de energía y ganancias en productividad [3], [4].

A la fecha, la mayoría de las investigaciones sobre VLC basadas en tecnologías de Iluminación de Estado Sólido (SSL) se han centrado principalmente en la obtención de altas tasas de transmisión de datos en el orden de Gigabit por segundo. Se han reportado velocidades de transmisión de 3.4 Gbit/s para fuentes de iluminación basadas en diodos emisores de luz (LED), y 10 Gbit/s para diodos láser (LD) cuyo ancho de banda de modulación es mucho mayor que los cientos de MHz ofrecidos por los LED [5]. La notable mejora en la velocidad de datos, aprovecha los esquemas de Modulación por Desplazamiento de Color (CSK) donde los LED de espectro estrecho y los LD que funcionan en diferentes longitudes de onda (RGB, Rojo - Verde - Azul) se modulan en intensidad de manera separada. Por otro lado, al diseñar correctamente modulaciones basadas en CSK con RGB-LD y LED’s RGB es posible sintetizar luz “blanca” y emular la iluminación ambiental.

Sin embargo, las investigaciones mencionadas anteriormente, no han considerado las limitaciones en la calidad de la iluminación en el diseño de los bancos de pruebas de VLC [4]. En [6], se describe el diseño y análisis de la capa física VLC utilizando PPM para obtener una iluminación estable donde el procesamiento de datos que se implementa con microcontrolador y FPGA alcanzando una tasa máxima de transferencia de datos de 20 kbit/s. Sin embargo, obtener niveles de iluminación satisfactorios para la percepción humana (evitando el parpadeo “flicker”) y manteniendo altas velocidades en la transmisión de datos es un objetivo claro para garantizar la viabilidad de los sistemas VLC.

También, se ha propuesto la modulación digital basada en la modulación de ancho de pulso (PWM) para el control de brillo aprovechando la simplicidad de las variaciones del ciclo útil en proporción al porcentaje de atenuación requerido [5], [7]. Además, PWM en combinación con la Modulación por Variación de la Posición de Pulso (VPPM) se ha utilizado para la transmisión de datos [3], [4]. Más tarde, se han propuesto variaciones de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) para mejorar la eficacia espectral de la señal modulada [7].

En los trabajos anteriormente mencionados, se han propuesto esquemas que combinan procesos de modulación avan-

Manuscript received xx xx, XXX.

J. L. Henao-Rios, Politécnico Jaime Isaza Cadavid. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Informática (e-mail: jlhenao@elpoli.edu.co).

N. Guerrero-González, Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (e-mail: nguerrerog@unal.edu.co).

J. C. García-Álvarez, Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (e-mail: jcgarciaa@unal.edu.co).

zadas como OFDM en combinación con PWM o Modulación Multi Pulso, en [6] se explora la posibilidad de controlar la luminosidad manteniendo estable la velocidad de transmisión aprovechando simplicidad que puede presentar un esquema On-Off.

En este trabajo, se propone el uso de LEDs RGB de potencia, y una codificación que combina en una misma trama de bits los beneficios de la modulación PWM para control de brillo y la codificación M-PPM para la creación de palabras de datos por cada canal (Rojo, Verde, Azul). Las tramas generadas en el sistema de procesamiento y dedicadas a cada uno de los canales RGB del LED, están compuestas por 32 slots distribuidos de la siguiente manera: *i*) Sincronización (5 slots), *ii*) Control de iluminación (19 slots), en donde se implementa la modulación PWM para controlar la iluminación y que será explicada en la sección II-C de este artículo y *iii*) Datos (8 slots), donde se realiza la codificación M-PPM.

El esquema de modulación propuesto, se vale de la teoría subyacente en la técnica PWM y la codificación M-PPM para transmisión de datos por luz visible, con el fin de lograr dos propósitos principales: control de iluminación y tasa de transmisión independiente de la intensidad lumínica.

## II. CODIFICACIÓN Y CONTROL DE LUMINOSIDAD

### A. Control de Iluminación

La forma más eficiente de realizar el control de luminosidad en los LED's, es la técnica PWM. Durante el ciclo de encendido del pulso PWM, el LED se alimenta en el punto de operación recomendado de Voltaje-Corriente, asegurando que las variaciones en la Temperatura de Color Correlacionada (CCT) estén dentro de los parámetros de la ficha técnica.

El esquema PWM puede ser implementado de dos modos: *i*) modo balanceado y *ii*) modo de marca espaciada (Mark Space). La diferencia entre estos dos, es la secuencia de tiempo de los estados altos y bajos de voltaje que se transmiten. En el modo de marca espaciada, el tiempo del estado alto es único y continuo al comienzo del ciclo, lo que se denomina ciclo de trabajo o ciclo útil "D" (proporción entre la duración del pulso y el período de señal) del tren PWM. El ciclo de trabajo, determina la corriente promedio y, por lo tanto, la luminosidad percibida (Fig. 1(a)).

En el modo balanceado, el tiempo de los estados altos es múltiple y se distribuye en un ciclo completo (Fig. 1(b)).

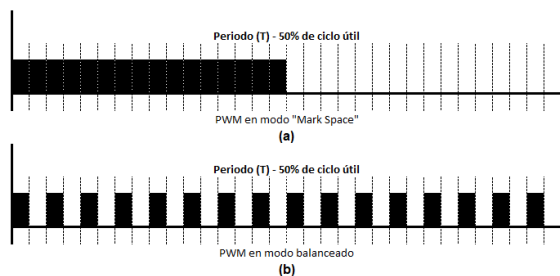


Fig. 1. (a) PWM en modo "Mark Space". (b) PWM en modo balanceado.

En general, el valor de voltaje promedio en la señal es independiente de la posición de los estados altos, tan solo

depende del tiempo y la cantidad de estos, que se encuentran en alto durante el periodo (T) del símbolo.

### B. Codificación M-PPM

En la codificación M-PPM (Multi-Pulse Position Modulation), se tiene un tiempo de símbolo ( $t_s$ ) dividido en slots donde cada uno puede tener un nivel alto "1" o bajo "0"; la posición y la cantidad de slots en estado alto, determinan el valor del símbolo.

Es posible obtener X símbolos a partir del cálculo de la combinatoria  $\binom{m}{n}$ , donde  $m$  es la cantidad de slots en que se divide  $t_s$  y  $n$  la cantidad de slots que van a ser usados para representar el símbolo, la parte entera del  $\log_2\left(\frac{m}{n}\right)$  [8] indica la cantidad de bits que pueden ser codificados para cada símbolo  $x_i$ .

TABLA I  
RELACIÓN  $m, n, \#$  DE BITS

$m$	$n$	$\binom{m}{n}$	$\log_2\left(\frac{m}{n}\right)$	# de bits
1	8	3		3
2	28	4.807355		4
3	56	5.807355		5
8	4	6.129283		6
5	56	5.807355		5
6	28	4.807355		4
7	8	3		3

Para un  $t_s$  dividido en 8 slots, al usar tres en la representación del símbolo (Fig. 2), la combinatoria es igual a 56. Esto significa que para cada configuración de slots en nivel alto se pueden representar  $\log_2(56) = 5.807355$  bits (Tabla I). Si se asume que todas las posiciones son equiprobables, la entropía del código es máxima.

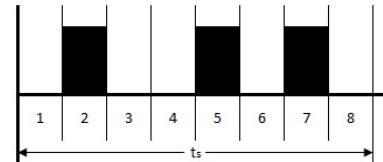


Fig. 2. Representación de un símbolo  $x_i$  en codificación M-PPM (3-PPM).

Con 5 bits, se tienen  $2^5 = 32$  combinaciones. Esto significa que 24 combinaciones quedarían libres (idle), esto es de gran utilidad pues permite emplear un código que tenga una distancia entre símbolos adyacentes suficientemente alta, que permita reducir la posibilidad que una secuencia de código válida se transforme en otra secuencia código válido, debido a una ráfaga de errores.

### C. Formato de Codificación-modulación Propuesto

De la Tabla I, se observa que para 8 slots se pueden obtener longitudes de símbolo ( $L$ ) entre 3 y 6 bits, también que los slots 5, 6 y 7 están apareados con los slots 4, 3 y 2 respectivamente. Es decir, son complementarios ( $3 - PPM = (5 - PPM)$ ). Este complemento lo denominamos IM-PPM (Inverse M-PPM por sus siglas en ingles).

En este trabajo se usa  $I3 - PPM$  (Inverse 3-Pulse Positon Modulation), la decodificación de la información se hace detectando los espacios vacíos “huecos” en el tiempo de símbolo  $t_s$  (Fig. 3(b)) debido a que la configuración del sistema eléctrico en el receptor, hace más fácil la detección de un estado bajo que un estado alto.

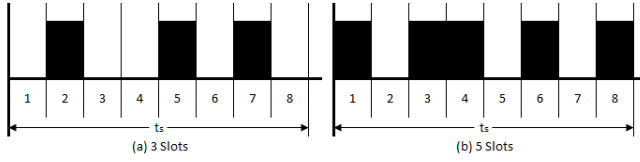


Fig. 3. (a) M-PPM con 3 Slots (3-PPM) y (b) M-PPM con 5 Slots (5-PPM).

La Fig. 4, muestra el esquema propuesto:

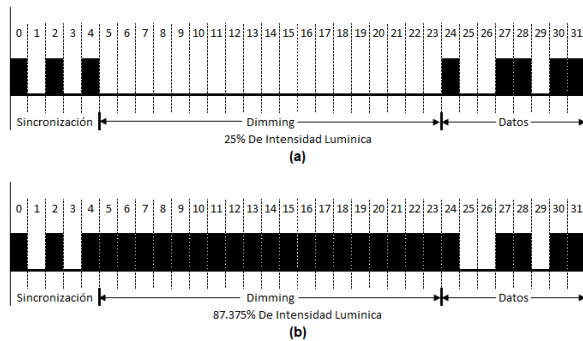


Fig. 4. (a) 25% de intensidad Lumínica. (b) 84.375% de intensidad Lumínica.

#### D. Calculo de $t_s$ (Tiempo de Símbolo) y Tasa de Bits

La modulación digital de un LED implica dos estados distintos, On y Off. En las aplicaciones tipo On/Off, los tiempos de subida y bajada (de la señal) están limitados por la capacitancia intrínseca del LED [9], lo que permite modelarlo como un circuito RC (filtro pasa bajo de primer orden).

Como se dijo anteriormente, la codificación M-PPM divide el tiempo de símbolo en slots. De acuerdo a lo anterior, el mínimo tiempo de slot ( $t_\gamma$ ), está limitado por la frecuencia máxima a la cual puede operar el LED (tasa de modulación). La tasa máxima de modulación es determinada por los tiempos de subida ( $t_r$ ) y el tiempo de bajada ( $t_f$ ) entre 10% y el 90% de la intensidad lumínica (Fig. 5).

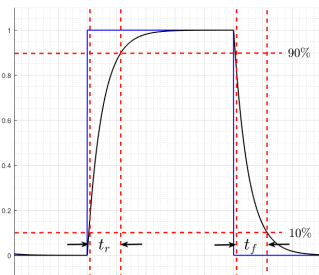


Fig. 5. Tiempo de subida  $t_r$  y tiempo de bajada  $t_f$  en un LED.

Lo anterior significa que la tasa o razón de modulación para el LED, debe tener en cuenta estos valores, de acuerdo a lo anterior el tiempo de slot ( $t_\gamma$ ) esta dado por (Eq. 1):

$$t_\gamma = t_r + t_f \quad (1)$$

En el esquema de modulación-codificación propuesto, se usan 8 slots para datos, 19 para control de luminosidad y 5 para reloj. El tiempo de símbolo  $t_s$  debe ser (Eq. 2):

$$t_s = 32t_\gamma \quad (2)$$

$$t_s = 32(t_r + t_f)$$

La velocidad de símbolo  $R_s$  (el cual esta compuesto por los slots de reloj, brillo y datos), está dado por (Eq. 3):

$$R_s = \frac{1}{t_s} \quad (3)$$

$$R_s = \frac{1}{32(t_r + t_f)}$$

El número de bits codificados se calcula con la Eq. 4.

$$L = \lfloor \text{Log}_2\left(\frac{m}{n}\right) \rfloor, \quad (\text{parte entera}) \quad (4)$$

De acuerdo a lo anterior, la tasa de bits  $R_b$  es (Eq. 5):

$$R_b = R_s * L \quad (5)$$

$$R_b = \frac{L}{32(t_r + t_f)}$$

#### E. Codificación

Con I3-PPM es posible obtener 56 símbolos con longitud del símbolo de  $L(x_i) = 5$  bits. Con el fin de minimizar la probabilidad de error, es necesario maximizar la distancia entre símbolos adyacentes, para esto se escoge convenientemente el siguiente código (Tabla II):

TABLA II  
TABLA DE EQUIVALENCIA CÓDIGO-SÍMBOLO

Patrón de bits	Tabla De Equivalencia Código-Símbolo
00000	0 1 1 1 0 1 1 0
00001	0 0 0 1 1 1 1 1
00010	0 1 1 0 0 1 1 1
00011	0 1 1 1 0 1 1 0
00100	1 0 0 1 1 0 1 1
00101	1 1 1 0 0 0 1 1
00110	0 0 1 1 1 0 1 1
00111	0 1 0 1 1 1 1 0
01000	0 1 1 0 1 0 1 1
01001	1 0 0 0 1 1 1 1
01010	1 0 1 1 0 1 0 1
01011	1 1 0 0 1 1 0 1
01100	1 1 1 1 0 1 0 0
01101	0 1 1 0 1 1 1 0
01110	1 0 1 0 1 0 1 1
01111	1 1 0 1 0 0 1 1
10000	1 0 0 1 1 1 1 0
10001	1 1 1 0 0 1 1 0
10010	1 1 0 1 1 0 1 0
10011	1 0 1 1 0 1 1 0
10100	1 1 1 0 1 0 1 0
10101	0 1 1 1 0 0 1 1
10110	1 0 1 1 1 0 0 1
10111	1 1 0 1 0 1 0 1
11000	1 1 1 0 1 0 0 1
11001	1 0 1 1 0 0 1 1
11010	0 1 1 1 0 1 0 1
11011	1 0 1 0 1 1 0 1
11100	1 1 0 1 1 0 0 1
11101	1 0 1 1 1 0 1 0
11110	1 1 0 0 1 0 1 1
11111	1 1 1 1 0 0 0 1

En el código anterior la distancia  $(d_{i-1}, d_i) = (d_i, d_{i+1}) = 4$  (Fig. 6).

$d_{i-1}$	1000	0	1	1	0	1	0	1	1
$d_i$	1001	1	0	0	0	1	1	1	1

(a)

$d_i$	1001	1	0	0	0	1	1	1	1
$d_{i+1}$	1010	1	0	1	1	0	1	0	1

(b)

Fig. 6. (a) Distancia  $(d_{i-1}, d_i)$ , (b) Distancia  $= (d_i, d_{i+1})$ .

### III. MARCO EXPERIMENTAL

En esta sección, se verifica la viabilidad de la transmisión de datos y el control simultáneo del brillo, conservando una tasa de bits constante haciendo uso del esquema de modulación propuesto. El transmisor del sistema VLC esta compuesto por: *i*) LED's RGB de potencia, *ii*) sistemas embebidos independientes (Arduinos Uno) como central de proceso de información, y *iii*) regulador lineal de corriente (driver) para el control de los LEDs (Fig.7).

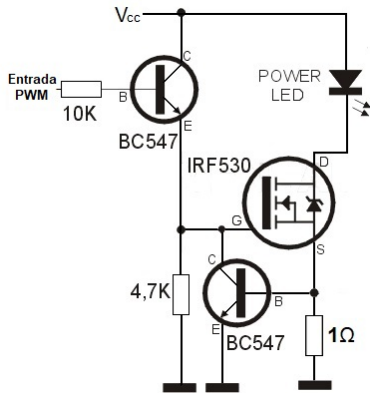


Fig. 7. Regulador lineal de corriente (driver).

Para el control simultáneo de iluminación y transmisión de datos se generan tramas de 32 slots (una en cada sistema integrado), divididas en subtramas para sincronización (5 slots), control de iluminación (19 slots) y datos (8 slots) donde se encuentra la codificación IM-PPM. El promedio de la señal eléctrica generada, es equivalente a una señal PWM del mismo período ( $t_s$ ) y ciclo útil necesario para la intensidad lumínica especificada.

#### A. Transmision con Control de Brillo

El sistema se compone de dos partes: un transmisor y un receptor. En la Fig. 8, se muestra un diagrama general del transmisor.

El transmisor está conformado por un driver (Fig.7) que controla los LED's de potencia, al cual se le inyecta como señal de control el flujo de bits generado en una de las

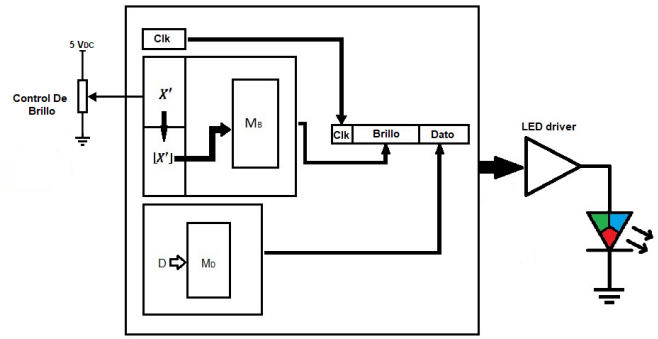


Fig. 8. Diagrama de bloques del transmisor ( $T_x$ ).

salidas digitales de un Arduino UNO, el cual esta encargado de realizar la codificación y “armado” del patrón de bits que componen la señal. Esta señal consta de tres partes: reloj para sincronización, control de brillo y dato en formato IM-PPM.

El “armado” de la trama lo componen cuatro procesos. En el primer proceso, el control de brillo se realiza por medio de un potenciómetro el cual forma un divisor de voltaje, el voltaje en el divisor (valores entre 0 y 5 V) es sensado por un conversor análogo digital (A/D) el cual tiene una resolución de 10 bits. Este conversor, forma parte del sistema Arduino Uno con microcontrolador ATmega328 de 16 MHz.

El proceso anterior, arroja valores 0 y 1023. La lectura obtenida, se normaliza para obtener un valor entre 0 (25% de brillo) y 19 (84.75% de brillo) de acuerdo con la siguiente formula.

$$b = \lfloor X' \rfloor = (X' * 19) / 1023 \quad (6)$$

Donde  $\lfloor X' \rfloor$  es la parte entera del proceso de normalización, este valor se almacena en la variable entera  $b$  la cual representa la posición en el VB (Vector de Brillo) donde se encuentra almacenado el patrón de bits a usar, y que corresponde a la Tabla III. En este vector, cada posición contiene un valor de 32 bits en formato hexadecimal, los pulsos de sincronización ocupan los 5 bits mas significativos, a continuación los bits de control de brillo y en los 8 últimos bits, el campo del datos con todos ellos en 0. El patrón de bits obtenido de esta forma, se almacena en una variable ( $B$ ) tipo “unsigned long” la cual ocupa 4 Bytes (32 bits).

En el segundo proceso, la secuencia de bits del símbolo ( $s$ ) se obtiene del vector  $VC$  (Tabla II). Este vector, actua como diccionario donde el símbolo a transmitir representa la posición y el valor (en formato hexadecimal) almacenado en esta posición, corresponde a la secuencia de bits en la codificación propuesta. Cada secuencia tiene una longitud de 8 bits y es almacenada en una variable ( $D$ ) de 32 bits, quedando los 24 bits de más peso en ceros.

Una vez que se han completado los pasos anteriores, las variables  $B$  y  $D$  son concatenadas por medio del operador “Or” y almacenadas en la variable  $E$  de 32 bits. En esta variable, queda almacenado el patrón de bits que conforman el tren de pulsos que sera enviado a través de un puerto del Arduino UNO, al driver que controla el LED.





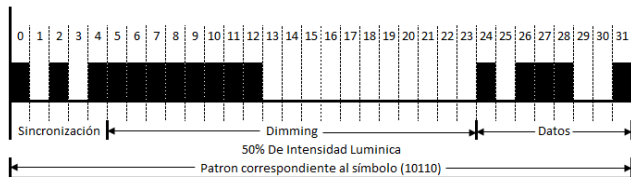


Fig. 10. Formato de la señal para: 50% de luminosidad y dato 10110.

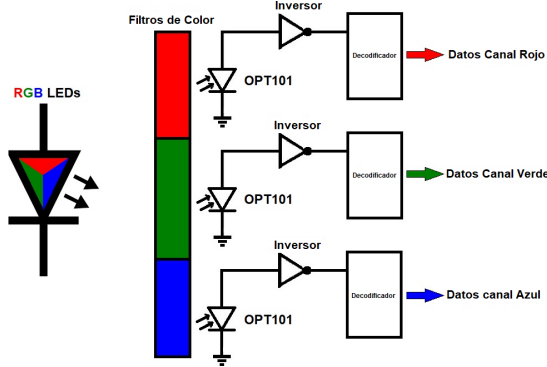


Fig. 11. Diagrama de bloques del receptor ( $R_x$ ).

expuesto. La velocidad de transmisión conjunta lograda es de 30 kbit/s con niveles medidos de luminosidad entre el 20% y el 88%.

Los resultados se muestran para un solo canal ya que estos son extensivos a los demás. A continuación, se muestran los resultados para tres escenarios diferentes.

En la Fig. 12, se muestran las formas de onda tanto en el transmisor ( $T_x$ ) como en el receptor ( $R_x$ ) donde se aprecian claramente las tres secciones de la trama *i*) Dato, *ii*) Control de brillo y *iii*) Reloj.

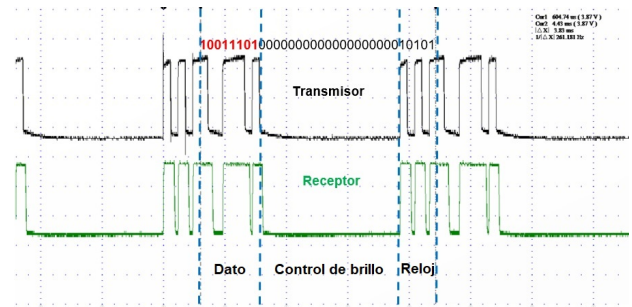
De acuerdo a las gráficas anteriores, se puede observar lo siguiente:

- 1) Para una intensidad de brillo calculado del 25% (Fig. 12(a)), el valor de luminosidad medido es de 24.55 *Luxes* lo que equivale al 20% de la luminosidad del LED.
- 2) Para una intensidad de brillo calculado del 50% (Fig. 12(b)), el valor de luminosidad medido es de 66.16 *Luxes* lo que equivale al 66% de la luminosidad del LED.
- 3) Para una intensidad de brillo calculado del 84.736% (Fig. 12(c)), el valor de luminosidad medido es de 93.12 *Luxes* lo que equivale al 88% de la luminosidad del LED.

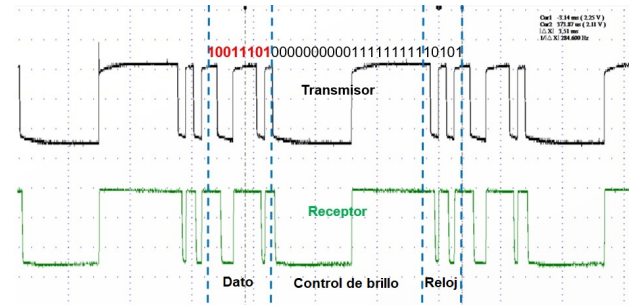
El valor de referencia para las medidas anteriores, es la luminosidad del LED a 11  $V_{DC}$  y 131 *mA*.

En la Fig. 13, se puede observar la comparación entre el brillo medido variando directamente la corriente (línea roja) y el brillo medido usando el formato propuesto (línea azul). Las medidas fueron tomadas a 0.9 metros de distancia entre el LED y el Sensor de luz ambiente (OPT3001 de Texas Instruments).

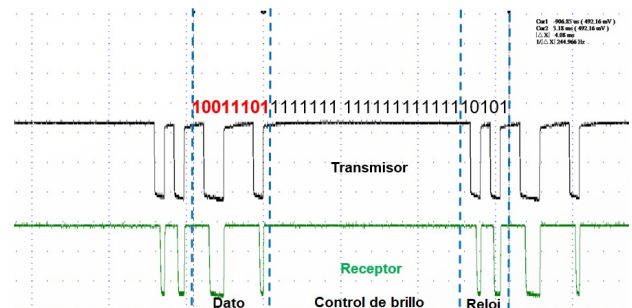
El proceso de decodificación y cálculo del BER (Bit Error Rate, Tasa de Error de Bits), se realizó fuera de línea usando Matlab 2017a. Las curvas BER obtenidas para cada canal (Fig.



(a) Forma de onda para un nivel de brillo calculado del 25%.



(b) Forma de onda para un nivel de brillo calculado del 50%.



(c) Forma de onda para un nivel de brillo calculado del 84.736%.

Fig. 12. Formas de onda para el dato 10101 y niveles de brillo calculados del (a) 25%, (b) 50% y (c) 84.375%.

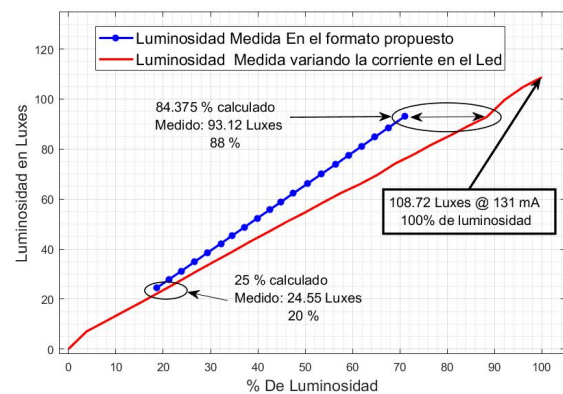


Fig. 13. Intensidad lumínica medida.

14), son muy cercanos a los teóricos, presentando un mejor rendimiento que el BER calculado en valores bajos de SNR (Signal to Noise Ratio, Relación Señal/Ruido).

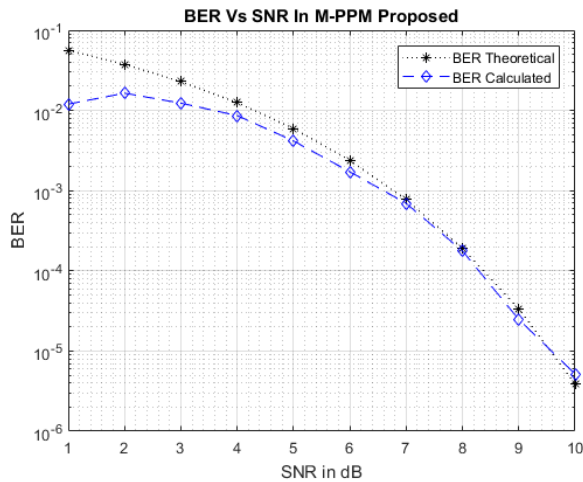


Fig. 14. BER teórico Vs medido.

## V. CONCLUSION

Se propuso y demostró de manera satisfactoria que es posible implementar un sistema que tenga la doble funcionalidad de transmisión de datos y control de luminosidad en un sistema de Comunicaciones por Luz Visible (VLC), con las restricciones debidas a los elementos usados. El sistema propuesto puede ser implementado con elementos de bajo costo, ya que no hace uso de técnicas avanzadas de modulación y codificación.

La velocidad de transmisión del sistema está limitada tan solo por la calidad y la sensibilidad de los elementos utilizados, por lo tanto, lo hace adaptable a las tecnologías de transmisión actuales, pudiendo alcanzar velocidades normativas.

En las gráficas del osciloscopio, se puede observar que es posible tener simultáneamente control de luminosidad y transmisión de datos. Se deben tener en cuenta algunos de los siguientes aspectos en relación a los sistemas embebidos utilizados para la generación de la trama (Arduino UNO).

- En el tiempo total de símbolo están incluidos los tiempos de: *i)* lectura y conversión de la entrada  $A/D$ , *ii)* lectura del dato en la matriz de conversión, *iii)* concatenación del dato leído con el valor correspondiente al nivel de luminosidad sentido y *iv)* borrado del puerto. Estos procesos, se realizan fuera del bucle usado para la conversión paralelo-serie de la trama, y agregan en promedio  $12 \mu s$  al final de esta. El tiempo de ejecución de estos procesos se miden con la función `micros()` de Arduino.
- El puerto de salida (PORTB) es colocado en 0 al finalizar el proceso de conversión paralelo-serie de la trama, con el fin de asegurar que el pin D8 del Arduino quede en estado bajo. Es necesario asegurar un estado bajo en el pin D8 ya que el formato de la trama hace que el último bit enviado tenga un valor de "1", valor en el cual se queda el puerto hasta que se inicie nuevamente el proceso de conversión paralelo-serie, lo que haría que el nivel mínimo de luminosidad, fuera cercano al 50%.

El uso de elementos de bajo costo permite que este sistema pueda ser implementado en escenarios donde la tecnología y la infraestructura sea de difícil acceso tal como zonas rurales y población con deficiencias en la conectividad. También podría ser usado en la comunicación entre automóviles para intercambio de datos y gestión de control de seguridad, entretenimiento en aviones y monitoreo en hospitales donde las señales electromagnéticas puedan ser perjudiciales, envío de información a dispositivos móviles en vallas comerciales usando la cámara de estos para la detección y codificación de los datos, etc.

## AGRADECIMIENTOS

Este producto corresponde al programa reconstrucción del tejido social en zonas de pos-conflicto en Colombia del proyecto "Modelo ecosistémico de mejoramiento rural y construcción de paz: Instalación de capacidades locales". Financiado por Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Fondo Francisco José de Caldas con contrato  $N_o$  213 – 2018 con Código 58960.

## REFERENCES

- [1] R. Want, B. N. Schilit, and S. Jenson, "Enabling the internet of things," *Computer*, no. 1, pp. 28–35, 2015.
- [2] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "Towards a 100 gb/s visible light wireless access network," *Optics express*, vol. 23, no. 2, pp. 1627–1637, 2015.
- [3] K. Modepalli and L. Parsa, "Dual-purpose offline led driver for illumination and visible light communication," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 406–419, 2014.
- [4] J. Gancarz, H. Elgala, and T. D. Little, "Impact of lighting requirements on vlc systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 34–41, 2013.
- [5] A. T. Hussein and J. M. Elmighani, "10 gbps mobile visible light communication system employing angle diversity, imaging receivers, and relay nodes," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 8, pp. 718–735, 2015.
- [6] A. Pradana, N. Ahmadi, T. Adiono, W. A. Cahyadi, and Y.-H. Chung, "Vlc physical layer design based on pulse position modulation (ppm) for stable illumination," in *2015 international symposium on intelligent signal processing and communication systems (ISPACS)*. IEEE, 2015, pp. 368–373.
- [7] L. Wu, Z. Zhang, J. Dang, and H. Liu, "Adaptive modulation schemes for visible light communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 117–125, 2014.
- [8] X. Liu, S. Chandrasekhar, T. Wood, R. Tkach, P. Winzer, E. Burrows, and A. Chraplyvy, "M-ary pulse-position modulation and frequency-shift keying with additional polarization/phase modulation for high-sensitivity optical transmission," *Optics Express*, vol. 19, no. 26, pp. B868–B881, 2011.
- [9] Z. Ghassemlooy, L. N. Alves, S. Zvanovec, and M.-A. Khalighi, *Visible light communications: theory and applications*. CRC press, 2017.



**José León Henao Ríos** Ingeniero Electrónico y Especialista en Bioingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, Maestría en Ingeniería - Automatización Industrial y estudiante de Doctorado en Ingeniería (Línea de Investigación en Automática) en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Manizales, Colombia. profesor asistente en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia.



**Neil Guerrero González** recibió su título de Ingeniero Electrónico en 2005; y el diploma de magíster en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Manizales in 2007. Obtuvo el título de Doctor en Fotónica de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) en 2011, ese mismo año fue investigador posdoctoral en el departamento de Fotónica del DTU en el proyecto Europeo CHRON. De 2012-2015 fue investigador en el Centro de Investigación Europeo (ERC) Huawei Technologies Duesseldorf GmbH en Munich y luego, en el Centro de investigación y desarrollo de las Telecomunicaciones (CPQD) en Campinas–Brasil. Entre 2015 y 2016 fué investigador posdoctoral en el grupo de sistemas fotónicos del Instituto Nacional Tyndal en Irlanda. Actualmente es profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia con el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Sus principales áreas de interés incluyen el procesamiento digital de señales avanzado aplicado en sistemas de comunicación híbrida fibra-inalámbrico en las redes de siguiente generación. <https://orcid.org/0000-0002-8053-6280>



**Julio Cesar García Álvarez** recibió su título de Ingeniero Electrónico en 1998; y el diploma de magíster en Ingeniería Electrónica y de Computación de la Universidad de los Andes, Bogotá 2000. Obtuvo el título de Doctor en Ingeniería (Línea de Investigación en Automática) en 2012. Actualmente es profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia con el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.