

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:  
ANÁLISIS DE TECNOLOGÍA LI-FI COMO COMUNICACIÓN POR LUZ  
VISIBLE (VLC) Y SU INTEGRACIÓN AL INTERNET DE LAS COSAS (IOT)**

**AUTOR:  
CARLOS DAVID CALERO MAILA**

**TUTOR:  
JUAN CARLOS DOMÍNGUEZAYALA**

**Quito, febrero del 2020**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo Carlos David Calero Maila, con documento de identificación N° 1718001512, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “ANÁLISIS DE TECNOLOGÍA LI-FI COMO COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE (VLC) Y SU INTEGRACIÓN AL INTERNET DE LAS COSAS (IOT)”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Carlos David Calero Maila

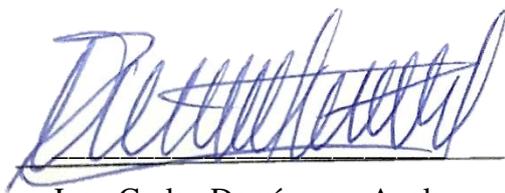
CI: 1718001512

Quito, febrero de 2020

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “ANÁLISIS DE TECNOLOGÍA LI-FI COMO COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE (VLC) Y SU INTEGRACIÓN AL INTERNET DE LAS COSAS (IOT)” realizado por Carlos David Calero Maila, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero del 2020



Juan Carlos Domínguez Ayala

CI: 1713195590

# ANÁLISIS DE TECNOLOGÍA LI-FI COMO COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE (VLC) Y SU INTEGRACIÓN AL INTERNET DE LAS COSAS (IoT)

## ANALYSIS OF LI-FI TECHNOLOGY SUCH AS VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC) AND ITS INTEGRATION TO THE INTERNET OF THINGS (IoT)

David Calero Maila<sup>1</sup>

### Resumen

En este artículo académico se analizó la tecnología Li-fi como una alternativa a las comunicaciones inalámbricas convencionales de radio frecuencia (RF), además se diseñó un prototipo de transmisión y recepción de datos con modulación OOK con una aplicación de comunicación en espacios hostiles obteniendo datos como temperatura y humedad y su integración al internet de las cosas (IoT) mediante la plataforma ThingSpeak.

Con esta investigación se determinó varias características y se seleccionó como la principal su gran ancho de banda (disponible 670 GHz) sin necesidad de licencias que va desde los 400 nm a 700 nm de longitud de onda ( $\lambda$ ), la cual no interfiere con el resto de las señales de RF.

El diseño del prototipo se lo realizó con dos Raspberry Pi con su módulo SPI para el procesamiento de datos tanto para el equipo transmisor como para el equipo receptor, en el cual se obtuvieron resultados de ancho de banda de 4 MHz, velocidad de transmisión de 975 Kbps y mediante modelamiento matemático el BER (Bit Error Rate) vs P (Potencia) del led.

**Palabras Clave:** IoT, Led, LiFi, VLC.

### Abstract

In this academic article, Li-fi technology was analyzed as an alternative to conventional wireless radio frequency (RF) communications, and a prototype for transmitting and receiving data with OOK modulation was designed with a communication application in hostile spaces obtaining data such as temperature and humidity and its integration into the internet of things (IoT) through the ThingSpeak platform.

With this investigation, several characteristics were determined and its large bandwidth (available 670 GHz) was selected as the main one without the need for licenses ranging from 400 nm to 700 nm wavelength ( $\lambda$ ), which does not interfere with the rest of the RF signals.

The design of the prototype was carried out with two Raspberry Pi with its SPI module for both the transmitting and receiving equipment for data processing in which 4 MHz bandwidth results, 975 Kbps transmission speed and mathematical modeling mode were obtained the BER (Bit Error Rate) vs. P (Power) of the led.

**Keywords:** IoT, LED, LiFi, VLC.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica (mención Telecomunicaciones) - Universidad Politécnica Salesiana, UPS - Sede Quito.

## 1. Introducción

La comunicación por Luz Visible (VLC) se entiende como la comunicación que utiliza haces de luz visible (iluminación) como medio de transmisión, con su fuente principal de radiación con dispositivos de tecnología LED. Este sistema es la unión de la comunicación y la luminosidad de manera simultánea debido a que la percepción del ojo humano no se percata del parpadeo producido al momento de enviar la información por su gran velocidad para transmitir datos. [1]

Hay varios términos muy similares que también usan la luz para transmitir información, y se diferencian por las siguientes características: En primer lugar, Free Space Optical (FSO, Espacio Óptico Libre). Esta comunicación utiliza el rango de luz visible pero adicional, también utiliza el rango infrarrojo y el ultravioleta. Se diferencia del VLC porque no necesariamente utiliza iluminación visible, por lo que su utilización viene dada de un sistema donde la visualización no importe. En esta tecnología se implementa la transmisión con dispositivos laser en vez de LEDs. [1]

En segundo lugar, Optical Wireless Communication (OWC, Comunicación inalámbrica Óptica). Esta es una expresión generalizada para los sistemas ópticos inalámbricos, ya que hace referencia a todos los tipos de transmisiones ópticas sin la utilización de cables de cualquier tipo. Como pueden ser FSO, VLC, control por infrarrojos o Li-Fi (Light Fidelity). [1]

Mientras que Light Fidelity es un sistema de comunicación inalámbrico que hace uso de la luz visible en vez de ondas electromagnéticas, principalmente para transmitir datos de alta velocidad con frecuencias de rango entre los 400 THz y 800 THz (espectro visible de la luz). [2] Este sistema utiliza la luz de dispositivos LED para transmitir los datos y los capta a través de fototransistores o fotodiodos que detectan los rayos de luz emitidos. [3] Menciona en su trabajo “Es una tecnología nueva desarrollada por el físico Harald Haas de la Universidad de Edimburgo y la presentó en el 2010 durante una conferencia en la cual realizó un experimento

utilizando una linterna LED para enviar datos a 10 Mbps a un ordenador”

Los componentes que se utilizan para esta comunicación son:

- LED blanco, usualmente leds de 1w de potencia con brillo alto.
- Un fototransistor el cual detecta la longitud de onda dentro del rango visible de luz.

Para esta comunicación se utiliza la modulación OOK la cual indica un estado encendido del led con “1” y apagado con “0” dentro de sus niveles lógicos de operación que van de 0 a 5 v. [1]

Internet of Things (IoT, El internet de las cosas) hace referencia a un conjunto de equipos computacionales que comparten información entre sí, en otras palabras, qué máquinas u objetos pueden recibir esta información y procesarla, sin pretender la manipulación entre humano a humano o humano a computadora. [4]

Carlos García [5] dice que el IoT se compone de tres elementos para su funcionamiento. Menciona los siguientes:

- El hardware, son los dispositivos externos los cuales permiten la recopilación de datos o el control de sistemas como pueden ser sensores o actuadores o dispositivos de comunicación.
- El middleware, es la plataforma de software que permite el almacenamiento, intercambio, búsqueda y análisis de la información o datos recopilados.
- Aplicaciones, son los instrumentos que permiten la interpretación de la información de manera visible para el ser humano. Su diseño debe tener características que permitan al usuario el acceso y control de la información.

En base a todos estos conceptos se diseñó un escenario de bloques que representa esta comunicación, la cual se la puede observar en la Figura 1 en donde se generarán datos aleatorios, los cuales serán procesados con la placa de desarrollo Raspberry Pi y transmitidos por un

LED (Diodo Emisor de Luz) mediante modulación OOK, receptados por un fotodiodo y visualizado en la plataforma de IoT ThingSpeak.

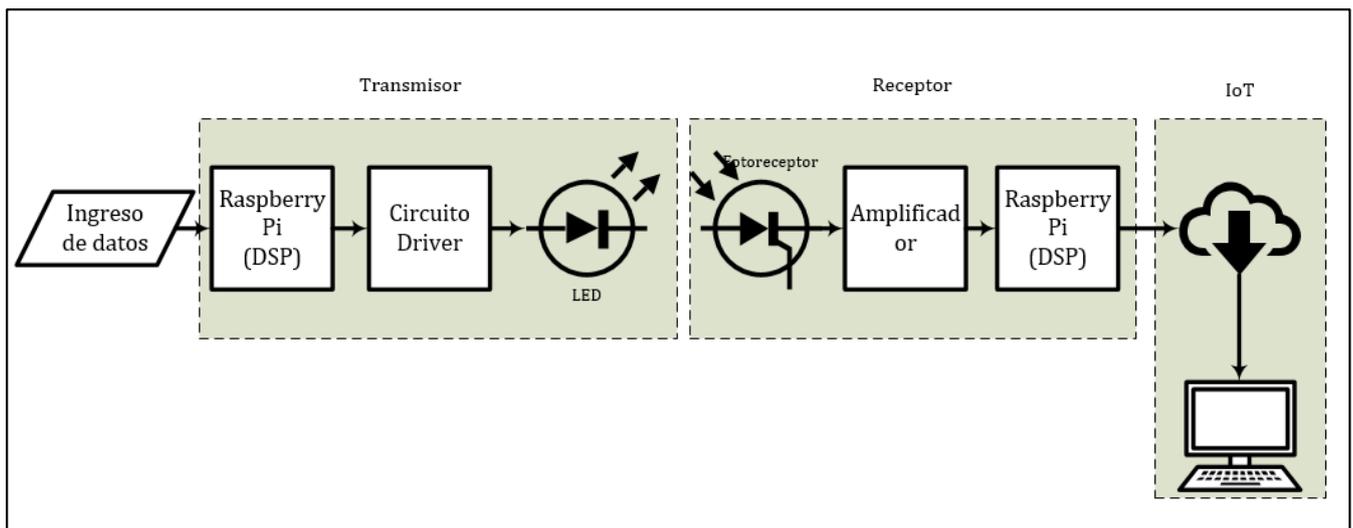


Figura 1. Diagrama de bloques prototipo Li-Fi.

## 2. Experimentación

### 2.1 Comparación de tecnología Li-Fi Frente a otras Tecnologías Inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas, actualmente, trabajan dentro del espectro radioeléctrico en el cual el ancho de banda es finito y escaso y entre ellas destacan las comunicaciones celulares, marítimas, satelitales, militares.

Estas bandas son licenciadas y actualmente el precio promedio del MHz esta entre 2-4 M€ en las subastas de bandas de frecuencia. [6]

En la siguiente Tabla 1. se muestra la comparación entre una de las tecnologías inalámbricas más utilizadas y de las posibles soluciones.

Tabla 1: Comparación entre tecnologías WiFi, mmWaves y VLC/LiFi

	Problema Actual	Soluciones Alternativas	
		WiFi	mmWaves
Conf. de cobertura	No	No	Si
Gestión de interferencia	No	Necesaria	Si
Espectro (ancho de banda)	Saturado	60GHz adicionales	~670 GHz (Visible+IR)

Las características que presentan en los sistemas VLC/Li-Fi son:

- Espectro: Su uso es global y no se tiene restricción de ellas debido a que no son licenciadas, no interfiere con las actuales comunicaciones inalámbricas, no interfiere con la tecnología WiFi por lo que podrían trabajar simultáneamente.
- Energía: Utiliza luminarias LED y representan un bajo consumo energético (12w) y eficiente, reutiliza la energía de iluminación.
- Infraestructura: Nueva tecnología que tiene un coste recuperable ya que se desempeña en el ahorro de energía, conectividad mediante PCL (Power Line Communications) que utiliza la red eléctrica que ya está implementada en domicilios u oficinas. [6]

### 2.2 Parámetros y Características del Prototipo Li-Fi

En la Figura 1. se puede observar los bloques de los que se conforma el prototipo en el cual, el ingreso de datos se lo realiza mediante el sensor DHT11 el cual envía datos de temperatura y

humedad hacia la Raspberry Pi mediante uno de sus puertos GPIO.

La parte de la transmisión de datos se compone por el procesamiento de las señales del sensor mediante un programa en Python para convertir los datos en bits, cuando los datos ya están convertidos a bits se los envía por el puerto SPI (Serial Protocol Interface) mediante los pines 19(MOSI), y 23(SCLK), hacia un circuito driver que consta de un circuito integrado 74LS125 que acopla la señal a niveles lógicos de “0” para 0 v y “1” para 5 v ya que los puertos GPIO únicamente generan voltajes de 3.3 v como máximo, realizando la modulación OOK. [7]

La transmisión se completa cuando el led DotStar 5050 RGB recibe la corriente necesaria para excitar el haz de luz y empieza a transmitir esta información por el aire generando una luz blanca combinando sus tres colores.

La etapa de recepción se compone por un fototransistor de silicio BPX 43 el cual detecta la luz visible en el rango de 450 nm a 1100 nm con línea de vista directa (LoS). Esta señal captada llega con mucha interferencia y no mantiene un estado lógico aceptable por lo que es necesario amplificar esta señal mediante un amplificador operacional LM393 donde se reconstruye la señal digital, pero con una característica invertida, es decir si el led genera un estado lógico “1”, el LM393 genera un estado lógico “0” por lo que en esta etapa se emplea un inversor Schmitt Trigger 74LS14 para restaurar la señal recibida invirtiéndola nuevamente.

Mediante un código en Python se recibe esta señal y se almacena en el buffer del puerto SPI GPIO 21(MISO) de la Raspberry Pi, dentro de este código se reconstruye la señal del buffer y se convierten los bits a bytes para ser reconocidos como información original. [7]

En la misma programación de Python se genera el envío de datos recibidos a la plataforma IoT ThingSpeak, la cual es una interfaz de uso libre de Matlab Analytics la cual permite agregar, visualizar y analizar los flujos de datos en la nube y en tiempo real sin la configuración de servidores o el desarrollo de software web. [8]

### 2.3 Transmisor de Datos

En la Figura 2. Se puede observar el diagrama de flujo del programa en Python en el bloque de transmisión de datos.

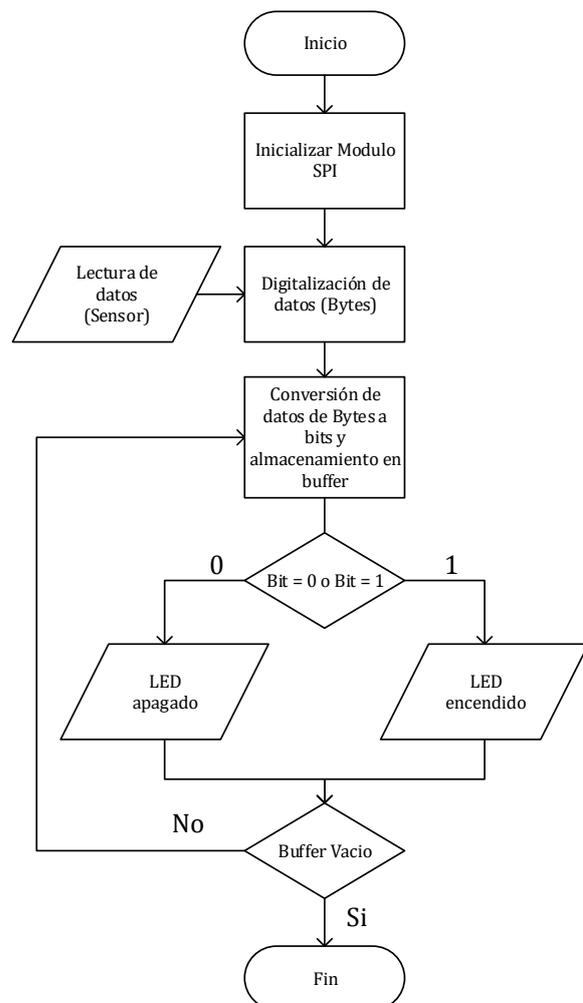


Figura 2. Diagrama de flujo Transmisión de Datos.

- Inicio: Se importan las librerías spidev y gpio que permiten la comunicación con el hardware externo.
- Inicializar módulo SPI: Se configuran los parámetros del módulo como el puerto seleccionado y su velocidad de transmisión.
- Lectura de datos y digitalización: Se leen los datos del sensor y se digitalizan para obtener la información en bytes.
- Conversión de datos de bytes a bits: Se separa cada byte en una secuencia de 8 bits y se los almacena en un arreglo buffer.

- Decisión Bit=0 o Bit=1: Verifica cada uno de los bits de información y envía a la salida del puerto 19 un estado lógico alto si detecta un "1" y un estado bajo si detecta un "0".
- LED apagado/encendido: Muestra la salida de datos por luz visible.
- Buffer vacío: Verifica si hay datos que transmitir caso contrario finaliza el programa.

## 2.4 Receptor de Datos

El receptor de datos consta, principalmente, del fototransistor BPX 43 ya que este es el encargado de recibir una señal óptica de luz y transformarla en pulsos de corriente eléctrica, cuando esta señal está acoplada a los parámetros del puerto SPI se procede con la programación en Python para el procesamiento y recuperación de los datos recibidos.

En la Figura 3. se puede apreciar el diagrama de flujo del código en Python y el reenvío de los datos recuperados a la plataforma IoT ThingSpeak para su visualización.

- Inicio: Se importan las librerías spidev y gpio que permiten la comunicación con el hardware externo.
- Inicializar módulo SPI: Se configuran los parámetros del módulo como el puerto seleccionado y su velocidad de transmisión.
- Lectura de bits y almacenamiento de buffer de datos: El fototransistor recibe las señales de luz, se procesa la información y se lo almacena como bits en un buffer.
- Decisión Bit=0 o Bit=1: Selecciona el estado lógico alto o bajo de cada bit.
- Reconstrucción de datos: Los bits seleccionados se los convierte en una secuencia de bytes y se recupera la información transmitida.
- Envío de datos a la plataforma ThingSpeak: Con los datos recibidos, se reenvía esta información hacia la plataforma de IoT para ser visualizados de manera remota.

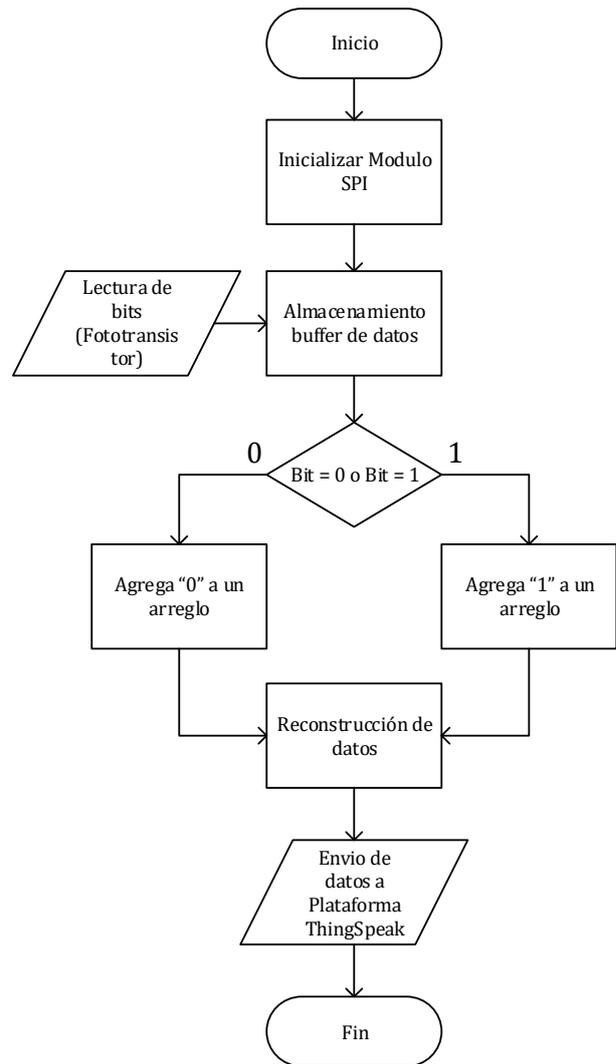


Figura 3. Diagrama de flujo Recepción de Datos.

## 3. Análisis y Resultados

Experimentalmente se diseñó un prototipo de transmisión y recepción de datos LiFi/VLC que permite la integración al internet de las cosas (IoT) mediante el envío de datos de un sensor de temperatura y humedad a través de un led con un haz de luz blanco.



Figura 4. Prototipo Li-Fi construido.

Se realizó la medición de ancho de banda del prototipo con la ayuda de un osciloscopio en el

cual se obtuvo un período aproximado de  $T=250$  ns en los pulsos eléctricos de la transmisión de datos con el cual se obtuvo un valor de ancho de banda  $BW = 4$  MHz.

$$BW = \frac{1}{T} = \frac{1}{250 \text{ ns}} = 4 \text{ MHz} \quad (1)$$

Para calcular la velocidad de transmisión del prototipo se usó como velocidad el puerto SPI de 31.2 MHz y, para cada trama que recibe el Led DotStar 5050, se envía 32 bits para enviar una señal de “0” o “1” entonces, la velocidad a la que transmite los datos es  $V_t = 975$  kbps.

$$V_t = \frac{V_{spi}}{Nbits} = \frac{31.2 \text{ MHz}}{32} = 975 \text{ kbps} \quad (2)$$

La Raspberry Pi tiene velocidades SCLK desde 125 MHz hasta 7629 Hz [9] donde se escogió la velocidad de 31.2 MHz ya que con esta frecuencia se logró observar un dato correcto al momento del envío sin distorsiones y manteniendo su forma cuadrada. Se lo puede observar en la Figura 5.

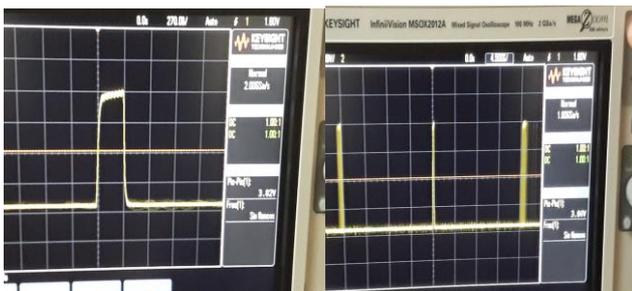


Figura 5. Datos Transmitido por Prototipo Li-Fi

Con los datos recibidos se comprobó la aplicación IoT en la plataforma ThingSpeak los cuales se pueden visualizar de manera remota y se actualiza en cada 20 segundos, suficiente para esperar el siguiente envío de datos. La aplicación únicamente muestra datos mientras la aplicación se está ejecutando, se lo puede observar en la Figura 6.

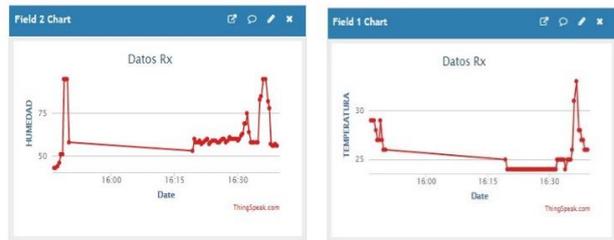


Figura 6. Datos Recibidos y Mostrados en ThingSpeak

Mediante un modelo matemático generado en el software Matlab se calcula el BER (Bit Error Rate), en el cual se simula un canal de transmisión VLC con un modelo de propagación LOS (Line of Sight) con 100 símbolos en su trama de datos, una altura dada y enlace directo entre transmisor y receptor. Se ingresan las características que presenta el prototipo en sus componentes de transmisión (Led) que son el ángulo de radiación y potencia del led y en su recepción (Fototransistor) la responsividad, campo de visión (FoV) y tiempo de respuesta. Datos que se encuentran en sus respectivos datasheet.

Tabla 2: Valores de BER modelo Li-Fi

Potencia del Led (dBm)	Potencia del Led (w)	BER
-6	0.2511	0.2436E0
-4	0.3981	0.1590E0
-2	0.6309	0.851E-1
0	1.000	0.389E-1
2	1.5848	0.142E-1
4	2.5118	0.62E-2
6	3.9810	0.78E-2
8	6.3095	0.15E-2
10	10.00	0.4E-3
12	15.84	0.40E-2

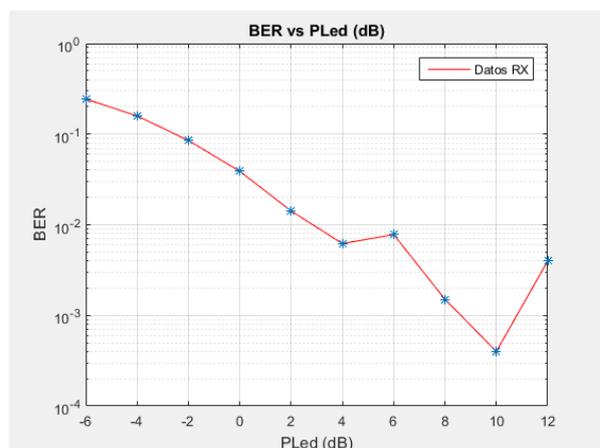


Figura 7. Grafica del BER vs Pot. Led (dB)

Con la potencia de 1 w del led y el BER obtenido en la Tabla 2 se calcula el porcentaje de pérdidas comprobando que de los 100 datos transmitidos en la simulación los bits errados representan al 4% de pérdidas.

$$BER = \frac{\text{bits errados}}{\text{bits transmitidos}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{bits errados} &= BER * \text{bits transmitidos} \\ \text{bits errados} &= 0.389 * 10^{-1} * 100 \\ \text{bits errados} &= 3.89 \approx 4 \end{aligned}$$

#### 4. Conclusiones

Con la investigación de la tecnología VLC/Li-Fi se determinaron las características que cumple como tecnología de comunicación inalámbrica que transmite información en el espectro visible de la luz (400nm a 700nm) y siendo una solución a la saturación del espectro radioeléctrico por su gran ancho de banda (~670 GHz) además de su reutilización en infraestructura y bajo consumo del recurso energético (lámparas led de 12w) en las comunicaciones actuales, como se las muestra en la Tabla 1. comparándola con otras formas de comunicación.

Mediante el uso de las Raspberry Pi se diseñó un prototipo capaz de enviar y recibir información por luz visible con componentes a bajo costo como son los leds DotStar para la transmisión con modulación OOK y un fototransistor BPX43 como receptor. Además, su procesamiento de datos a base del lenguaje de programación Python y sus librerías, el cual al tratarse de un lenguaje de alto nivel su código es interpretativo para otros desarrolladores, se puede integrar a plataformas IoT gratuitas como es ThingSpeak que permite su uso sin la necesidad de crear servidores o desarrollar algún software web adicional.

Con la implementación del prototipo Li-Fi se logró obtener una transmisión de datos con un valor de ancho de banda igual a 4 MHz y una velocidad de transmisión de 975 Kbps los cuales fueron obtenidos al aplicar las ecuaciones (1) y (2) y las mediciones realizadas con el osciloscopio.

Al obtener el BER de este prototipo se puede observar que con la potencia de un solo led (1w) se tiene un BER de 0.389E-1 que representa el 4% de pérdida de datos al despejar la ecuación (3) con respecto al número de símbolos transmitidos en la simulación. Por lo tanto, el prototipo es funcional para transmisiones a bajas velocidades y mediante la implementación de otros métodos de codificación y modulación, se lograría obtener mejores resultados.

#### 5. Referencias

- [1] B. Lorenzo, Estudio del Estado del Arte de los sistemas de comunicaciones por luz visible (VLC), Sevilla: Universidad de Sevilla, 2016.
- [2] Xataka, "Tecnología Li-Fi: Qué es y cómo puede revolucionar las comunicaciones móviles," 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.xatakamovil.com/futuro/tecnologia-li-fi-que-es-y-como-puede-revolucionar-las-comunicaciones-moviles>.
- [3] O. E. M. R. J. R. M. R. R. F. N. V. J. P. & M. S. G. Cárdenas Villavicencio, "Estudio entre las tecnologías WIFI – LIFI en la optimización del servicio de internet," Journal of Science and Research: Revista Ciencia E Investigación, 2017.
- [4] B. Cendón, "El Origen Del IoT," 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.bcendon.com/el-origen-del-iot/>.
- [5] C. García, Internet de las Cosas IoT con Raspberry pi, Catalunya: Universitat Oberta de Catalunya, 2015.
- [6] REDCEDIA, "Comunicaciones a través de luz visible para 5G," 2018.
- [7] P. Fergusson, "Light Fidelity (Li-Fi) Prototype with Raspberry Pi," 2016. [En línea]. Disponible: <https://pdfs.semanticscholar.org/1c88/2a648e669b91dda26c41a8a1c2c2fd16e164.pdf>. [Último acceso: 2019].

- [8] M. Analytics, “ThingSpeak,” MathWorks, [En línea]. Disponible: <https://la.mathworks.com/help/thingspeak/>. [Último acceso: 2020].
- [9] M. Tinue, “Pure Python library to drive APA102 LED stripes; Use with Raspberry Pi,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://github.com/tinue/apa102-pi.git>. [Último acceso: 2019].
- [10] W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, México: Pearson, 2003.
- [11] S. S. Reyes, “TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE TEXTO MEDIANTE LUZ VISIBLE DE LEDS Y SENSOR DE LUZ,” Noviembre 2018. [En línea]. Disponible: <https://pdfs.semanticscholar.org/64d7/d1f8fece9f99afdd7dd5bed22023c1724667.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [12] J. G. P. Vinay K. Ingle, Digital Signal Processing using MATLAB, Cengage Learning, 2010.