

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



SUSCEPTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE RESPECTO A LA LUZ
SOLAR

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Alejandro José Tecú Bocanegra
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2016

SUSCEPTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE RESPECTO A LA LUZ
SOLAR

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



SUSCEPTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE RESPECTO A LA LUZ
SOLAR

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Alejandro José Tecú Bocanegra
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,


2016

Vo.Bo. :

(f) 
Ing. José Augusto Sánchez Villanueva

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. José Augusto Sánchez Villanueva

(f) 
Ing. Julio Ismael Vásquez Vargas

(f) 
MSc. Carlos Alberto Esquit Hernández

Fecha de aprobación: Guatemala 7 de diciembre de 2016

CONTENIDO

	Página
Lista de cuadros.....	v
Lista de figuras.....	vi
Resumen.....	viii
I. Introducción.....	1
II. Objetivos.....	2
A. Generales.....	2
B. Específicos.....	2
III. Justificación.....	3
IV. Marco teórico.....	4
A. El espectro electromagnético.....	4
B. Historia de la comunicación inalámbrica.....	5
C. Comunicación por luz visible.....	6
D. Diodo emisor de luz (LED).....	10
E. Fotodiodo.....	11
F. Tasa de error binario.....	14
G. Comunicación serial.....	15
H. Pyserial.....	17
I. Iluminación.....	19
V. Metodología.....	22
A. Materiales.....	22
B. LED utilizado.....	22
C. Fotodiodo utilizado.....	22

D.	Desarrollo de software en el transmisor y el receptor	23
E.	Construcción del sistema VLC	24
F.	Ejecución de pruebas.....	26
VI.	Resultados	28
A.	Sistema de comunicación por luz visible	28
B.	Pruebas de susceptibilidad.....	31
VII.	Análisis de resultados	35
VIII.	Conclusiones.....	39
IX.	Recomendaciones.....	40
X.	Bibliografía.....	41
XI.	Anexos.....	44
A.	Hoja de datos de LED seleccionado	44
B.	Hoja de datos del fotodiodo seleccionado	47
C.	Hoja de datos del luxómetro LX1010b.....	50
D.	Código fuente de los programas utilizados en el transmisor y receptor.....	53

LISTA DE CUADROS

	Página
1. Longitudes de onda producidas con materiales conductores.....	10
2. Comparación de eficacia luminosa de diferentes tipos de lámparas.....	11
3. Funciones y métodos de la biblioteca pyserial de Python.....	18
4. Tabla de criterios de iluminación.....	20
5. Velocidades alcanzadas.....	30
6. Mejoramiento del sistema conforme se aumenta la intensidad del LED.....	34

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Espectro electromagnético.....	4
Figura 2. Transmisor del fotófono.	6
Figura 3. Receptor del fotófono.	7
Figura 4. Tipos de configuración para los sistemas VLC.	8
Figura 5. Modulación VPPM.	9
Figura 6. Proceso de emisión de luz de un LED.	11
Figura 7. Fotodiodo con unión p-n.....	12
Figura 8. Construcción de un foto diodo PIN.	14
Figura 9. Construcción de un fotodiodo APN.....	14
Figura 10. Transmisión síncrona.....	16
Figura 11. Transmisión asíncrona.....	16
Figura 12. Amplificador operacional no inversor.	25
Figura 13. Comparador de voltaje.....	25
Figura 14. Diagrama de bloques de todo el sistema de comunicación por luz visible.....	26
Figura 15. Lugar en donde se realizaron las pruebas.	26
Figura 16. Transmisión serial, señal enviada color amarillo y señal recibida sin amplificar color azul. 28	
Figura 17. Resistencias utilizadas en el amplificador no inversor.	29
Figura 18. Transmisión serial, señal enviada color amarillo y señal recibida amplificada color azul....	29
Figura 19. Configuración del comparador de voltaje utilizado.....	29
Figura 20. Transmisión serial, señal enviada color amarillo y salida del comparador color azul.	30
Figura 21. Sistema VLC construido.....	30
Figura 22. Resultados de las pruebas con una tasa de transferencia de 19.2 Kbps.....	31
Figura 23. Resultados de las pruebas con una tasa de transferencia de 38.4 Kbps.....	31
Figura 24. Resultados de las pruebas con una tasa de transferencia de 57.6 Kbps.....	32
Figura 25. Resultados con tasa de transferencia de 19.2 Kbps, indicando el límite de correcciones.	32
Figura 26. Resultados con tasa de transferencia de 38.4 Kbps, indicando el límite de correcciones.	33
Figura 27. Resultados con tasa de transferencia de 57.6 Kbps, indicando el límite de correcciones.	33
Figura 28. Características y aplicaciones del LED de alta potencia.	44
Figura 29. Características eléctricas del LED de alta potencia.	45
Figura 30. Curvas características del LED de alta potencia.....	46

Figura 31. Fotodiodo DET10A de THORLABS.	47
Figura 32. Especificaciones técnicas del fotodiodo DET10A.....	48
Figura 33. Respuesta espectral del fotodiodo DET10A.....	49
Figura 34. Características principales.	50
Figura 35. Características eléctricas.....	51
Figura 36. Consideraciones para medir.....	52
Figura 37. Código fuente del transmisor.....	53
Figura 38. Código fuente del receptor, parte 1/3.....	54
Figura 39. Código fuente del receptor, parte 2/3.....	55
Figura 40. Código fuente del receptor, parte 3/3.....	56

RESUMEN

Este trabajo de graduación tiene como objetivo verificar el nivel de intensidad mínimo del transmisor de un sistema de comunicación por luz visible, para cumplir con una transmisión de datos con una tasa de error binario constante dado cierto nivel de intensidad de la luz solar. Éste se desarrolló en dos partes: la primera en la construcción de un sistema de comunicación por luz visible, VLC por sus siglas en inglés, en modo simplex. La segunda en someter éste a pruebas para determinar la magnitud en que afecta la luz del Sol en la transmisión de datos.

Se seleccionó un LED y un fotodiodo que cumpliera con ciertas características para la construcción del sistema VLC. Las pruebas de susceptibilidad se realizaron mediante la medición de la luminiscencia del Sol, utilizando un luxómetro. Para luego transmitir datos y calcular la tasa de error binario.

En los resultados se puede observar que conforme el nivel de iluminación del Sol aumenta, la tasa de error binario aumenta. Sin embargo se consiguió disminuir la tasa de error binario, hasta un 32%, aumentando la intensidad del LED transmisor. Se concluyó que la mejor intensidad para el LED transmisor es de 1500 luxes.

Al finalizar este trabajo se pudo apreciar el futuro que esta tecnología tiene. Las velocidades de transmisión que investigadores han alcanzado están en el orden de los Gbps. Además lugares en donde la radiofrecuencia no es permitida se podrían ver beneficiados con la implementación de dicha tecnología.

Por último se recomienda utilizar un filtro en el fotodiodo que permita pasar solo la longitud de onda del LED transmisor, para comprobar si se logra reducir de una mejor manera la tasa de error binario.

I. INTRODUCCIÓN

Con la invención del LED la idea de utilizar la luz como medio de comunicación empezó a resurgir. La comunicación por luz visible, VLC por sus siglas en inglés, utiliza la tecnología LED de color blanco. La forma en que opera este tipo de sistemas es haciendo parpadear al LED a altas velocidades, indetectables al ojo humano, para transmitir información. La ventaja más importante en la implementación de estos sistemas de comunicación es que se puede utilizar la infraestructura que nos rodea sin necesidad de hacer un gran cambio. Esto es gracias a que la tecnología LED está presente en prácticamente todos lados.

En este trabajo de graduación se presenta el nivel de iluminación mínimo del LED transmisor de un sistema VLC, para lograr una transmisión de datos confiable en base a la tasa de error binario. Lo que se pretende probar es que si se aumenta la intensidad del LED transmisor, la tasa de error binario empieza a disminuir. Se sabe que en general para los sistemas de transmisión entre más alta la velocidad de transferencia, la tasa de error binario aumenta. Por lo que se verifica si esto también se cumple para los sistemas VLC.

Se construyó un sistema VLC en modo simplex y luego dicho sistema se sometió a pruebas para determinar la magnitud en que afecta la luz del Sol a la transmisión de datos. Primero se seleccionó un tipo de LED y fotodiodo que cumplieran con ciertas características para la construcción del sistema. Luego utilizando el lenguaje de programación Python y la biblioteca Pyserial se implementó un software capaz utilizar el protocolo de comunicación RS-232 y calcular la tasa de error binario, en base a la información transmitida. En las pruebas de susceptibilidad se utilizó un luxómetro para medir el nivel de iluminación del Sol. Inmediatamente se realizaba una transmisión de información y posteriormente, con el software antes desarrollado, se calculaba la tasa de error binario. Este procedimiento se realizó con tres diferentes velocidades de transmisión y además tres distintas intensidades del LED transmisor. Es importante mencionar que el sistema VLC que se construyó solo puede enviar información, mas no puede recibir. Asimismo la distancia entre el transmisor y receptor es de 50 cm, esto con el motivo de simular una lámpara de escritorio.

Luego de analizar los resultados obtenidos se logró observar que al incrementar la intensidad de la luz del Sol, la tasa de error binario aumenta. No obstante se consiguió disminuir la tasa de error binario aumentando la intensidad del LED transmisor. Finalmente se consigue proporcionar un nivel mínimo de intensidad para el LED transmisor el cual es 1500 luxes.

II. OBJETIVOS

A. GENERALES

Verificar los luxes mínimos necesarios del transmisor de un sistema de comunicación por luz visible, para cumplir una transmisión de datos con una tasa de error binario constante dada la luminiscencia del día.

B. ESPECÍFICOS

- Construir un sistema de comunicación por luz visible con longitud de onda en el rango de 425nm y 615nm, modulando la información a transferir con la ayuda de un LED y desmodulando dicha información con un fotodiodo en el receptor.
- Revisión bibliográfica de la tasa de error binario para conocer la tasa más adecuada de una transmisión de datos.
- Medir mediante un luxómetro los niveles de luminiscencia del día.
- Evaluar la susceptibilidad del sistema de comunicación por luz visible con respecto a la luz solar, calculando la tasa de error binario que se obtiene respecto a la luminiscencia del día.
- Variar la luminiscencia de LED para garantizar el nivel de luxes del transmisor del sistema de comunicación por luz visible.

III. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años se ha incrementado el uso de dispositivos de multimedia que se conectan a Internet, sobretodo por Wireless Fidelity (Wi-Fi). Estos dispositivos están impulsando una demanda insaciable de la capacidad inalámbrica, Wi-Fi, como velocidades de transmisión más altas. Se requiere que la infraestructura de red y de Internet evolucionen para cumplir esta demanda.

Los sistemas de comunicación por luz visible, VLC, pretenden satisfacer esta demanda de capacidad inalámbrica. Con esta tecnología es posible codificar datos y enviarlos por medio de la luz con el simple hecho de variar la velocidad a la que una bombilla LED se enciende y apaga. La velocidad a la que variaría la bombilla LED es más rápido que la mínima variación de intermitencia que el ojo humano puede percibir, por lo cual no afecta la salud de las personas. Una persona podría estar conectada a Internet por medio de la luz, al mismo tiempo que ilumina el lugar donde se encuentra.

Con VLC se han alcanzado velocidades de transferencia más altas que con Wi-Fi, 3Gbps. Además se puede aplicar en varios escenarios donde la radiofrecuencia del Wi-Fi no tiene acceso, por ejemplo plantas de energía, aviones o incluso hospitales debido al riesgo que conlleva en la seguridad de las personas.

Las bombillas LED han ido sustituyendo a los focos incandescentes y fluorescentes en muchos lugares del mundo por lo que implementar la tecnología VLC tendría un costo bajo. Los bajos costos de implementación, distribución y uso impactarían positivamente la economía del sector de telecomunicaciones, así como el bolsillo del consumidor.

Como se ha descrito hasta el momento esta tecnología es para uso en interiores, pero aun así uno de los problemas que afrontan los sistemas VLC es la interferencia que causa la luz del Sol que llega por distintos medios. Se pretende proporcionar información relevante para que los sistemas VLC puedan mejorar el rendimiento ante la interferencia causada por la luz del Sol. Los estudios consultados para la base de este proyecto provienen de países con investigación tecnológica fuerte; sin embargo en Guatemala, no se encontraron datos que precedan este tipo de proyectos. Se considera que en el futuro cercano esta información puede ser una base para la optimización de estos sistemas de comunicación a nivel mundial.

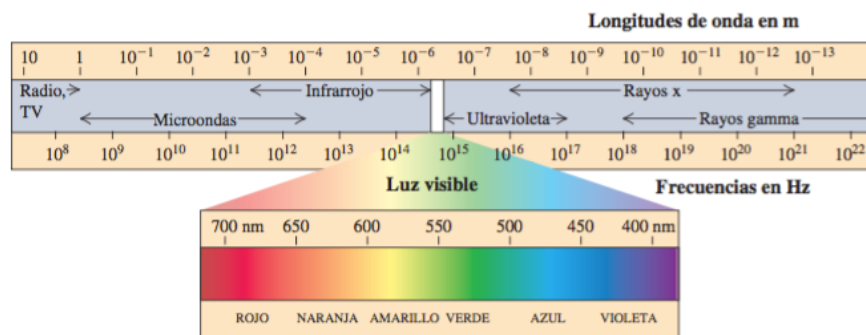
IV. MARCO TEÓRICO

A. EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético se define como la distribución de radiaciones u ondas electromagnéticas presentes en el universo (Pérez, 2016). El espectro electromagnético incluye ondas de radio, televisión, luz visible, radiación infrarroja y ultravioleta, rayos x y los rayos gamma (Young, 2009).

El ser humano es capaz de percibir, directamente, solo una pequeña parte del espectro con el sentido de la vista, a esa pequeña parte se le denomina luz visible. La luz visible tiene una longitud de onda que va desde los 400 a 700 nm, con frecuencias de 750 a 430 THz. La luz blanca que ilumina nuestra casa u oficina está compuesta por todas las longitudes de onda del espectro visible, mientras que la radiación que proviene del Sol está compuesta por la luz visible y radiaciones infrarroja y ultravioleta. Aunque la gran mayoría del espectro es invisible no quiere decir que no sea importante. Por ejemplo, el sistema de comunicaciones (Radio AM, FM y televisión) utiliza ondas de radio que tienen una frecuencia de 0.54 a 108 MHz. Las microondas son utilizadas para redes inalámbricas y de telefonía. Las cámaras utilizan la radiación infrarroja para detectar a que distancia se encuentra el objeto y de esta manera realizar un autoenfoco. La radiación ultravioleta se utiliza para aplicaciones en donde es muy importante una alta precisión, *e. g.* la cirugía ocular LASIK. En el campo de la medicina se utilizan los rayos x ya que estos pueden atravesar el tejido muscular. Los rayos gamma son las ondas electromagnéticas con la longitud de onda más corta, estos están presentes en la naturaleza en materiales radiactivos. Los rayos gamma se utilizan en la medicina para destruir células cancerosas (Young, 2009). En la Figura 1 se puede observar la ubicación de cada una de la radiaciones en el espectro electromagnético.

Figura 1. Espectro electromagnético.



(Fuente: Young, 2009)

B. HISTORIA DE LA COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Las primeras redes inalámbricas fueron desarrolladas antes de la época industrial. Estos sistemas transmitían información, a través de distancias con línea de vista, utilizando señales de humo, antorchas de señalización, el reflejo de espejos, entre otros. Un elaborado conjunto de combinaciones de señales fue desarrollado para transmitir mensajes complejos con estas señales rudimentarias. Estaciones de observación fueron construidas en lo alto de las montañas y a lo largo de los caminos para retransmitir estos mensajes a través de largas distancias. Estas primeras redes de comunicaciones fueron remplazadas, primero, por el telégrafo luego por el teléfono y más tarde por la radio (Goldsmith, 2005).

Actualmente los avances tecnológicos, la variedad y la calidad de los dispositivos de comunicación y aplicaciones que se ejecutan en estos dispositivos han aumentado dramáticamente. Estas aplicaciones de alta calidad requieren una excesiva capacidad de transferencia de datos y velocidad. Gran parte de la transmisión de Internet en el núcleo es manejada por infraestructura de fibra óptica, la cual puede alcanzar velocidades de datos en el orden de los Tb/s. Por otra parte, estas altas velocidades de datos en la parte del núcleo no pueden ser percibidos por los usuarios finales. Sin embargo, no siempre es beneficioso y concebible desplegar una infraestructura de cable a cada punto de un sitio. Por lo tanto, la importancia de la comunicación inalámbrica aumenta día a día y está siendo ampliamente utilizado en casas, oficinas y establecimientos educativos (Cevik, 2015).

Aunque la comunicación inalámbrica es favorable en términos de costo, practicidad y fácil operación se produce el problema de cuello de botella. Las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia por debajo de los 10GHz han sido utilizadas para la comunicación inalámbrica. Sin embargo el ancho de banda no puede satisfacer las altas demandas de capacidad y velocidad, además existen múltiples tecnologías que comparten el mismo ancho de banda (Wi-Fi, Bluetooth, redes de teléfonos móviles), científicos y profesionales se han enfocado en la búsqueda de nuevas tecnologías para la comunicación inalámbrica. Una alternativa propuesta para el problema del cuello de botella fue la tecnología Gigabit inalámbrico, WiGig por sus siglas en inglés, con esta tecnología se han alcanzado 6-7 Gb/s de velocidad de transferencia. Sin embargo esta tecnología trabaja con una frecuencia de 60GHz por lo que el rango de propagación es bastante limitado, conforme incrementa la distancia la tasa de error incrementa debido a la baja energía que llega al dispositivo (Cevik, 2015).

En referencia a la búsqueda de nuevas tecnologías, se desea utilizar ondas electromagnéticas con una longitud de onda menor a 1 mm, estas longitudes de onda corresponden al lado derecho del espectro electromagnético, *vid. supra*. La comunicación con este tipo de ondas se le denomina comunicación óptica inalámbrica, OWC por sus siglas en inglés. Transferencia de datos utilizando la banda infrarroja ya se ha logrado, miles de dispositivos cuentan con esta tecnología. Por otra parte la generación de comunicación inalámbrica 4G y su sucesora no están construidas por una sola tecnología sino que por varias, *e.g.* LTE y

WiMAX son dos tecnologías diferentes, pero pertenecen a la generación 4G. Se espera que la comunicación óptica inalámbrica sea una parte importante de las generaciones 4G y 5G, especialmente en la parte del usuario final (Cevik, 2015).

Además de la comunicación óptica inalámbrica también se está desarrollando la comunicación por luz visible. La diferencia entre estas dos tecnologías es que la comunicación por luz visible incluye solo las ondas del espectro visible, mientras que la comunicación óptica inalámbrica incluye la radiación infrarroja y ultravioleta.

C. COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE

La idea de utilizar la luz como medio de comunicación se llevó a cabo por Alexander Graham Bell en 1880 con la invención del fotófono, un dispositivo que transmitía una señal de voz en un haz de luz. Bell centraba la luz del Sol con espejo hablaba en un mecanismo que hacía vibrar el espejo. El haz de vibración era recogido por un detector en el extremo receptor y luego era decodificado para obtener la señal de voz, el mismo procedimiento que el teléfono hacía con las señales eléctricas. Pero Bell no pudo generar una frecuencia portadora útil, ni fue capaz de transmitir el haz de luz de punto a punto. Los obstáculos de la naturaleza como la niebla y la lluvia, que podrían interferir con el fotófono, hicieron que Bell detuviera las investigaciones de su invento. Con la invención del diodo emisor de luz, LED por sus siglas en inglés, la idea de utilizar la luz como medio de comunicación empezó de nuevo (Sagotra, 2013).

Figura 2. Transmisor del fotófono.

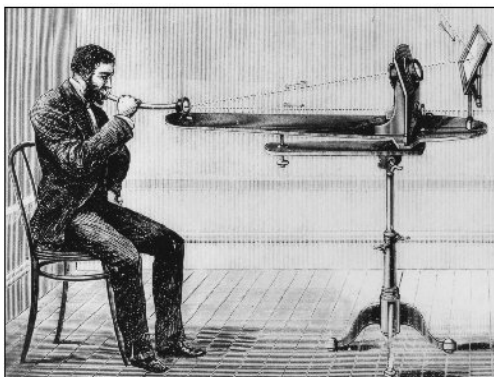
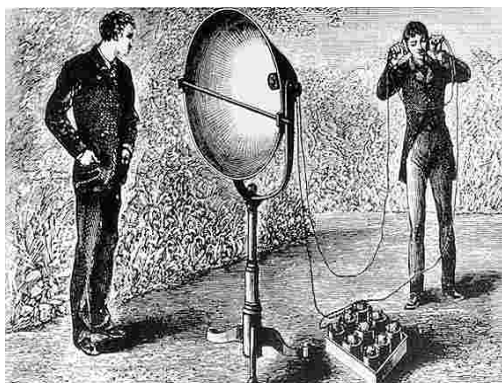


Figura 3. Receptor del fotófono.



1. **Sistemas de comunicación por luz visible.** En años recientes una de las ideas presentadas para la comunicación óptica inalámbrica fue el método de comunicación por luz visible, VLC por sus siglas en inglés. VLC es un sistema de comunicación, el cual utiliza la luz visible como portadora para la transmisión de datos e iluminación. Sus principales componentes son un LED y un fotodiodo. En su forma más básica estos sistemas transmiten información apagando y encendiendo el LED, en donde encendido se transmite un 1 digital y apagado un cero. Si este LED se enciende y apaga a una rápida velocidad, entonces se puede transmitir información. Estas velocidades son imperceptibles para el ojo humano por lo tanto no les afectaría (Haas, 2011).

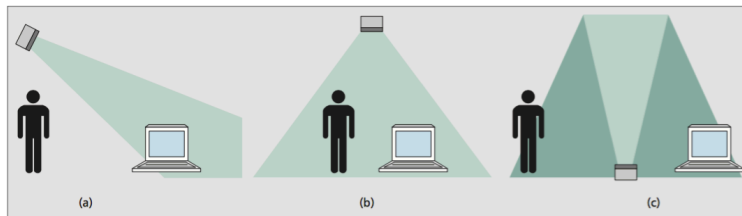
Según la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos, se esperaba un déficit de espectro para el año 2013 para la transmisiones inalámbricas. Esto debido al crecimiento exponencial en la demanda de transmisiones inalámbricas y el escaso espectro para transmisiones con radiofrecuencia. Por lo que los sistemas de comunicación por luz visible podrían ser de gran importancia para las transmisiones inalámbricas (Grobe, 2013).

Hoy en día en prácticamente todos los lugares se utiliza la iluminación LED, las razones del porque se explicarán más adelante. Espera que para el año 2018 la iluminación en todo el mundo sea de este tipo. Por lo tanto el mayor desafío es desarrollar dispositivos que se puedan conectar a estas iluminarias para lograr transmitir datos. Algunos de los beneficios que trae consigo los sistemas VLC son, el enorme ancho de banda del espectro visible, la ausencia de interferencia electromagnética de los sistemas de radiofrecuencia, y la seguridad en la transmisión ya que la luz no puede atravesar paredes (Grobe, 2013).

a. **Características del canal.** En la Figura 4 se puede observar las configuraciones del canal para los sistemas VLC. La primera configuración es una configuración con línea de vista directa, con la cual se puede alcanzar velocidades de transmisión altas (Figura 4a), mientras en las configuraciones donde la línea de vista no es directa o es difusa (Figura 4b y 4c), la velocidad de transmisión es baja. Por lo tanto

la capacidad del canal en los sistemas VLC depende fuertemente de la disponibilidad de un camino con línea de vista (Grobe, 2013).

Figura 4. Tipos de configuración para los sistemas VLC.



(Fuente: Grobe, 2013)

b. Tipos de comunicación. Las comunicaciones están clasificadas de acuerdo a si son en un solo sentido (simplex) o en ambos sentidos (semi-dúplex o dúplex completo). Con el tipo simplex solo se puede transmitir información, más no recibir. Un sistema de comunicación dúplex completo puede tanto transmitir como recibir información simultáneamente. El tipo semi-dúplex también puede transmitir y recibir información, con la diferencia lo hace alternando los canales (Frenzel, 2015).

Los sistemas de comunicación por luz visible tienen el problema que solo pueden transmitir información del modo simplex. Pero se está buscando soluciones para este problema, como utilizar un canal infrarrojo para crear una comunicación dúplex completa o de implementar redes híbridas. Las redes híbridas sugieren utilizar la tecnología VLC para el canal de descarga y para el canal de subida utilizar tecnologías como WI-FI (Shao, 2016).

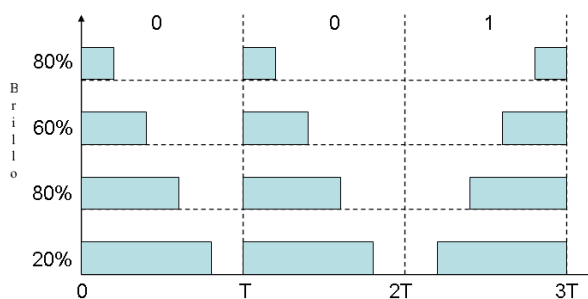
c. Esquemas de modulación de datos. Según el estándar IEEE802.15.17, el cual define la norma para la capa física y la capa de control de acceso al medio, las modulaciones para la transmisión de datos con luz visible son, la modulación digital de amplitud, la modulación de posición de pulso variable y la modulación por desplazamiento de color. Además de estas modulaciones que define el estándar, investigadores han demostrado que se puede alcanzar velocidades más altas (*i.e.* en el orden de los Gb/s) con otro tipo de modulaciones como la modulación de acceso múltiple por división de frecuencia ortogonales, OFDM por sus siglas en inglés, y la modulación discreta de multitono, DTM por sus siglas en inglés (Povey, 2011).

1) Modulación digital de amplitud. A esta modulación también se le conoce como modulación OOK, por sus siglas en inglés. Esta es la más simple, ya que consiste en encender y apagar el LED, donde un 1 digital es cuando el LED está encendido y un 0 cuando el LED está apagado. Según el estándar con esta modulación se logra una velocidad de transmisión entre 12 kb/s y 9.6

Mb/s (Povey, 2011). Aun así investigadores han demostrado que con la modulación digital de amplitud se han logrado entre 100-230 Mb/s de velocidad de transmisión (Grobe, 2013).

2) Modulación de posición de pulso variable. También llamada modulación VPPM, por sus siglas en inglés. Esta modulación codifica los datos utilizando la posición del pulso dentro de un periodo de tiempo establecido. La duración del periodo que contiene el pulso debe de ser lo suficientemente largo para que este permita que se identifique diferentes posiciones, ver Figura 5. Un 0 digital es representado por un pulso positivo al inicio del periodo seguido de un pulso negativo, un 1 digital es representado por un pulso negativo al inicio del periodo seguido por un pulso positivo. Según el estándar con esta modulación se logra la misma velocidad de transferencia que con la modulación digital de amplitud, aunque la modulación de posición de pulso variable permite el uso de iluminarias con regulador de intensidad (Povey, 2011).

Figura 5. Modulación VPPM.



3) Modulación por desplazamiento de color. Este tipo de modulación también se llama modulación CSK, por sus siglas en inglés. Esta se utiliza cuando el sistema de iluminación es un LED tricolor (*i.e.* rojo, verde, azul). Con esta modulación es posible transmitir tres bits de información al mismo tiempo, un bit en cada color como se hace en la transmisión paralela. Lo complejo de esta modulación es filtrar cada una de las señales en el receptor. Según el estándar con esta modulación se logra velocidades de transmisión entre 12 y 96 Mb/s (Povey, 2011)

2. Light Fidelity (LIFI). Se escucho por primera vez este término en una conferencia de TED del Profesor Harald Haas. Durante esta conferencia el Profesor Haas enfatizó en que podemos utilizar las luminarias de tecnología LED para transmitir datos a una tasa de transferencia superior a lo que la tecnología WI-FI nos permite. Además realizó una demostración de una transmisión de video en alta definición utilizando la tecnología LIFI. Esta tecnología esta basada en los sistemas VLC, pero la idea del Profesor Haas es que LIFI sea una tecnología que vaya más allá de simplemente transmitir datos con la luz. Es decir que él quiere que LIFI pueda tener características, como un sistema de adaptación dinámico para poder transmitir datos sin que el receptor tenga que tener línea de vista directa con el transmisor y además que este sistema pueda tener movilidad (Haas, 2016).

D. DIODO EMISOR DE LUZ (LED)

El diodo emisor de luz, LED por sus siglas en inglés, es un diodo de unión p-n que convierte la corriente directa que pasa a través de él en luz. Cuando un diodo con unión p-n es polarizado directamente (ver Figura 6) se produce una recombinación entre portadores en la zona de unión. Es decir, los electrones del semiconductor tipo N caen de la banda de valencia a la banda de conducción, produciendo en la banda prohibida una radiación electromagnética. La frecuencia de dicha radiación depende de la anchura de la banda de prohibida, la cual depende del material semiconductor. Por lo tanto la radiación puede ser luz visible o no visible (Morrón, 2016).

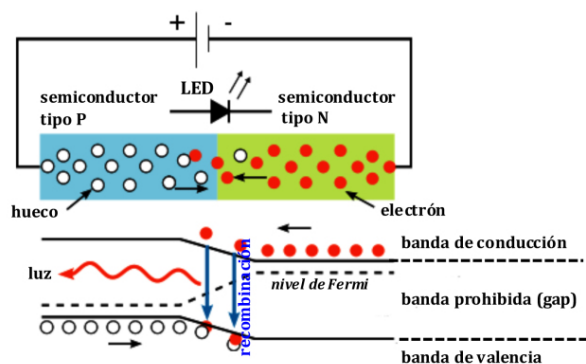
En el Cuadro 1 se puede observar las longitudes de onda que producen algunos de los materiales semiconductores utilizados para fabricar los LED.

Cuadro 1. Longitudes de onda producidas con materiales conductores.

Material	Longitud de onda (nm)
AlGaInP	630-680
GaInP	670
GaAlAs	620-895
GaAs	904
InGaAs	980
InGaAsP	1100-1650
InGaAsSb	1700-4400

(Fuente: Tomasi, 2003)

Figura 6. Proceso de emisión de luz de un LED.



(Fuente: Morrón, 2016)

1. Características de los LED. Hoy en día los diodos emisores de luz son utilizados en varias aplicaciones como en pantallas de televisión, iluminación y hasta en sistemas de comunicación (e.g. fibra óptica). La alta demanda que estos tienen es gracias a su ahorro de energía y su larga vida útil. En el siguiente cuadro se puede observar la eficacia luminosa (lumens/potencia) del LED blanco con respecto a otros tipos de lámparas.

Cuadro 2. Comparación de eficacia luminosa de diferentes tipos de lámparas.

Categoría	Tipo	Eficacia luminosa (lm/W)
Incandescencia	100-500 W tungsteno halógena	17-20
Fluorescencia	Mercurio a muy baja presión con reactancia	60
Descarga gaseosa	Vapor de sodio a baja presión	100-200
Arco	Vapor de mercurio a ultra alta presión	58-78
LED blanco	LED de última tecnología	>300

(Fuente: Morrón, 2016)

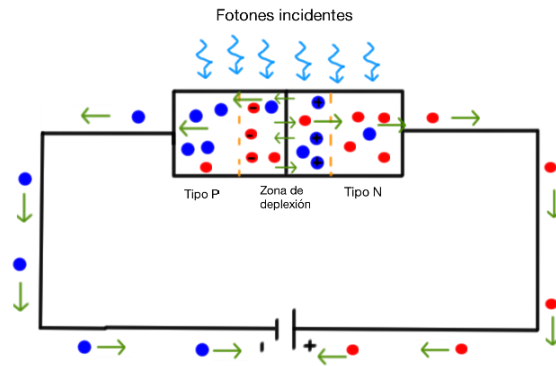
En lo que respecta a la vida útil de los LED, estos duran entre 40,000 y 100,000 horas. Duran unas 10 veces más que un tubo fluorescente y hasta 100 veces más que una bombilla de incandescencia.

E. FOTODIODO

Un fotodiodo es un diodo con unión p-n polarizado inversamente que convierte señales de luz, visible o no visible, en señales eléctricas. Cuando un fotodiodo es expuesto a la luz, los fotones que impactan en la unión causan que los enlaces covalentes se rompan, provocando que pares de electrón-hueco se generen en la zona de depleción. El campo eléctrico en la zona incidente barre los electrones liberados al lado n y los huecos al lado p, provocando una corriente en reversa a través de la unión. Esta corriente se conoce como

fotocorriente y es proporcional a la intensidad de la luz incidente. Los fotodiodos se utilizan en aplicaciones como procesamiento de señales, almacenamiento y transmisión de datos, *e.g.* transmisiones con fibra óptica (Sedra, 2004).

Figura 7. Fotodiodo con unión p-n.



1. **Modos de operación.** Un fotodiodo puede operar en dos distintos modos, modo fotovoltaico o modo fotoconductor. A continuación se detalla cada uno de los modos.

a. **Modo fotovoltaico.** Este modo ocurre cuando no se le aplica un voltaje externo al fotodiodo. La fotocorriente es fija y de igual manera es linealmente depende de la intensidad de la luz incidente. A este modo también se le conoce como polarización cero (Gujjari, 2012).

b. **Modo fotoconductor.** En este modo el fotodiodo es polarizado indirectamente, lo cual hace que el ancho de la zona de depleción incremente, reduciendo la capacitancia de la unión. Esto provoca que el fotodiodo tenga una más rápida respuesta (Gujjari, 2012).

2. **Características de los fotodiodos.** Según Tomasi (2003), estas son las características más importantes de los fotodiodos. A continuación se enlistan.

a. **Responsividad.** Es una medida de eficiencia, la cual relaciona la corriente de salida con la potencia óptica de entrada. Tiene unidades de amperes/Watt.

b. **Corriente oscura.** Es la corriente que pasa por un fotodiodo cuando no hay una entrada de luz.

c. **Tiempo de tránsito.** Tiempo en que tarda un portador inducido por luz en cruzar la región de agotamiento. Esta característica define la frecuencia máxima de conmutación.

d. **Respuesta espectral.** Es el intervalo de longitudes de onda con las que reacciona el fotodiodo.

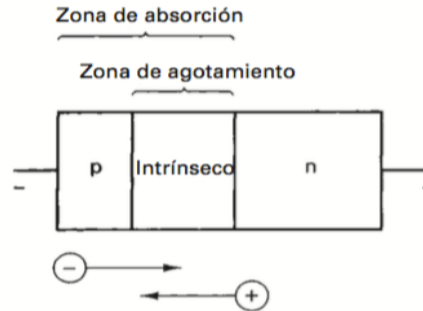
e. **Sensibilidad a la luz.** Es la potencia óptica mínima que puede recibir un fotodiodo para producir una señal eléctrica en la salida.

3. **Tipos de fotodiodos.** En comunicaciones con fibra óptica hay dos tipos de fotodiodos que se utilizan, tipo p-tipo n intrínseco (PIN, por sus siglas en inglés) y los fotodiodos de avalancha (APD, por sus siglas en inglés).

a. **Fotodiodos PIN.** Este es un diodo de capa de agotamiento, es probable que sea el fotodiodo más utilizado para comunicaciones con fibra óptica. Un fotodiodo PIN está construido por una capa ligeramente dopada de material semiconductor tipo n (*i.e.* intrínseca), la cual se encierra entre la unión de la capa de tipo p y capa de tipo n del fotodiodo (ver Figura 8). La luz entra al dispositivo a través de una pequeña ventana y cae sobre el material intrínseco. El material intrínseco se hace grueso y absorbe la

mayoría de fotones. Una vez los fotones son absorbidos, estos agregan energía para generar portadores en la capa de agotamiento y de esta manera permiten el paso de corriente (Tomasi, 2003).

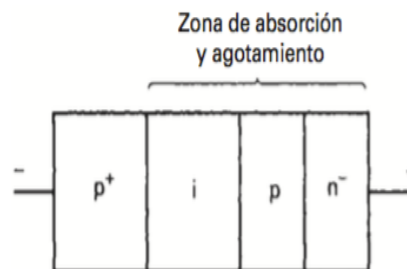
Figura 8. Construcción de un foto diodo PIN.



(Fuente: Tomasi, 2003)

b. Fotodiodo avalancha (APD). Una APD es un diodo tipo p-i-p-n, ver Figura 9, estos son más sensibles que los fotodiodos PIN, por lo que no requieren tanta amplificación como los diodos PIN. La luz que entra al fotodiodo se absorbe en la capa n, mientras que en la unión i-p-n se desarrolla una gran intensidad de campo eléctrico, lo que causa una ionización por impacto. En la ionización por impacto un portador adquiere suficiente energía como para ionizar a otros electrones. Estos portadores ionizados provocan más ionizaciones, el proceso continua como en una avalancha. Por este fenómeno es que los fotodiodos APN son más sensibles (Tomasi, 2003).

Figura 9. Construcción de un fotodiodo APN.



(Fuente: Tomasi, 2003)

F. TASA DE ERROR BINARIO

En transmisiones analógicas, la calidad de la señal se media en una razón de señal a ruido la cual se expresaba en decibeles. Con la llegada de las transmisiones digitales la calidad de la señal se expresa en

términos de la tasa de error binario, BER por sus siglas en inglés. La tasa de error binario es la relación de bits erróneos respecto a la cantidad total de bits enviados en una transmisión de datos (Gupta, 2006).

$$\text{Tasa de error binario} = \frac{\text{Número de bits erróneos}}{\text{Número de bits transmitidos}}$$

Con una señal fuerte y una ruta sin interferencias, la tasa de error es insignificante. En transmisiones donde la señal se debilita a causa de una ruta con interferencias, la tasa de error se vuelve significativa y puede afectar por completo la transmisión (Breed, 2003).

Existen mecanismos de detección y corrección de estos errores. Estos mecanismos solo los mencionaremos, no nos enfocaremos en ellos. Los mecanismos de corrección de errores pueden ser de dos tipos.

1. Corrección de errores hacia atrás. BEC por sus siglas en inglés; cuando el error es detectado el receptor le pide al transmisor que le reenvíe los datos (IIT Kharagpur, 2016).

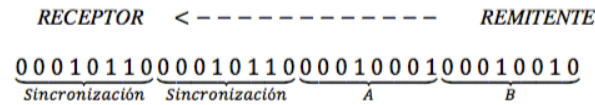
2. Corrección de errores hacia adelante. FEC por sus siglas en inglés; cuando se detecta un error el receptor ejecuta un código que corrige los errores automáticamente (IIT Kharagpur, 2016). La tasa de error binario límite para un mecanismo de corrección de errores hacia adelante en comunicaciones ópticas tiene que ser menor o igual a 2×10^{-3} (Vučić, 2009).

G. COMUNICACIÓN SERIAL

La comunicación en serie consiste en transmitir y recibir información en forma de impulsos eléctricos, un bit a la vez. La comunicación en serie consta de varios protocolos, entre ellos está la comunicación serial. Este es un protocolo de comunicación, muy común, utilizado para la comunicación entre dispositivos. Este tipo de comunicación puede ser síncrono o asíncrono. La mayoría de computadoras, antiguas, poseen un puerto serial RS-232, el cual se utilizaba para este protocolo (National Instruments, 2016).

En la transmisión síncrona el transmisor y receptor utilizan la misma frecuencia en el reloj. Para sincronizar los relojes, el transmisor envía una señal de inicio la cual activa el reloj del receptor y en ese momento están sincronizados, ver Figura 10 (Maldonado, 2013).

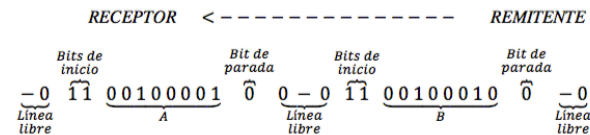
Figura 10. Transmisión síncrona.



(Fuente: Maldonado, 2013)

La transmisión asíncrona consiste en enviar una señal inicial, anterior a cada paquete. Cuando el paquete se ha terminado de enviar, se envía una señal de parada como se muestra en la Figura 11 (Maldonado, 2013).

Figura 11. Transmisión asíncrona.



(Fuente: Maldonado, 2013)

Según National Instruments (2016), para que un dispositivo se pueda comunicar con otro, utilizando este protocolo, es necesario que ambos puertos tengan exactamente las mismas configuraciones. Las configuraciones se presentan a continuación.

1. **Velocidad de transmisión (tasa de baudios).** Indica el número de bits por segundo que se transmiten y se mide en baudios, *e.g.* Las tasas más comunes son 9600, 19200, 38400, 57600 y 115200.

La tasa de baudios se refiere al número de cambio de símbolos que ocurren por segundo. Un símbolo es uno de varios cambios de voltaje, frecuencia o fase. Éste protocolo utiliza dos símbolos, uno para representar un “1” lógico y otro para representar un “0” lógico, estos están representados por niveles de voltaje. En este caso la tasa de baudios es igual a la tasa de bits. Sin embargo, es posible enviar más de dos símbolos por intervalo de transmisión, en donde un símbolo representa múltiples bits. Por lo tanto si se utiliza múltiples símbolos, entonces se transmite una mayor cantidad de bits. La relación entre la tasa de bits y la tasa de baudios se puede ver por la Ecuación 1 (Frenzel, 2015).

Ecuación 1. Relación entre la tasa de baudios y la tasa de bits.

$$R = \text{baudios} \times \log_2(S)$$

En donde R es la tasa de bits y S igual a 2^N , N siendo el número de bits por símbolo.

2. **Bits de datos.** Es la cantidad de bits que se transmite en un paquete. Las cantidades más comunes en los paquetes son 5, 7 y 8 bits.

3. **Bits de parada.** Este bit es utilizado para indicar que la transmisión de un paquete ha terminado. Se puede configurar 1, 1.5 y hasta 2 bits de parada. Entre más bits de parada, más lenta será la transmisión.

H. PYSERIAL

Pyserial es una biblioteca que proporciona soporte para conexiones en serie como el protocolo RS-232 a través de una variedad de diferentes dispositivos como lo son los puertos seriales antiguos, bluetooth, puertos infrarrojos, etc. Esta es una biblioteca para el lenguaje de programación Python de las plataformas como Windows, OSX y Linux. Pyserial es una biblioteca libre de licencia creada por Chris Liechti en el año 2001.

1. Características

- Interfaz basada en una misma clase para todas las plataformas soportadas.
- Acceso a configuración del puerto a través de python.
- Soporte para diferente tamaño de paquetes, bits de parada, paridad, control de flujo con RTS/CTS and/or Xon/Xoff.
- Trabaja con o sin tiempo de espera para recibir un paquete.

2. Requerimientos

- Python 2.7 o Python 3.4
- Windows superior a XP

3. **Instalación.** Pyserial puede ser instalado desde PyPI utilizando el siguiente comando en la terminal del sistema operativo.

- `Python -m pip install pyserial`

4. **Funciones y métodos.** En el Cuadro 3 se presentan algunas de las funciones y métodos de la biblioteca pyserial.

Cuadro 3. Funciones y métodos de la biblioteca pyserial de Python.

Función o método	Parámetros	Descripción
<code>__init__()</code>	<ul style="list-style-type: none"> • Puerto: nombre del dispositivo • Baudrate: cualquier estándar • Tamaño de paquete: número de bits del paquete; FIVEBITS, SIXBITS, SEVENBITS, EIGHTBITS. • Paridad: PARITY_NONE, PARITY_EVEN, PARITY_ODD, PARITY_MARK, PARITY_SPACE. • Bits de parada: STOPBITS_ONE, STOPBITS_ONE_POINT_FIVE, STOPBITS_TWO. • Tiempo de espera: número flotante • Xonxoff: habilitar flujo de control por software. • Rtscts: habilitar flujo de control por hardware. 	Inicializa un objeto de la clase pyserial.
<code>Open()</code>	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene 	Abre el puerto.
<code>Close()</code>	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene 	Cierra el puerto
<code>__del__()</code>	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene 	Destruye el objeto después de cerrar el puerto.
<code>Read()</code>	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño: número de paquetes a leer 	Lee cierta cantidad de paquetes dependiendo del parámetro. Regresa el paquete leído.
<code>Write()</code>	<ul style="list-style-type: none"> • Data 	Escribe la data en el puerto.
<code>Inwaiting()</code>	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene 	Regresa el número de paquetes contenidos en el buffer.

I. ILUMINACIÓN

La iluminación es un factor fundamental para la comodidad del ser humano. Aunque el ser humano tenga la capacidad de adaptarse a diferentes calidades lumínicas, una deficiencia o exceso de iluminación puede producir efectos negativos en la salud de las personas como: fatiga visual, reducción en el rendimiento, incremento en los errores y algunas veces accidentes. Por lo que es recomendado hacer un adecuado análisis de las características que deben disponer los sistemas de iluminación como la adaptación a las tareas a realizar y las características individuales (INSHT, 2015).

1. Magnitudes lumínicas

a. Flujo luminoso. Es la cantidad de energía que emite una fuente. Se mide en lumen (Lm) y su símbolo es Φ (INSHT, 2015)

b. Nivel de iluminación. Es la división entre el flujo luminoso y el área de la superficie en donde la incide la luz. Se representa por la letra E y su unidad de medida es el lux. Es también conocida como iluminancia (INSHT, 2015).

Ecuación 2. Fórmula de iluminancia

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

2. Iluminación natural e iluminación artificial. A la hora de diseñar un área de trabajo es necesario tomar en cuenta tanto la iluminación natural como la artificial. La luz natural es por defecto la mejor ya que produce menor cansancio de la vista, permite apreciar los colores tal y como son, además de ser la más económica. No obstante su principal defecto es que varía demasiado con el tiempo, *e.g.* no es la misma luz en un día de invierno nublado, a las 8:00 hora de la mañana, que un día de verano a las 12:00 horas. La luz natural se utiliza como complemento de la luz artificial o en ausencia de ella misma (INSHT, 2015).

Para diseñar se debe considerar aspectos relacionados con la persona, el tipo de tarea que estará realizando y aspectos relacionados con la iluminación. Todos estos se deben considerar ya que un fallo en uno sólo hará que la iluminación no sea la adecuada. Es necesario rectificar la luz en un área cuando las lámparas no emiten el suficiente flujo luminoso, si hay zonas donde no se dispone de luminarias o si la luz no es la adecuada (INSHT, 2015).

3. Alumbrado. Dependiendo de la actividad que se realice en el área de trabajo, es determinante la distribución de la luminarias para lograr un reparto de luz adecuado. Una mala distribución produciría zonas con nivel de iluminación elevado y zonas oscuras (INSHT, 2015).

a. Alumbrado general. Proporciona una iluminación uniforme sobre toda el área de trabajo. Se consigue distribuyendo luminarias de forma regular por todo el techo del área (INSHT, 2015).

b. Alumbrado general localizado. Proporciona distribución no uniforme de la luz de manera que esta se concentre en el área de trabajo (INSHT, 2015).

c. Alumbrado localizado. Es necesaria cuando se realiza una tarea visual de un trabajo concreto. Se utiliza cuando el nivel de iluminación requerido es mayor a los 1000 luxes, haya obstáculos que tapen la luz del alumbrado general o para personas con problemas visuales. Un aspecto que se debe cuidar cuando se emplea este tipo de alumbrado es que la relación entre las luminancias de la tarea visual y el fondo no sea demasiado elevada, en caso contrario produciría deslumbramiento molesto (INSHT, 2015).

4. Criterios de iluminación. Cada tarea requiere un nivel diferente de iluminación, en las siguientes figuras se puede ver los niveles de iluminación para diferentes tareas. Estos datos fueron proporcionados por la Sociedad de Ingeniería de Iluminación, IES por sus siglas en inglés.

Cuadro 4. Tabla de criterios de iluminación.

Recomendación IES	Nivel mínimo de iluminación (luxes)
Almacenes	500
Auditorios	300
Bancos	700
Bibliotecas	700
Gimnasios	500
Imprentas	1500
Oficinas	1000
Cartografía	2000
Talleres mecánicos	1000
Tiendas de autoservicio	2000

a. Medición de niveles de iluminación. Según la INHT para medir los niveles de iluminancia se hace uso de un equipo que se llama luxómetro. Este tiene una célula fotoeléctrica con capa barrera basada en el efecto fotoeléctrico, *i.e.* cuando incide un rayo de luz sobre la célula los electrones son

capaces de producir una señal eléctrica. Dicha señal es proporcional al nivel de iluminación. Las mediciones deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Se realizará a la altura del plano de trabajo.
- Separar la fotocélula lo más posible para evitar sombras producidas por el medidor.
- Es recomendable esperar que el luxómetro se estabilice.
- Es conveniente mantener la temperatura a 25° C, pues es sensible a la temperatura.

V. METODOLOGÍA

A. MATERIALES

- 6 LED-3P-D-White de WAYJUN TECHNOLOGY
- 1 Fotodiodo de Silicio DET10A
- 3 Amplificador operacional doble de baja potencia LM358
- 1 USB UART click
- 1 Raspberry Pi 1 modelo B
- 1 Computadora portátil con Python instalado
- 1 luxómetro digital LX1010B

B. LED UTILIZADO

Para el LED transmisor utilizado se tomaron en cuenta tres características, la potencia, la velocidad de conmutación y el color de la luz producida. Siendo este un proyecto de comunicación por luz visible se deseaba que el LED pudiera no solo transmitir información, sino que al mismo tiempo iluminara un área. Por lo tanto se escogió la luz blanca la cual está compuesta por todas las longitudes de onda del espectro visible. En cuanto a la velocidad de conmutación se requería que el LED pudiera conmutar a una velocidad mayor a 10,000 veces por segundo, *i.e.* 10 KHz. Por último para poder alcanzar una distancia larga entre el transmisor y el receptor se necesitaba que el LED fuera de alta potencia, por lo menos de 1 W.

El LED utilizado fue el LED-3P-D-White de WAYJUN TECHNOLOGY. Este LED cumple con todas las características antes mencionadas. La luz que emite es de color blanco, su velocidad de conmutación es superior a los 10KHz y además es de 3 Watts. La hoja de datos de este LED se puede observar en el Anexo A.

C. FOTODIODO UTILIZADO

Se buscó un fotodiodo en base al rango de longitud de onda y el tiempo de respuesta. Ya que este proyecto es de transmisión de datos por luz visible se necesitaba un fotodiodo que pudiera actuar en el rango de 400 a 700 nm de longitud de onda. Además de la longitud de onda, era necesario un fotodiodo que tuviera un tiempo de respuesta rápido, en el orden de los microsegundos.

Luego de realizar la búsqueda se encontró un fotodiodo que cumplía con los requerimientos, se utilizó el fotodiodo DET10A de THORLABS. Este es un fotodiodo de silicio polarizado por una batería de 12 V, detecta señales de luz entre un rango de 200 a 1100 nm y el tiempo de respuesta es de un 1 ns. La hoja de datos de este dispositivo se encuentra en el Anexo B.

D. DESARROLLO DE SOFTWARE EN EL TRANSMISOR Y EL RECEPTOR

Se decidió utilizar la comunicación serial con el protocolo RS-232 ya que este protocolo utiliza la modulación digital de amplitud (OOK). Aunque es un protocolo de comunicación con velocidades bajas este es perfecto para evaluar la susceptibilidad del sistema VLC con respecto a la luz solar. Para implementar este protocolo se decidió utilizar el lenguaje de programación Python. Este contiene la biblioteca PySerial la cual esta compuesta de varias funciones y métodos para utilizar el protocolo RS-232. A continuación se enlistan las funciones y métodos utilizados.

- `__init__(puerto, baudrate, bitesize, parity, stopbits, timeout)`
- `inWaiting()`
- `read()`
- `write()`
- `close()`

En el lado del transmisor se utilizó una Raspberry Pi 1 Modelo B y en el lado del receptor se utilizó una computadora portátil. Se utilizó una Raspberry Pi debido a que este es un dispositivo muy útil en aplicaciones electrónicas y además al instalarle el sistema operativo Raspbian se puede utilizar los pines de entrada y salida, y tiene instalado el lenguaje de programación Python. En la computadora portátil fue necesario instalar Python y adquirir un convertidor USB UART click de Mikroelectronica, para poder convertir una señal del protocolo RS-232 a una señal del protocolo USB y viceversa. Asimismo fue necesario instalar PySerial en ambos dispositivos, Raspberry Pi y la computadora portátil. Para instalar esta biblioteca se ingresó el siguiente comando en la terminal de ambos dispositivos:

- `Python -m pip install pyserial`

En el transmisor se utilizó un archivo de texto de 73.2 KB para enviar cada carácter contenido en el archivo al receptor. Para poder comprobar que todos los bits de cada carácter hayan llegado sin ningún error y calcular la tasa de error binario, se tenía almacenado el mismo archivo en el lado del receptor. Al momento de que la transferencia de todo el archivo se completaba, entonces se comprobaba bit por bit de cada carácter comparando el archivo que llegó con el que ya se encontraba en el receptor. El código del transmisor y receptor se puede observar en el Anexo D.

E. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA VLC

Al momento de construir este sistema de transmisión por luz visible se decidió que entre el transmisor y receptor hubiera una distancia de 50 centímetros, esto con el motivo de simular una lámpara de escritorio.

Se construyó un sistema VLC en modo simplex. En el transmisor se colocaron seis LED de los seleccionados anteriormente, la razón por la cual se colocaron seis LED es para que estos a su máxima potencia pudieran iluminar un área a una intensidad lumínica de 2000 lx, lo cual se midió experimentalmente con la ayuda de un luxómetro. En el receptor se utilizó el fotodiodo DET10A en modo fotoconductor para lograr un tiempo de respuesta más rápido. En la salida del sensor es necesario utilizar una resistencia de carga para convertir la corriente de salida a voltaje. Según el manual de dicho sensor con la Ecuación 3 y la Ecuación 4 se puede calcular el ancho de banda y el tiempo de subida en función de la resistencia de carga. Siendo f_{BW} el ancho de banda, R_{carga} la resistencia de carga, t_r el tiempo de respuesta y C_j la capacitancia de unión, la cual tiene un valor de 6 pF.

Ecuación 3

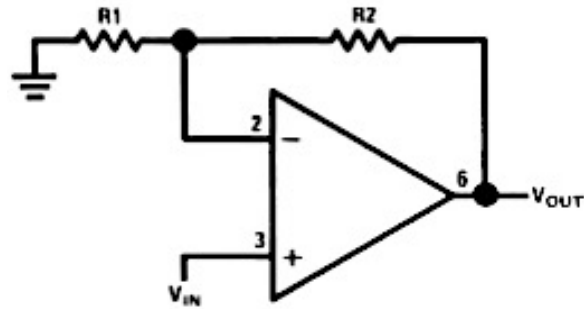
$$f_{BW} = \frac{1}{2\pi R_{carga} C_j}$$

Ecuación 4

$$t_r = \frac{0.35}{f_{BW}}$$

Luego se conectaron los LED al pin Tx de la Raspberri Pi y se conectó el osciloscopio a la resistencia de carga del sensor para poder observar la señal que llegaba al receptor. Esto con el motivo de analizar la amplitud de la señal y decidir la magnitud de amplificación para luego poder procesar dicha señal. Esta señal se amplificó para que estuviera entre 0 y 1 V, implementando el amplificador operacional no inversor (ver Figura 12) y utilizando amplificadores operacionales LM358. Se utilizó este tipo de amplificadores ya que eran lo suficientemente rápidos y además no necesitan dos voltajes para ser alimentados. El voltaje de salida V_{OUT} esta dado por la Ecuación 5.

Figura 12. Amplificador operacional no inversor.

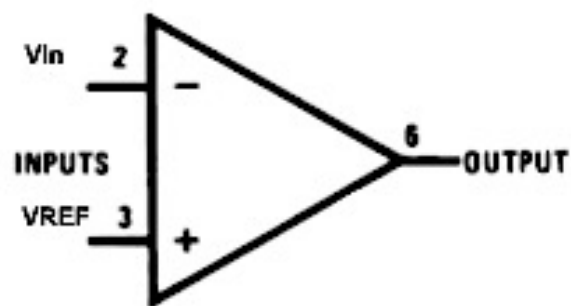


Ecuación 5

$$V_{OUT} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{IN}$$

Al finalizar la etapa de amplificación se colocó un comparador de voltaje, ver Figura 13, para obtener una señal cuadrada y de 5 V. De igual manera se utilizó el amplificador operacional LM358 por lo que el voltaje de salida V_{OUT} esta dado por la Ecuación 6. Una vez finalizada la etapa de comparación se conectó la señal de salida a el pin Rx del USB UART click, el cual estaba conectado a la computadora portátil. En la Figura 14 se puede apreciar de una mejor manera todo el proceso de comunicación. Finalmente se prosiguió a experimentar la velocidad del sistema VLC con el motivo de comprobar la velocidad más rápida que se puede alcanzar. Se empezó con una transmisión de 9.6 Kbps hasta 115.2 Kbps.

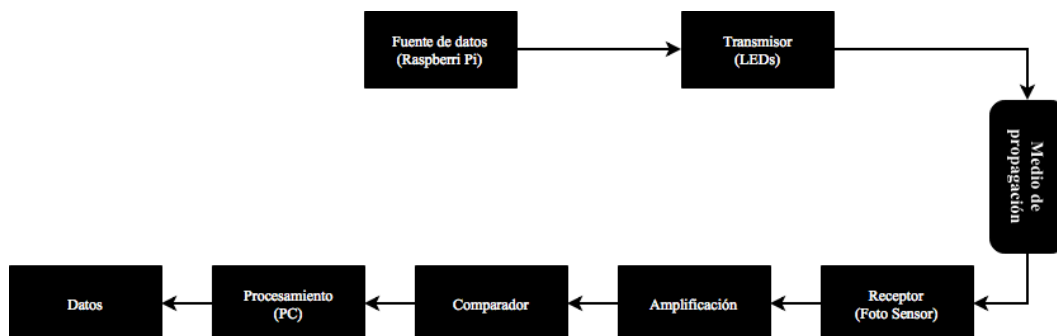
Figura 13. Comparador de voltaje.



Ecuación 6

$$V_{OUT} = \begin{cases} V_{CC} & , V_{IN} > V_{REF} \\ 0 & , V_{IN} < V_{REF} \end{cases}$$

Figura 14. Diagrama de bloques de todo el sistema de comunicación por luz visible.



F. EJECUCIÓN DE PRUEBAS

Las pruebas de susceptibilidad consistieron en someter el sistema de comunicación por luz visible a un área en donde la luz del Sol llegara sin ningún problema, por ejemplo un cuarto con una ventana. Dichas pruebas se realizaron en un cuarto como se puede observar en la Figura 15.

Figura 15. Lugar en donde se realizaron las pruebas.



Anteriormente se mencionó que se estaría utilizando un archivo de 73.2 KB para transmitir. Cada prueba consistía en medir con un luxómetro (ver hoja de datos en Anexo C) la intensidad de la luz del Sol, seguidamente de transmitir la información contenida en el archivo hacia el receptor. Cuando todo el archivo se terminaba de transmitir se realizaba el cálculo de cuantos bits habían llegado erróneos con respecto del total, para luego calcular la tasa de error binario. Éste procedimiento se realizó cincuenta veces para obtener una cantidad de muestras razonable. Se repitió todo el proceso con diferentes intensidades de luz del LED transmisor, 1000, 1500 y 2000 luxes. Por último se vario tres veces la velocidad de transmisión hasta llegar a la velocidad más alta que se pudo alcanzar. En total se obtuvieron 450 muestras. Finalmente se analizaron los resultados y se discutió sobre ellos.

VI. RESULTADOS

A. SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE

Ecuación 7. Resistencia de carga utilizada en la salida del fotodiodo.

$$R_{CARGA} = 50K\Omega$$

Ecuación 8. Ancho de banda del fotodiodo.

$$f_{BW} = \frac{1}{2\pi * 50K\Omega * 6pF} = 530.5KHz$$

Ecuación 9. Tiempo de respuesta del fotodiodo.

$$t_r = \frac{0.35}{f_{BW}} = 0.6598\mu s$$

Figura 16. Transmisión serial, señal enviada color amarillo y señal recibida sin amplificar color azul.

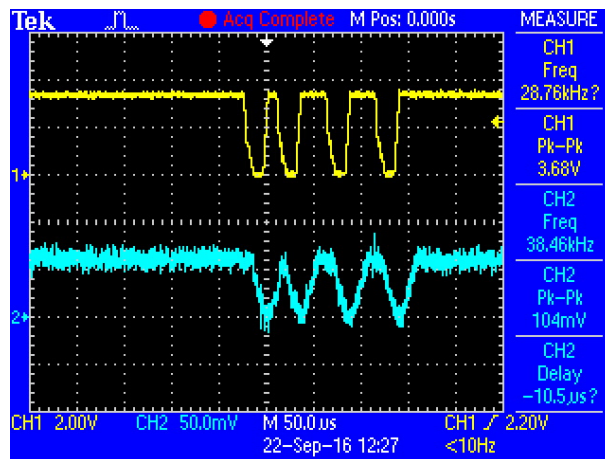


Figura 17. Resistencias utilizadas en el amplificador no inversor.

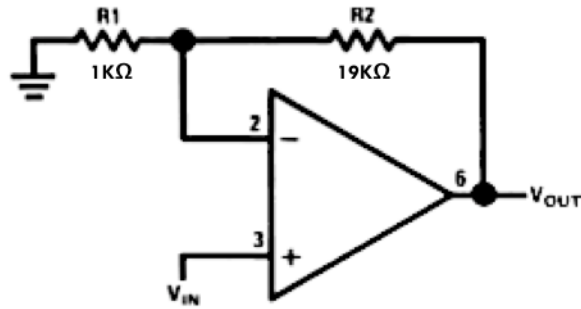


Figura 18. Transmisión serial, señal enviada color amarillo y señal recibida amplificada color azul.

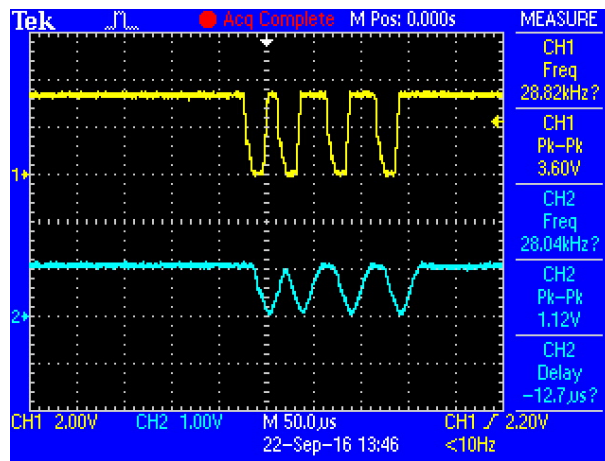


Figura 19. Configuración del comparador de voltaje utilizado.

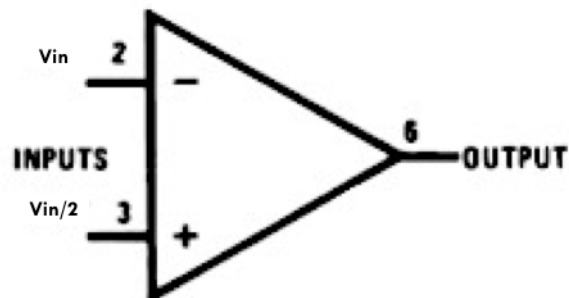


Figura 20. Transmisión serial, señal enviada color amarillo y salida del comparador color azul.

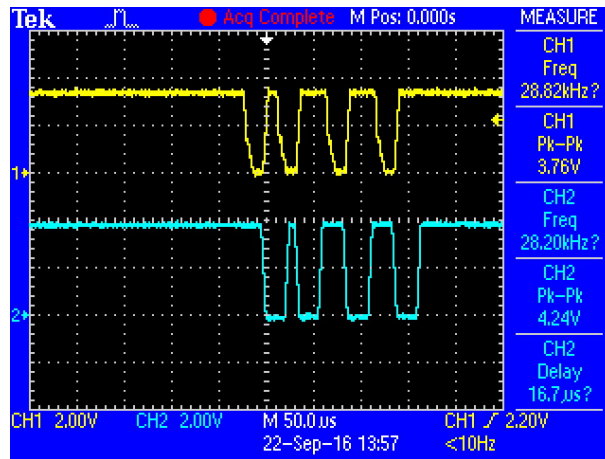
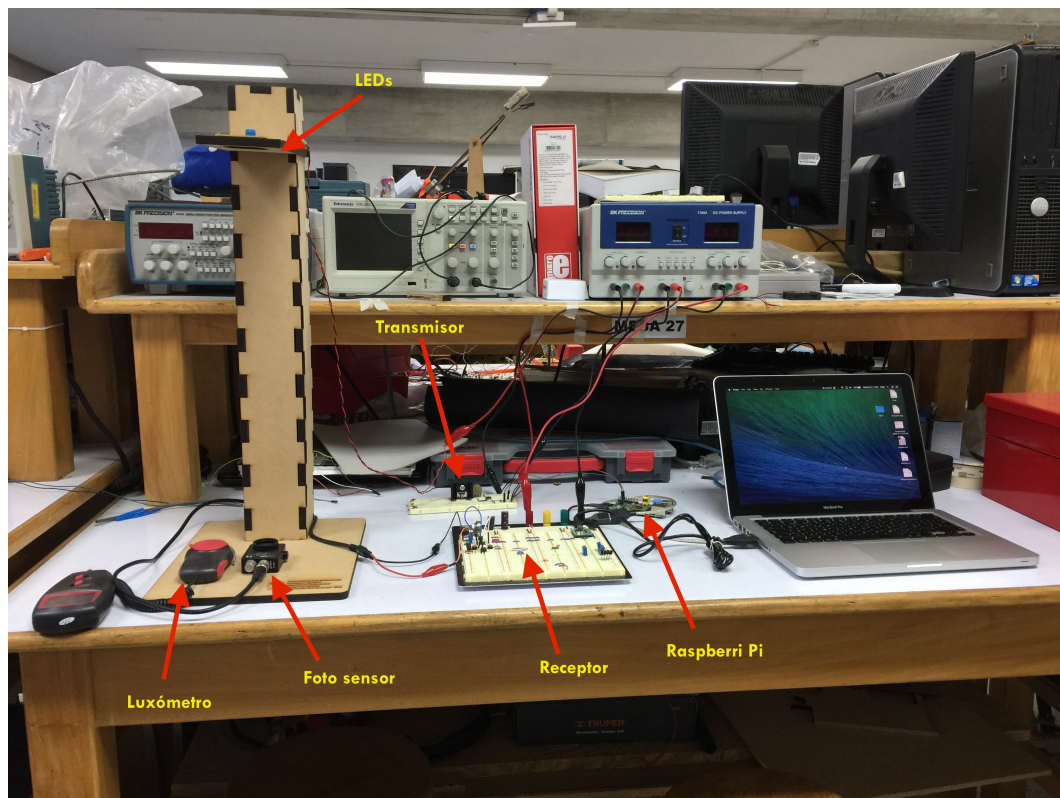


Figura 21. Sistema VLC construido.



Cuadro 5. Velocidades alcanzadas.

Velocidad (Kbps)
19.2
38.4
57.6

B. PRUEBAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Figura 22. Resultados de las pruebas con una tasa de transferencia de 19.2 Kbps.

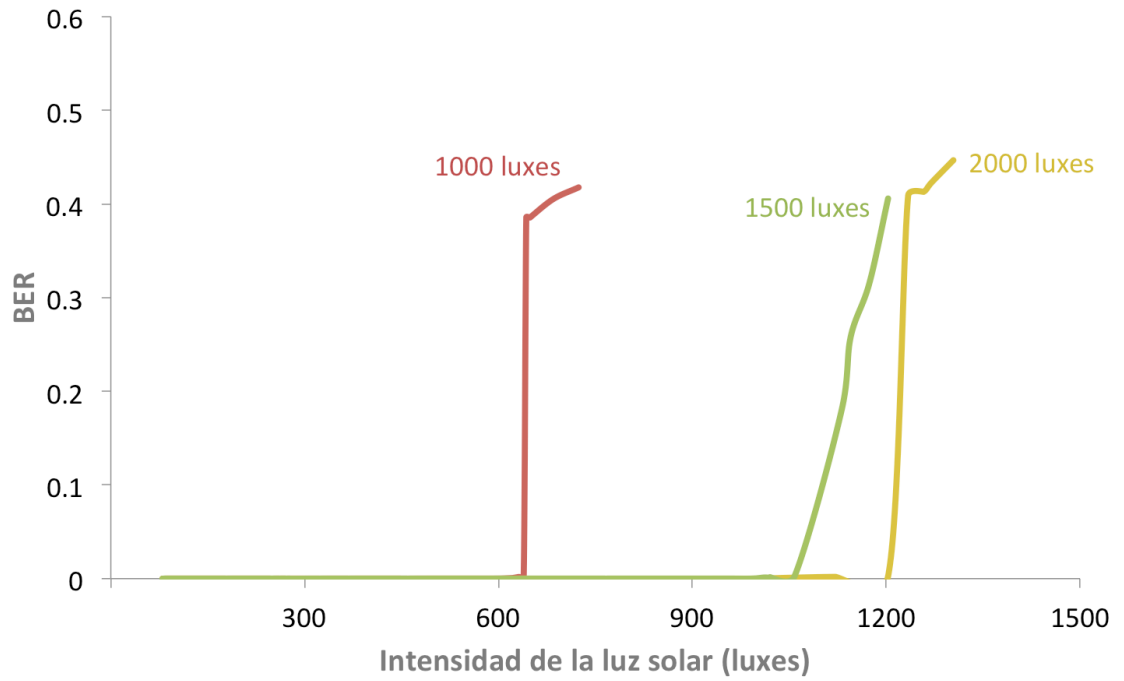


Figura 23. Resultados de las pruebas con una tasa de transferencia de 38.4 Kbps.

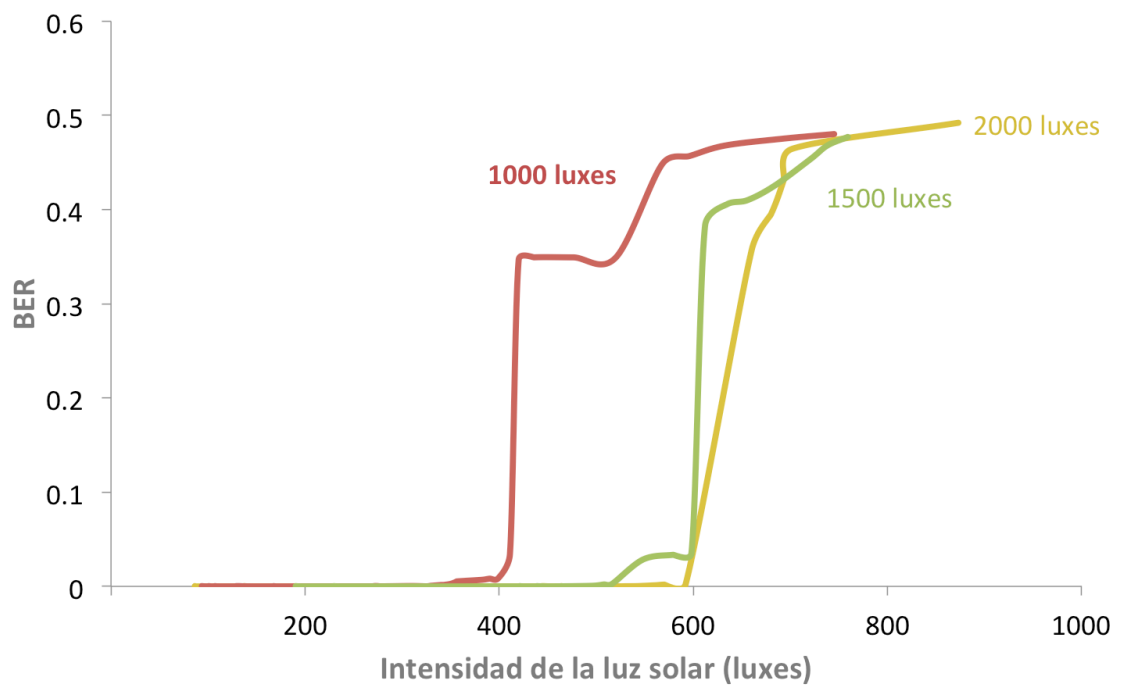


Figura 24. Resultados de las pruebas con una tasa de transferencia de 57.6 Kbps.

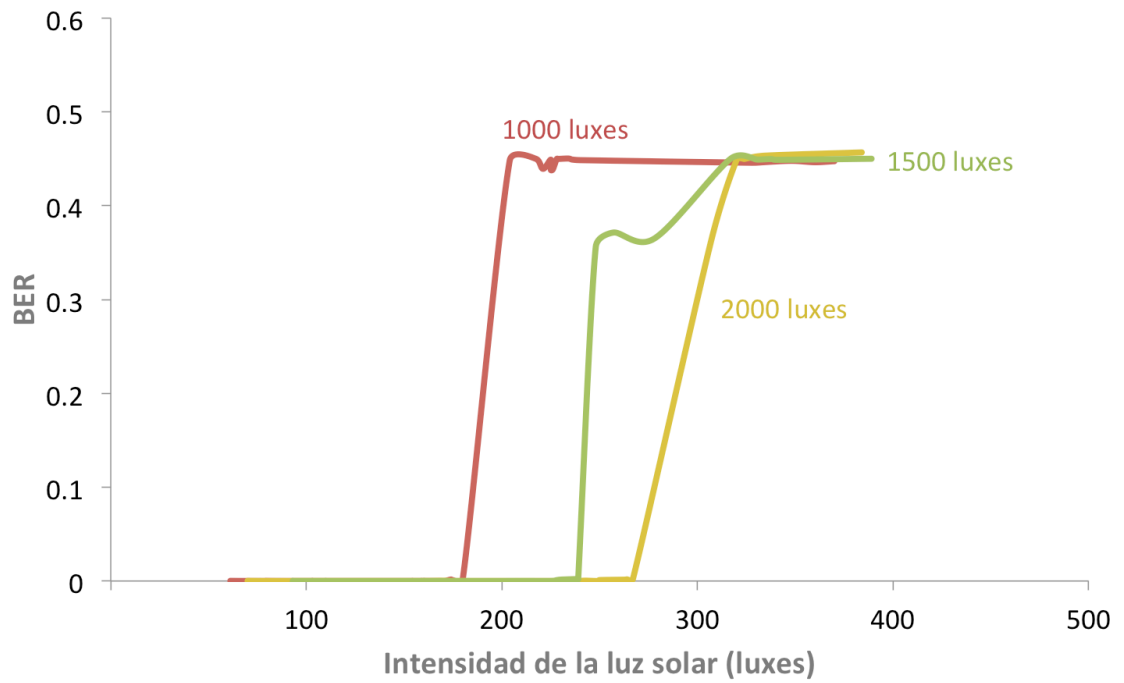


Figura 25. Resultados con tasa de transferencia de 19.2 Kbps, indicando el límite de correcciones.

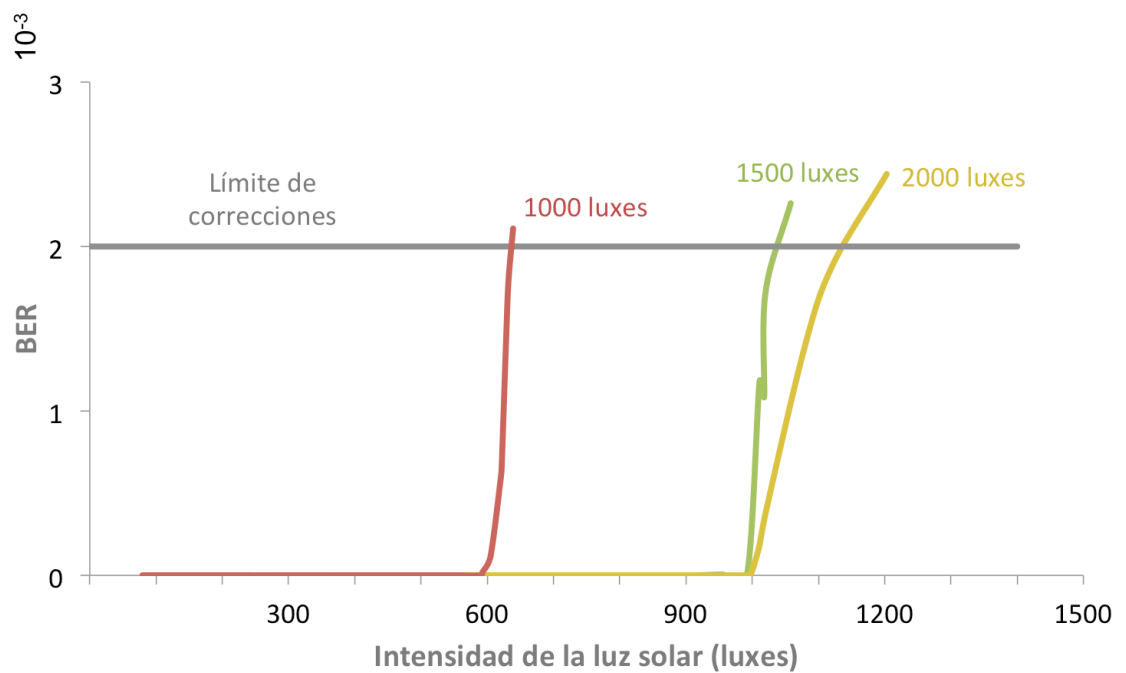


Figura 26. Resultados con tasa de transferencia de 38.4 Kbps, indicando el límite de correcciones.

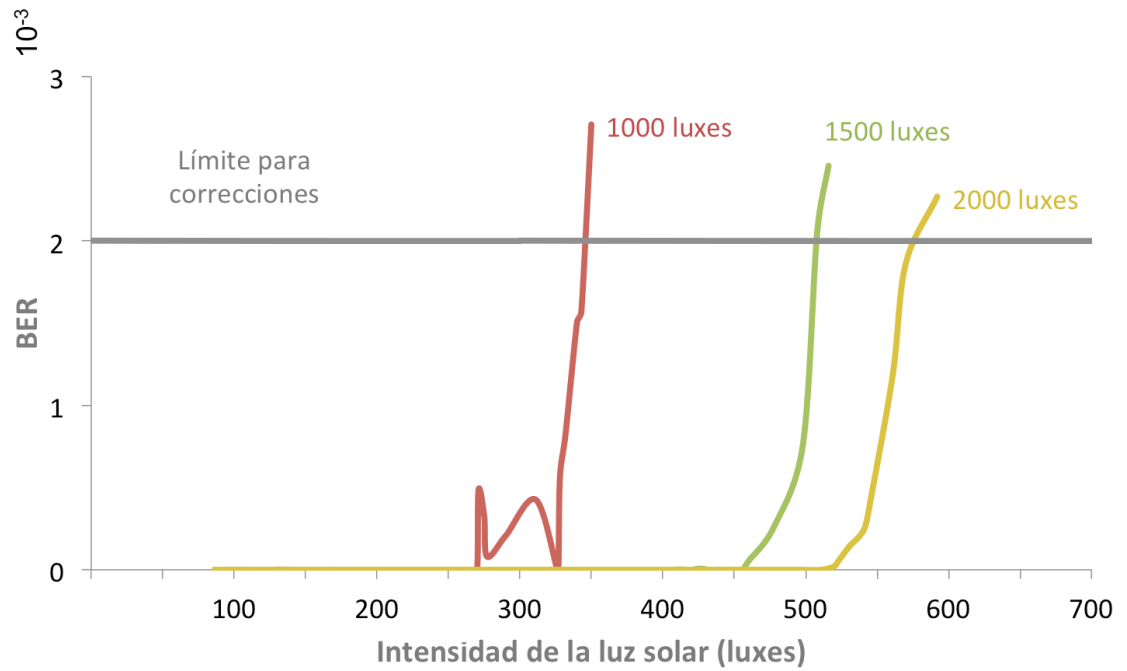


Figura 27. Resultados con tasa de transferencia de 57.6 Kbps, indicando el límite de correcciones.



Cuadro 6. Mejoramiento del sistema conforme se aumenta la intensidad del LED.

Velocidad (Kbps)	Intensidad del LED (luxes)	Intensidad del Sol (luxes)	% de mejora
19.2	1000	639	N/A
	1500	1058	58
	2000	1203	73
38.4	1000	436	N/A
	1500	498	42
	2000	592	63
57.6	1000	180	N/A
	1500	239	32
	2000	267	52

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo general de este trabajo de graduación fue verificar los luxes mínimos necesarios del transmisor de un sistema de comunicación por luz visible, para cumplir con una transmisión de datos con una tasa de error binario constante dado el nivel de iluminación del día. Para cumplir con este objetivo general se planteó un conjunto de objetivos específicos. En base a los objetivos específicos se estructuró el procedimiento a seguir para así obtener los resultados finales de este trabajo de graduación.

La comunicación por luz visible es una tecnología que está en desarrollo por lo que no se contaba con un sistema VLC y fue necesario construirlo. Se cumplió con el primer objetivo específico cuando se terminó la construcción del sistema VLC. En la sección A del capítulo de I se pueden observar los resultados obtenidos de la construcción de dicho sistema de comunicación. La resistencia de carga utilizada fue de $50\text{ K}\Omega$ (Ecuación 7). Aunque el manual del foto sensor especificaba que con una resistencia de carga de $50\ \Omega$ se podía obtener el mayor ancho de banda y por lo tanto un tiempo de respuesta en el orden de los nanosegundos, esto no se pudo alcanzar. Es importante enfatizar que el fotosensor que se utilizó, normalmente se utilizó para comunicación por fibra óptica, por lo que el rayo de luz incide directamente en él y no a una distancia de 50 cm. Por lo que con una resistencia de carga de $50\ \Omega$ a una distancia de 50 cm no se lograba detectar alguna señal con el foto sensor. Asimismo el manual del foto sensor también explicaba que conforme se aumentaba la resistencia de carga, aumentaba la amplitud de voltaje, pero se sacrificaba ancho de banda y tiempo de respuesta. Se experimentó con varios valores en la resistencia de carga hasta que con $50\text{ K}\Omega$ se logró observar una señal con amplitud de 50 mV (ver Figura 16). El ancho de banda y el tiempo de respuesta obtenido con la resistencia se puede ver en la Ecuación 8 y Ecuación 9, respectivamente. Con una amplitud de 50 mV en la señal de la resistencia de carga ya se podía aplicar alguna técnica para amplificar dicha señal, para luego ser procesada.

Para amplificar la señal se utilizó la configuración del amplificador no inversor que muestra la Figura 17, la señal se amplificó para que tuviera una amplitud de 1 V y el resultado obtenido está en la Figura 18. La señal obtenida después de haber sido amplificada no era del todo cuadrada y además era necesario amplificarla a una amplitud de 5 V para poder ser reconocida como una señal serial del protocolo RS-232. Debido a esto se colocó un comparador de voltaje (ver Figura 19), el cual tenía una señal de referencia de la mitad de V_{in} , en donde V_{in} es la amplitud de la señal amplificada. Una vez aplicada la comparación se obtenía una señal como la de la Figura 20. Por último se realizó un barrido de velocidades estándar desde 9600 hasta 115200 de baudrate, los resultados están en el Cuadro 5, la velocidad más alta alcanzada fue de 57600 buadios. Recordando que en este caso 1 baudio es igual a 1 bit/s, debido a la configuración que se utilizó, por lo que se tendría una señal con una tasa de transmisión de 57.6 Kbits/s. De igual manera este valor no se acerca ni a la mitad del ancho de banda del sensor. De igual manera esto se debe a que las fórmulas que el fabricante del foto sensor da en su manual aplican cuando el rayo de luz incide

directamente en el fotodiodo, como lo es con la fibra óptica. El sistema VLC construido se puede observar en la Figura 21.

Una vez finalizado el proceso de construcción del sistema VLC, se prosiguió a realizar las respectivas pruebas de susceptibilidad. Los resultados de las pruebas se encuentran en la sección B del capítulo I. Lo principal que se pudo notar, y era de esperar, es que conforme el nivel de iluminación del Sol aumenta, la tasa de error binario aumenta. Pero al aumentar la intensidad del LED transmisor se logra contrarrestar, hasta cierto punto, los bits erróneos y por ende la tasa de error binario es menor.

En la Figura 22 se puede ver que cuando la intensidad del LED transmisor es de 1000 luxes el BER se vuelve significativo alrededor de los 639 luxes de intensidad de la luz del Sol. Mientras que para las intensidades de 1500 y 2000 luxes del LED el sistema es vulnerable hasta arriba de los 1000 luxes de intensidad del Sol, logrando mejorar el sistema en 58 y 73 por ciento, respectivamente. Al aumentar la velocidad de transmisión a 38.4 Kbps se puede notar que disminuye el nivel de iluminación solar que puede soportar el sistema. En la Figura 23 se observa que con las intensidades más fuertes del LED el sistema se ve afectado cuando el nivel de intensidad del Sol se acerca entre los 498-592 luxes. Con 1000 luxes de intensidad en el LED el sistema soporta menos de 500 luxes. Para esta velocidad de transmisión lo máximo que se logró mejorar el sistema fue un 63 % con respecto a la intensidad más baja del LED (ver Cuadro 6). Si apreciamos la Figura 24 la cual contiene los resultados de las pruebas con velocidad de 57.6 Kbps, se puede notar que el sistema VLC se vuelve todavía más susceptible ante valores pequeños de intensidad del Sol. Al utilizar esta velocidad de transmisión se logra observar que el mínimo nivel que soporta el sistema con la intensidad más baja del LED es aproximadamente 180 luxes. Si se sube la intensidad del LED a 1500 luxes, el sistema soporta hasta antes de los 250 luxes de intensidad solar logrando un 32% de mejora. Con 2000 luxes el sistema soporta hasta poco después de los 260 luxes con 52% de mejora.

Por lo tanto, comparando la Figura 22, la Figura 23 y la Figura 24, se logra apreciar una gran diferencia y una gran similitud. La diferencia es que conforme la velocidad de transmisión aumenta, el sistema es más susceptible. La similitud es que en las tres figuras cuando el sistema se vuelve susceptible a la luz solar, este llega a un BER bastante alto, casi la mitad del total de bits llega erróneo al receptor. Otro efecto que sucedió es que en cualquiera de las tres velocidades, si se seguía sometiendo a un nivel alto de iluminación solar del cual podía soportar cada una de las velocidades, entonces se empezaba a perder bits en la transmisión, *i.e.* estos no llegaban al receptor. Como en cualquier otro sistema de comunicación, si la velocidad aumenta el BER aumenta. En el caso de este sistema de comunicación por luz visible se debe a que el tiempo de respuesta del fotodiodo no es lo suficientemente rápido. Por esta razón al fotodiodo le cuesta detectar cuando hay un cambio de estado en el LED conforme la velocidad aumenta, además de que el ruido producido por los rayos incidentes del Sol de igual manera le afectan.

Si se realiza un análisis más cercano de los resultados de las pruebas se puede notar que el BER no siempre era cero como lo muestran las figuras analizadas anteriormente. En la Figura 25, Figura 26 y Figura 27 se puede hacer un análisis más detallado. En las tres figuras se puede notar que existe una fluctuación en el BER. El motivo de esta fluctuación radica en que la intensidad del Sol variaba en cualquier momento por diferentes razones (*e.g.* una nube empezaba a obstruir la luz del Sol o dejaba de hacerlo). Además a estas figuras se les agregó una línea de color naranja, la cual indica un límite para poder realizar correcciones con algún algoritmo de corrección de errores hacia delante. Según Vučić (2009) el límite para un mecanismo de corrección de errores hacía adelante en comunicaciones ópticas tiene que ser menor o igual a 2×10^{-3} . En este trabajo de graduación no se implementó ningún algoritmo para corrección de errores, pero si se tomó en cuenta el límite de BER que el sistema podía tener para las transmisiones. Al concluir las pruebas y analizarlas se cumplió con todos los objetivos específicos restantes.

Ya que este es un sistema de comunicación por luz visible, se puede notar que la radiación que emite el Sol afecta bastante a las transmisiones de alta velocidad. Observemos la curva espectral del LED (Figura 30) y la del fotodiodo (Figura 33), las cuales se encuentran en el anexo A y B respectivamente. El LED tiene su pico máximo de intensidad luminosa con la longitud de onda de 450 nm, mientras que la explosividad del fotodiodo tiene su pico máximo con la longitud de onda de 750 nm. Esto quiere decir que la intensidad del LED no se está aprovechando al máximo, ya que si el fotodiodo tuviera su pico máximo en la misma longitud de onda que el LED, entonces se habría podido alcanzar BER menor para una mayor intensidad de luz solar.

Según el objetivo general del trabajo de graduación, se tiene que especificar un nivel de iluminación para el LED transmisor del sistema VLC. Esto es complicado ya que como se pudo notar, el BER en un sistema de comunicación por luz visible depende de la velocidad de transmisión y de la intensidad de la luz del Sol. Por esta razón el nivel de iluminación del LED se deja al tipo de aplicación que se desea implementar con éste sistema de comunicación construido. Por lo tanto, si se utiliza una velocidad de transmisión entre 19.2-38.4 Kbits/s, entonces se puede utilizar un nivel de iluminación de 1000 luxes. Al utilizar estas velocidades hay que tomar en cuenta que en el lugar en donde se coloque el sistema VLC no deben incidir rayos de luz del Sol con intensidad superior a 400 luxes. Al utilizar la velocidad de transmisión de 57.6 Kbits/s es recomendable utilizar 2000 luxes o superior de intensidad del LED. No obstante, si la intensidad del LED es superior a 2000 luxes podría provocar en las personas síntomas como fatiga visual, reducción en el rendimiento, incremento en los errores y algunas veces accidentes.

Al finalizar este trabajo se percibió que los sistemas de comunicación por luz visible emplean una tecnología bastante prometedora sobre todo por las velocidades que puede alcanzar. Si bien es cierto que la velocidad de transmisión más alta alcanzada en éste trabajo fue de 57.6 Kbits/s, esto no quiere decir que con técnicas más avanzadas no se pueda superar. Investigadores de esta tecnología han presentado

velocidades en el orden de los Gbps. Otro aspecto por lo que esta tecnología está teniendo auge es por los diferentes ambientes en donde se puede implementar. Existen lugares en donde el Wi-Fi y otro tipo de radiofrecuencia no tienen acceso, por ejemplo plantas de energía, aviones o incluso hospitales debido al riesgo que representa en la seguridad de las personas. Por otra parte, con los resultados de esta investigación se puede observar que aunque la radiación solar afecta a los sistemas VLC, existen formas de mitigar dicha susceptibilidad. Una de las formas es aumentando la intensidad del LED transmisor del sistema VLC y también se podría aplicar técnicas de corrección de errores, algo que no se realizó en este proyecto.

VIII. CONCLUSIONES

El ancho de banda calculado para el sistema, utilizando una resistencia de carga de $50\text{ K}\Omega$, es superior al que realmente soporta el sistema de comunicación. La principal razón es porque el foto sensor es especialmente para transmisiones con fibra óptica, por lo que las fórmulas aplican cuando el rayo de luz incide directamente en el fotodiodo y no a cierta distancia.

Conforme el nivel de iluminación del Sol aumenta la tasa de error binario aumenta. Sin embargo se logró disminuir la tasa de error binario aumentando la intensidad del LED transmisor.

El nivel de iluminación mínimo del LED transmisor para que el sistema cumpla con una tasa de error binario menor a 2×10^{-3} depende de la velocidad de transmisión y la intensidad de la luz del Sol. Pero en general se podría decir que 1500 luxes de intensidad son aceptables.

Con base en la investigación realizada se puede afirmar que la comunicación por luz visible si tiene futuro, sobretodo por que investigadores en esta área han alcanzado velocidades en el orden de los Gbps. Además, lugares como los hospitales, plantas de energía e incluso aviones se podrían ver beneficiados con la implementación de dicha tecnología.

IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones en este tema:

- Aplicar otro protocolo de comunicación y/o modulación para comprobar si se puede alcanzar una velocidad de transmisión más alta. Además de comprobar si esto tiene algún efecto en cuanto a la susceptibilidad del sistema frente a la luz del Sol.
- Formalizar matemáticamente, a través de ecuaciones, el ancho de banda y el tiempo de respuesta del foto sensor en función de la distancia a la que incide el rayo de luz. De manera que se logre calcular el ancho de banda real del sistema de comunicación por luz visible.
- Experimentar con un filtro en el foto sensor el cual permita pasar solo los rayos luminosos del LED transmisor. Esto con el motivo de comprobar si se logra reducir de una mejor manera la tasa de error binario.
- Introducir una etapa de corrección de errores en el receptor con el motivo de verificar si la susceptibilidad del sistema disminuye.
- Implementar un sistema de control para regular la intensidad del LED transmisor con el fin de no estar modificando dicho valor manualmente.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Breed, Gary. 2003. «Bit Error Rate: Fundamental Concepts and Measurement Issues». *High Frequency Electronics*. 46-48.
- Cevik, Taner; S. Yilmaz. 2015. «An Overview of Visible Light Communication Systems». *International Journal of Computer Networks & Communications*. 7 (6): 139-150.
- Frenzel, Louis. 2015. «Types of Electronic Communication». *Principles of Electronic Communication Systems*. 4ª ed. New York: Mc Graw Hill Education. 930 págs.
- Goldsmith, Andrea. 2005. *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press. 605 págs.
- Grobe, Liane, *et al.* 2013. «High-Speed Visible Light Communication Systems». *IEEE Communications Magazine*. 60-66.
- Gujjari, Durgesh. 2012. «Visible Light Communication». Tesis Dalhousie University of Nova Scotia. 77 págs.
- Gupta, Prakash. 2006. «Bit Error Rate (BER)». *Data Communications and Computer Networks*. Nueva Delhi: Prentice-Hall of India. 828 págs.
- Haas, Harald. *Wireless data from every light bulb*.
https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb#t-33122 [2/09/16]
- Haas, Harald, *et al.* 2016. «What is LiFi?». *Journal of Lightwave Technology*. 34 (6): 1533-1544.
- Indian Institute of Technology Kharagpur. *Data Link Control*. <http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Computer%20networks/pdf/M3L2.pdf> [29/08/16]
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). 2015. *Iluminación en el puesto de trabajo*. Madrid. Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. 42 págs.

- Maldonado, Santiago; B. Morales. 2013. «Diseño e implementación de un modulador y demodulador oob para comunicación por luz visible (VLC) utilizando la tarjeta FPGA Cyclone III de Altera». Tesis Universidad Politécnica Salesiana de Quito. 121 págs.
- Morrón, Laura. *Y la luz se hizo – premio nobel de física 2014*. <https://losmundosdebrana.wordpress.com/2014/10/23/y-la-luz-azul-se-hizo-premio-nobel-de-fisica-2014/> [30/08/16].
- National Instruments. *Comunicación serial: conceptos generales*. <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1> [29/08/16]
- Pérez, Guillermo. *Espectro electromagnético*. http://www.espectrometria.com/espectro_electromagnitico [27/08/16]
- Povey, Gordon. *An IEEE Standard for Visible Light Communications*. <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/> [2/09/16]
- Sagotra, Rajan; R. Aggarwal. 2013. «Visible Light Communication». *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 4 (3): 403-405.
- Sedra, Adel; K. Smith. 2004. «Special Diode Types». *Microelectronic Circuits*. 4ª ed. New York: Oxford University Press. 1277 págs.
- Shao, Sihua. *et al. An Indoor Hybrid WiFi-VLC Internet Access System* <http://dx.doi.org/10.1109/mass.2014.76> [5/10/16].
- Vučić, Jelena, *et al.* 2009. *125 Mbit/s over 5 m Wireless Distance by Use of OOK-Modulated Phosphorescent White LEDs*. Vienna.
- Tomasi, Wayne. 2003. «Diodos emisores de luz». *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. 4ª ed. México: Pearson Educación. 976 págs.

Young, Hugh; R. Freedman. 2009. «El espectro electromagnético». *Física universitaria, con física moderna volumen 2*. 12ª ed. México: Pearson Educación. 896 págs.

XI. ANEXOS

A. HOJA DE DATOS DE LED SELECCIONADO

Figura 28. Características y aplicaciones del LED de alta potencia.

3W High Power LED

Features

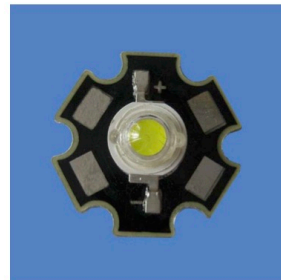
- Highest flux per LED family in the world
- Very long operating life (up to 100k hours)
- Available in Red, Yellow, Green, Blue, White
- Lambertian radiation pattern
- More energy efficient than incandescent and most halogen lamps
- Low voltage DC operated
- Cool beam, safe to the touch
- Fully dimmable
- No UV
- Superior ESD protection
- lower Rth
- RoHS compliant — Lead-free
- Instant light (less than 100ns)



3W Blue LED

Applications

- Portable (flashlight, bicycle)
- Reading lights (car, bus, aircraft)
- Orientation
- Mini-accent
- Decorative
- Fiber optic alternative
- Appliance
- Sign and channel letter
- Architectural detail
- Cove lighting
- Automotive exterior (Stop-Tail-Turn, CHMSL, Mirror side repeat)
- Edge lit signs (Exit, point of sale)



3W White LED & Aluminum PCB

Catalog

1. Red 3W High Power LED	2
2. Yellow 3W High Power LED	4
3. Green 3W High Power LED	7
4. Blue 3W High Power LED	9
5. White 3W High Power LED	12
Package Dimensions (unit:mm)	14

Figura 29. Características eléctricas del LED de alta potencia.

**3W High Power LED****5. White 3W High Power LED**

PART NO	Chip		Lens Color
	Material	Emitted Color	
LED-P3-D-White	InGaN	White □	WATER CLEAR

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25 °C)

Items	Symbol	Absolute Maximum Rating	Unit
Forward Current	IF	0.7	A
Peak Forward Current*	IFP	0.8	A
Reverse Voltage	VR	5	V
Power Dissipation	PD	3	W
Electrostatic discharge	ESD	±4500	V
Operation Temperature	TOPR	-40~+80	°C
Storage Temperature	TSTG	-40~+100	°C
Lead Soldering Temperature*	TSOL	Max. 260 °C for 3sec Max.	

*IFP Conditions: Pulse Width≤10msec duty≤1/10

* Our MCPCB is usual use for installation and connection during application, but the ability of heat dissipation is not enough. If lighted, our high power stars will need better another type heat dissipation equipment. So we recommend the working time is not over 5 -10 seconds without any heat dissipation equipment.

*Reflow, wave peak and soakstannum soldering etc. is not suitable for this products.

*Suggest to solder it by professional high power LED soldering machine.

*Can use in variable temperature searing iron with soldering condition :≤260 degree less than 3 seconds.

Typical Electrical & Optical Characteristics (Ta = 25 °C)

Items	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	VF	IF=0.7A	3.2		4.0	V
Reverse Current	IR	VR=5V			50	uA
50% Power Angle	2θ1/2	IF=0.7A	110		140	deg
Luminous Intensity	φV	IF=0.7A	160		180	lm
Recommend Forward Current	IF			0.7		A
Chromaticity	Tc	IF=0.7A	6000		6500	k
White Color Region			--			
Chromaticity Coordinates		X=--	Y=--			
Thermal Resistance,Junction to Case	RJP	IF=0.35A		10		°C/W

Notes:1.Tolerance of measurement of forward voltage ±0.1V.

2.Tolerance of measurement of peak Wavelength ±2.0nm.

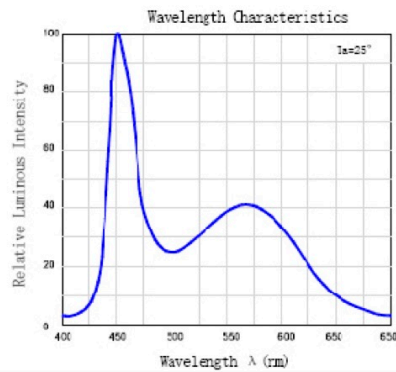
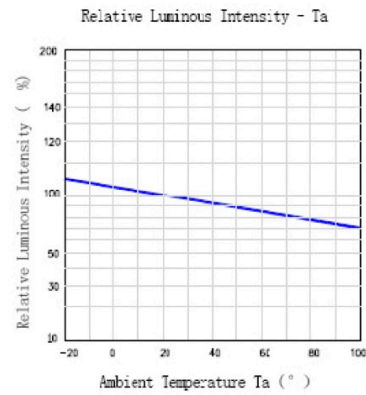
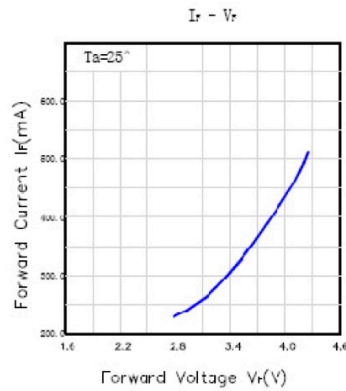
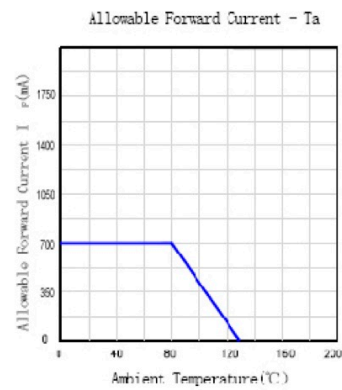
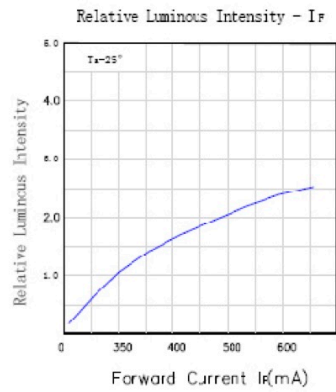
3.Tolerance of measurement of luminous intensity ±15%.

Figura 30. Curvas características del LED de alta potencia.



3W High Power LED

Typical Electrical/Optical Characteristics Curves (Ta=25° Unless Otherwise Noted)



B. HOJA DE DATOS DEL FOTODIODO SELECCIONADO

Figura 31. Fotodiodo DET10A de THORLABS.



Figura 32. Especificaciones técnicas del fotodiodo DET10A.

Si Biased Detector

Chapter 7 Specifications

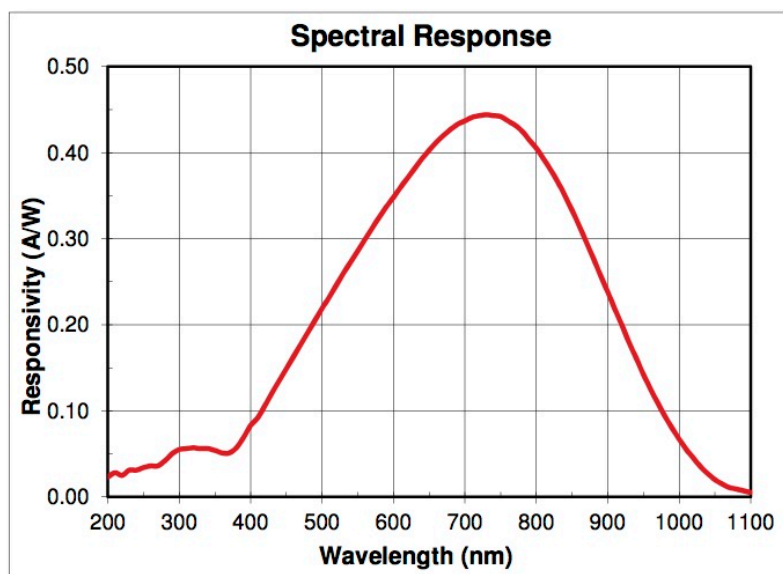
All measurements performed with a 50 Ω load unless stated otherwise.

Electrical Specifications		
Detector		Silicon
Active Area		$\varnothing 1.0$ mm (0.8 mm ²)
Wavelength Range	λ	200 to 1100 nm
Peak Wavelength	λ_p	730 nm (typ)
Peak Response ²	$\mathfrak{R}(\lambda_p)$	0.44 A/W (typ)
Shunt Resistance	R_{sh}	1 G Ω (typ)
Diode Capacitance	C_J	6 pF (typ)
Rise Time ^{2,3}	t_r	1 ns (typ)
NEP (830 nm, 10 V)	W/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.2×10^{-13} (typ)
Photodiode Bias Voltage	V_R	10 V
Dark Current ² (with 1 M Ω Load)	I_D	0.3 nA (Typ) 2.5 nA (Max)
Output Voltage	V_{OUT}	0 to 10 V
General		
On/Off Switch		Slide
Battery Check Switch		Momentary Pushbutton
Output		BNC (DC Coupled)
Package Size		2.8" x 1.9" x 0.83" (70 mm x 48 mm x 21 mm)
PD Surface Depth		0.13" (3.4 mm)
Weight		0.2 kg
Accessories		SM1T1 Coupler SM1RR Retainer Ring
Storage Temp		-20 to 70 $^{\circ}\text{C}$
Operating Temp		10 to 50 $^{\circ}\text{C}$
Battery		A23, 12 V _{DC} , 40 mAh
Low Battery Voltage ⁴		(See Battery Check)
V_{OUT} (Hi-Z)		~9 V
V_{OUT} (50 Ω)		~400 mV

² Measured with specified bias voltage of 10.0 V³ Low battery voltage will result in slower rise times and decreased bandwidth.⁴ Assumes the battery voltage drops below 9.6 V. The reverse protection diode generates a 0.6 V drop.

Figura 33. Respuesta espectral del fotodiodo DET10A.

7.1. Response Curve



C. HOJA DE DATOS DEL LUXÓMETRO LX1010B

Figura 34. Características principales.

OPERATION MANUAL DIGITAL LUX METER

Your purchase of this **DIGITAL LUX METER** marks a step forward for you into the field of precision measurements. Although this **LUX METER** is a complex and delicate instruments, its ruggedness will allow many years of use if proper operating techniques are developed. Please read the following instructions carefully and always keep this manual within easy reach.

Attention: the coiled cable with a **LIGHT SENSOR** allows the user to take measurements at an optimum position, which also comes with a dust cover to keep the frosted light sensor cover from getting dirty or scratched when stored and to help keep calibration accurate.

1. FEATURES

- Precise and easy readout.
- High accuracy in measuring.
- LSI-circuit use provides high reliability and durability.
- Permits a wide range of light measurements.
- **LOW BATTERY** indicator.
- Auto zero adjust.
- LCD display provides low power consumption.
- Compact, light-weight, and excellent operation.
- LCD display can clearly read out even in high ambient light.
- Seperate **LIGHT SENSOR** allows user take measurements at an optimum position.

2. GENERAL SPECIFICATIONS

Display	18mm (0.7") LCD (Liquid Crystal Display).
Ranges	0-50,000 Lux. 3 Ranges.
Over-input	Indication of "1"
Sampling Time	0.4 second.
Operating Temperature	0° to 50° C. (32° -122° F)
Operating Humidity	less than 80% R.H.

Figura 35. Características eléctricas.

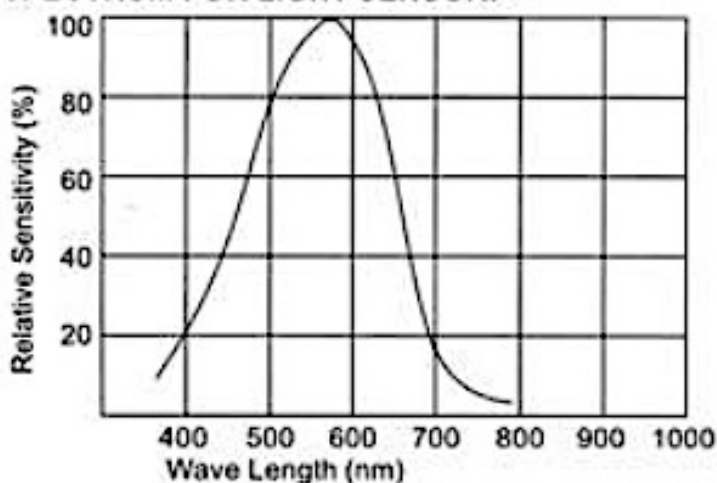
Dimension	118 x 70 x 29mm (4.6 x 2.7 x 1.1 inch).
Weight	200g / including battery.
Power Supply	006P DC9V battery, Consumption current approx. 2 mA.
Standard Accessories	Light Sensor 1 pc. Instruction manual 1 pc.

3. ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Range	Resolution	Accuracy ($23 \pm 5^\circ \text{C}$)
0-2,000 Lux	1 Lux	$\pm (5\%+2d)$
2,000-19,990 Lux	10 Lux	$\pm (5\%+2d)$
20,000-50,000 Lux	100 Lux	$\pm (5\%+2d)$

NOTE Accuracy tested by a standard parallel light tungsten lamp of 2854° K temperature.

4. SPECTRUM FOR LIGHT SENSOR:



5. CORRECTION FACTOR:

Mercury Lamp	x 1.1
Fluorescent Lamp	x 1.0
Incandescent Light	x 1.0
Daylight	x 1.0

Figura 36. Consideraciones para medir.

6. FRONT PANEL DESCRIPTION

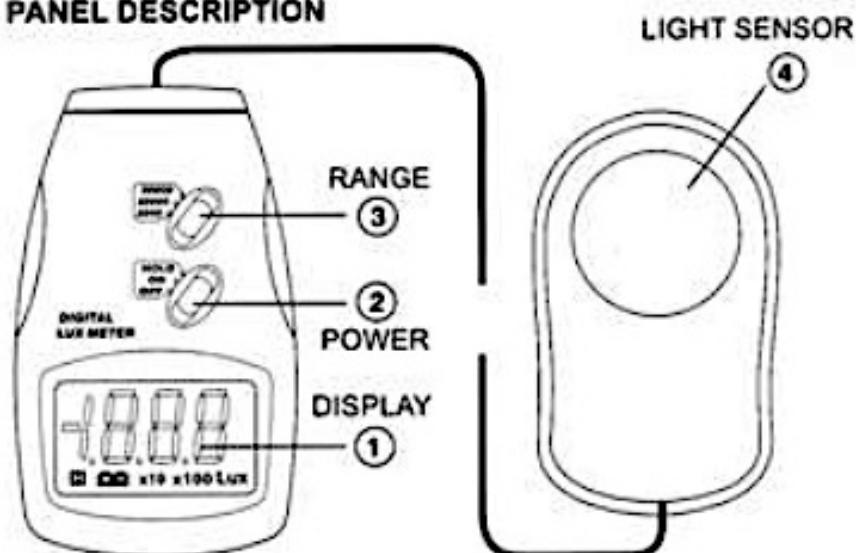


Fig. 1


7. MEASURING CONSIDERATION:

As the DIGITAL LUX METER is a high accurate & sensitive instrument and its PHOTO SENSOR has special feature for the curve on low display reading area. Therefore if display indicates one or more leading zeros, user has to shift Range switch to the next lower range scale to improve resolution and accuracy. For example,

Range	x 1	x 10	x 100
Display Reading	182	018	002

User should select Range Switch to " x 1 " range., and the exact reading values is 182 Lux.

8. REPLACEMENT OF BATTERY

- (1) It is necessary to replace battery, when left corner of LCD display show "  ".
- (2) Slide the battery cover.
- (3) Replace the battery (006P DC 9V).

D. CÓDIGO FUENTE DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS EN EL TRANSMISOR Y RECEPTOR

Figura 37. Código fuente del transmisor.

```
import serial, time

#Parametros de configuracion del protocolo RS232
puerto = '/dev/ttyAMA0'
baudrate = 57600
bitsize = serial.EIGHTBITS
parity = serial.PARITY_NONE
stopbits = serial.STOPBITS_ONE
timeout = None

#Iniciando el puerto
ser = serial.Serial(puerto,baudrate,bitsize,parity,stopbits,timeout)

#Leyendo el archivo a transmitir
libro = open('Alice in wonderland.txt','r')
data = libro.read()
libro.close()

while True:
    message = raw_input(">>Enviar datos? Y/N: ")

    #Se cierra el puerto y se finaliza el programa
    if message == 'N':
        ser.close()
        exit()

    #Se envian los caracteres contenidos en el archivo
    else:
        ser.write(message)
```

Figura 38. Código fuente del receptor, parte 1/3.

```

import serial, binascii,time

##### FUNCION PARA CONVERTIR TEXTO A BITS #####
def text_to_bits(text, encoding='utf-8', errors='surrogatepass'):
    try:
        bits = bin(int(binascii.hexlify(text.encode(encoding, errors)), 16))[2:]
        r = bits.zfill(8 * ((len(bits) + 7) // 8))
    except:
        r = '00000000'
    return r

##### CONFIGURANDO EL PUERTO SERIAL #####
puerto = '/dev/tty.usbserial-AH02QUI0'
baudrate = 57600
bitesize = serial.EIGHTBITS
parity = serial.PARITY_NONE
stopbits = serial.STOPBITS_ONE
timeout = None

ser = serial.Serial(puerto,baudrate,bitesize,parity,stopbits,timeout)
numPrueba = input('Ingrese el numero de prueba: ')

#Variables para contabilizar errores
totalbits = 0
Ebits = 0
faltanbits = 0

#Leyendo el archivo
#Este archivo es el mismo que se esta recibiendo y se utiliza para comprobar que
#si los bits llegaron correctos
libro = open('Alice in wonderland.txt','r')
data = libro.read()
libro.close()

#Varibles para ir comparando bits
out = ''
texto = ''
cont = 0

intSol = raw_input('\nIngrese la intensidad del Sol en Luxes: ')
a = time.time()

while True:
    b = time.time()
    if b-a >= 40:
        cont = 73200

```

Figura 39. Código fuente del receptor, parte 2/3.

```

#Leyendo el puerto serial
out = ''
while ser.inWaiting() > 0:
    out += ser.read(1)
    cont += 1
#Uniando todos los caracteres que llegan
if out != '':
    texto += out

#Una vez que han llegado todos los caracteres o se cumplio el tiempo de espera.
if cont == 73200 and texto != '':
    if len(data) != len(texto):
        faltanbits = (len(data)-len(texto))*8
        final = len(texto)
        if faltanbits > 0:
            print 'No llegaron todos los bits, faltaron: ', faltanbits, ' bits'
        final = len(texto)
    else:
        final = len(texto)
#Comparando bit por bit de cada caracter.
for x in range(0,final):
    recib = text_to_bits(texto[x])
    origi = text_to_bits(data[x])
    lenreciv = len(reciv)
    lenorigi = len(origi)

    if lenreciv <= lenorigi:
        for i in range(0,lenreciv):
            if recib[i] == origi[i]:
                totalbits += 1
            else:
                totalbits += 1
                Ebits += 1

#Abriendo archivo de texto para exportar los resultados
Resultados = open('Resultados.txt','a')
BER = float(Ebits)/totalbits

Resultados.write(str(numPrueba)+'\t')
Resultados.write(str(intSol)+'\t')
Resultados.write(str(totalbits)+'\t')
Resultados.write(str(Ebits)+'\t')
Resultados.write(str(BER)+'\n')
Resultados.close()

```

Figura 40. Código fuente del receptor, parte 3/3.

```
print 'Prueba No.: ', numPrueba
if BER <= 2E-3:
    print 'Errores se pueden recuperar con FEC'
else:
    print 'Errores no se pueden recuperar'
numPrueba += 1
totalbits = 0
Ebits = 0
texto = ''
cont = 0
intSol = raw_input('\nIngrese la intensidad del Sol en Luxes: ')
a = time.time()
if intSol == '0':
    ser.close()
    exit()
```