

Universidad Del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Implementación y evaluación de un sistema
VLC (Visible Light Communication) en un
ambiente controlado

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
José Sebastián Rodríguez Velásquez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,
2017

Implementación y evaluación de un sistema
VLC (Visible Light Communication) en un
ambiente controlado

Universidad Del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Implementación y evaluación de un sistema


VLC (Visible Light Communication) en un

ambiente controlado

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
José Sebastián Rodríguez Velásquez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

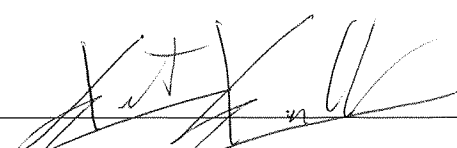
Guatemala,
2017

Vo.Bo. :

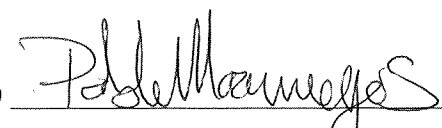
(f)  _____

Ing. Pablo Daniel Mazariegos de la Cerca


Tribunal Examinador:

(f)  _____

Ing. Kurt Emmanuel Kellner Juarez

(f)  _____

Ing. Pablo Daniel Mazariegos de la Cerca

(f)  _____

MSc. Carlos Alberto Esquit Hernández

Fecha de Aprobación Guatemala 14 de Junio de 2017

Contenido

Lista de ecuaciones.....	VIII
Lista de cuadros.....	VIII
Lista de figuras	IX
Resumen	X
I. Introducción	1
II. Objetivos	2
A. Generales.....	2
B. Específicos	2
III. Justificación	3
IV. Marco teórico.....	4
A. Historia e inicio de esta nueva tecnología.....	4
B. Comunicación VLC	5
C. Fotoemisor y Fotodiodo	6
D. Relé de estado sólido	8
E. Programador Arduino como transmisor y receptor	9
D. Processing.....	10
E. Tasas de transferencia de bits.....	11
F. Tasa de error binario	12
V. Metodología	13
A. Componentes utilizados en el sistema de VLC	13
B. Relé de estado sólido utilizado.....	14
C. LED utilizados.....	15
D. Fotodiodo utilizado	16
E. Fases de VLC	17
F. Sistema VLC implementado.....	19
G. Circuitos utilizados	20
1. Amplificador no inversor.....	20
2. Comparador no inversor.....	20
3. Circuito de transimpedancia.....	21
VI. Resultados.....	22
A.Sistema VLC	22
1. LED	22
2. Fotodiodo.....	23
3. Sistema de amplificación y comparación.....	23
4. Comparación de datos enviados por nuestro emisor vs los recibidos por nuestro receptor	24
VII. Análisis de resultados.....	29

VIII. Conclusiones	32
IX. Recomendaciones	33
X. Bibliografía	34
XI. Anexos	36
A. Fichas técnicas de los diodo emisores de luz utilizados.....	36
4.....	36
1. Bombillo LED E27 10 Watt	36
2. Reflector LED Sylvania par 80	36
5.....	37
3. Bombillo LED dimerizable PAR30 14 Watt.....	37
4. Led Ojo de Buey 18 Watt	37
B. Datasheet del fotodiodo S5972	38
C. Datasheet del fotodiodo S8265	40
D. Luxómetro utilizado	41

Lista de ecuaciones

Ecuación 1 TEB en comunicación óptica.....	12
Ecuación 2 Relación voltaje de salida con voltaje de entrada y resistencias.....	20
Ecuación 3 Relación de voltajes de entrada y referencia.....	20
Ecuación 4 Resistencia de carga utilizada.....	23
Ecuación 5 Tiempo de subida (rise time) del fotodiodo.....	23
Ecuación 6 Ancho de banda (bandwidth) del fotodiodo.....	23

Lista de cuadros

Cuadro No. 1 Tasas de error binario aceptables según aplicación.....	12
Cuadro No. 2 Componentes electrónicos utilizados en el sistema VLC.....	13
Cuadro No. 3 Materiales utilizados en el sistema VLC.....	14
Cuadro No. 4 Bombillos LED utilizados en el sistema VLC.....	15
Cuadro No. 5 Bombillo Dimerizable utilizado en el sistema VLC.....	15
Cuadro No. 6 Reflector LED utilizado en el sistema VLC.....	15
Cuadro No. 7 Ojo de buey LED utilizado en el sistema VLC.....	16
Cuadro No. 8 Lumens proporcionados en distancia según potencia – Bombillo LED.....	22
Cuadro No. 9 Lumens proporcionados en distancia según potencia - Reflector LED.....	22
Cuadro No. 10 Lumens proporcionados en distancia según potencia - LED Ojo de buey...	22
Cuadro No. 11 Lumens proporcionados en distancia según potencia - Bombillo dimerizable.....	22
Cuadro No. 12 Pruebas del sistema VLC – Bombillo LED.....	25
Cuadro No. 13 Tasa de error binario – Bombillo LED.....	25
Cuadro No. 14 Pruebas totales de tasa de transmisión y distancias con bombillo LED.....	26
Cuadro No. 15 Muestras del sistema VLC – Bombillo LED dimerizable.....	26
Cuadro No. 16 Pruebas de error binario – Bombillo LED dimerizable.....	27
Cuadro No. 17 Pruebas totales de tasa de transmisión y distancias con bombillo dimerizable LED.....	27
Cuadro No. 18 Tasas de error binario según tasa de transmisión - Bombillo dimerizable...	28

Lista de figuras

Figura No. 1 Espectro electromagnético.....	4
Figura No. 2 Diagrama de la secuencia en sistema VLC	5
Figura No. 3 Distribución del espectro electromagnético en tecnología LED	6
Figura No. 4 Partes principales del bombillo LED.....	6
Figura No. 5 Fotodiodo de silicio	7
Figura No. 6 Relé de estado sólido utilizado en el sistema VLC y diagrama de conexión	8
Figura No. 7 Programador Arduino MEGA	9
Figura No. 8 Unidades de información digital.....	11
Figura No. 9 Representación de la tasa de error binario.....	12
Figura No. 10 Sistema VLC implementada lámpara LED en una oficina.....	13
Figura No. 11 Especificaciones eléctricas del fotodiodo S8265.....	16
Figura No. 12 Especificaciones eléctricas del fotodiodo S5972.....	17
Figura No. 13 Sistema VLC construido.....	19
Figura No. 14 Amplificador no inversor.....	20
Figura No. 15 Comparador no inversor	21
Figura No. 16 Circuito de transimpedancia	21
Figura No. 17 Resistencias utilizadas en el amplificador no inversor.....	23
Figura No. 18 Esquemático completo.....	24
Figura No. 19 Señal de salida proveniente del LED.....	24
Figura No. 20 Señal única enviada por el emisor y recibida por el fotodiodo	24
Figura No. 21 Ficha técnica del bombillo LED.....	36
Figura No. 22 Fotodiodo S5972	38
Figura No. 23 Hoja de datos del foto diodo S5972.....	38
Figura No. 24 Respuesta espectral del fotodiodo S5972	39
Figura No. 25 Fotodiodo S8265	40
Figura No. 26 Respuesta espectral del fotodiodo S5972	40
Figura No. 27 Luxómetro medidor de luminosidad TPM-HER-410.....	41
Figura No. 28 Características TPM-HER-410.....	41

Resumen

Este trabajo final de graduación tiene como finalidad elaborar un sistema de comunicación el cual establezca una transmisión de datos por medio del sistema “visible light communication” o sus siglas VLC. Así mismo se tiene previsto presentar una implementación del sistema VLC en un ambiente controlado variando la potencia de entrada con el fin de evaluar las diferentes tasas de transferencia y error binario que conlleva esta variación.

Parte de elaborar este sistema de comunicación en un ambiente controlado es obtener información referente a la tasa de error binario y distancias máximas alcanzadas por medio de el diodo emisor de luz (por sus siglas en ingles LED). Para obtener estas muestras se construyo una iluminaria que permitiese recrear las condiciones en las que se encuentra una oficina o una habitación de dimensiones estándar sin la presencia de luz solar. Posterior a lo anteriormente mencionado se utilizó LED como un emisor y un fotodiodo con un circuito de amplificación y comparación como el receptor.

La selección del fotodiodo se realizó de acuerdo a sus características físicas, las cuales permiten obtener los estados de encendido o apagado en altas velocidades del emisor. Los luxes mínimos necesarios para lograr la transmisión de datos fue obtenida de manera experimental y se calculó una tasa de error binario en relación a la cantidad total de bits enviados y bits perdidos en la transferencia de datos.

Se utilizaron diversas potencias de suministro en el LED con el fin de analizar y evaluar los resultados y si es o no recomendable utilizar uno respecto del otro. Parte de los resultados indican que existe una mejora en relación a la cantidad de lúmenes que el LED proporciona y la potencia que estos consumen. Se evalúa finalmente las probabilidades de implementación que tiene este sistema en la actualidad y las limitantes encontradas a lo largo de este trabajo.

La tasa de transmisión de bits máxima que se logró implementar en este trabajo es de 250 Kbits/s con una potencia de 14 Watt en una distancia de 50 centímetros. La tasa de error binaria que se obtuvo en el caso anterior es de aproximadamente el 14% . La distancia de transmisión máxima alcanzada fue de 150 centímetros con una potencia de 14 Watt en distintas tasas de transmisión, con distintas tasas de error binario. Por último se implementaron 9 diferentes tasas de transmisión de bits con una tasa de error binario mínima de aproximadamente 4% en una distancia de 50 cm.

I. Introducción

Una de las principales fuentes de iluminación en la actualidad utilizadas a lo largo de diversas aplicaciones es el diodo emisor de luz o por sus siglas en ingles LED. El LED a revolucionado la forma en que podemos crear ambientes iluminados gracias a su bajo costo y cambios rápidos de estado entre encendido o apagado. Es por ello que este componente es utilizado en un sistema de comunicación óptica relativamente nuevo denominado comunicación por medio de luz visible o por sus siglas en ingles VLC.

En este trabajo se darán a conocer las fases de dicho sistema de comunicación y cuales son los componentes que se utilizaron para la implementación de este. Más adelante se da una breve explicación de los componentes utilizados en la fabricación del sistema y el comportamiento de cada uno de estos con el fin de dar entendimiento al lector el funcionamiento de los mismos. De igual manera se hablará de las características principales de un sistema VLC utilizado en la actualidad y la manera en que abordamos la construcción de este sistema para implementarlo en este trabajo.

Se utilizó una comunicación simple en la cual la transmisión es hacia un solo lado del sistema, es decir, el receptor únicamente interpreta la señal proveniente del emisor. Parte de este trabajo requiere cumplir una serie de objetivos diversos con el fin de obtener información valiosa y una vez implementados pueda evaluarse la versatilidad y confiabilidad que este sistema de comunicación representa. Así mismo se elaboró este sistema con el fin de establecer una comunicación en tiempo real hacia un computador el cual despliegue la data transmitida.

Los resultados finales obtenidos en este sistema VLC indican que existe una comunicación con una distancia de 100 centímetros de separación entre el emisor y receptor. Sin embargo, la máxima alcanzada fue de 150 centímetros, aunque en este caso la tasa de error binaria es muy elevada. Se creo una comparación de la cantidad de lúmenes que logra proporcionar cada LED en relación a la potencia que este exige. Se realizó un breve análisis relacionando con la distancia a la cual se transmite, la velocidad de transmisión de información y como ambos afectan a la tasa de error binario.

II. Objetivos

A. Generales

Implementar un sistema VLC en un ambiente controlado para la transmisión y recepción de datos.

B. Específicos

1. Implementar una iluminaria con el sistema VLC para un espacio con dimensiones estándar para una oficina o habitación pequeña, el cual ilumine toda la sección en un ambiente sin luz solar.
2. Permitir la transmisión y recepción de información con VLC hacia un dispositivo electrónico en la iluminaria presentada anteriormente.
3. Implementar la recepción de datos en un dispositivo electrónico ya sea computadora, celular o tablet.
4. Variar la potencia de salida del sistema de iluminación con el fin de obtener las diferentes tasas de error binario y tasas de transmisión.
5. Medir los luxes mínimos necesarios para llevar a cabo transmisiones en tiempo real.
6. Establecer las diferentes tasas de transmisión en el sistema VLC al variar la potencia.
7. Evaluar la viabilidad de implementar este sistema en la actualidad.

III. Justificación

La principal causa de realizar este trabajo de graduación es debido a que el sistema VLC es una tecnología relativamente nueva cuya área de aplicación es inmensa y propone grandes ventajas a los usuarios hoy en día. Como motivos secundarios se tiene que es un trabajo en el cual se pueden aplicar diversos temas que se han visto a lo largo de la carrera por lo que es importante afianzar esos conocimientos con este trabajo.

La tecnología VLC tiene como fin sustituir otros medios de comunicación como lo es el WiFi y las conexiones directas ethernet y demás. Con el fin de establecer este tipo de comunicación es importante esclarecer que el sistema VLC tiene problemas al estar en un ambiente con luz solar y qué hasta el momento es una tecnología en desarrollo. Su uso debe ser únicamente y por el momento en interiores donde no se vea afectado por perturbaciones exteriores.

Desarrollar las bases adecuadamente para implementar este sistema en la actualidad en Guatemala puede considerarse lejos de ser realizable ya que no existen muchos estudios o centros de investigación que impulsen este tipo de tecnología. Es aquí donde este trabajo da un acercamiento de esta tecnología evaluando si es posible o no implementarlo en un ambiente controlado (un hogar de medidas estándar de Guatemala).

Así como se describe anteriormente este sistema VLC tiende a ser más rápido, seguro y barato que las tecnologías de transmisión actuales, sin embargo, parte de elaborar este sistema es identificar si realmente estos puntos son correctos o no, por lo que la elección de materiales y simplicidad del sistema tienen un peso importante en la decisión final que se planteó en los objetivos.

Como ingeniero es importante realizar este trabajo con el fin de dar un desarrollo en este tipo de comunicación el cual tiene la posibilidad de ser implementado con tecnología LED. Hoy en día por motivos de economía y el medio ambiente es una herramienta bastante utilizada en un sin fin de aplicaciones diarias por lo que es esencial explotar las capacidades que esto conlleva al ser implementado en casi cualquier establecimiento ya sea laboral o educativo.

IV. Marco teórico

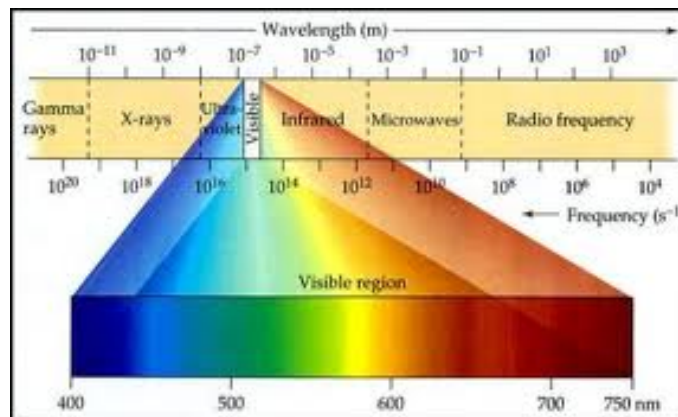
A. Historia e inicio de esta nueva tecnología

El principio de este tipo de tecnología inicia en un el año 1880, se le atribuye a Alexander Graham Bell el invento del fonógrafo (el cual modulaba las ondas de luz con el fin de transmitir señales de audio) y es así como dio inicio un nuevo sistema de comunicación con tecnología con modulación de luz.

Es en la época de los 2000 que su implementación es notoria en diversas ramas de escalas variadas desde juegos infantiles y representaciones más elaboradas de cuartos con VLC en funcionamiento (sin ser comercializado aún en muchas partes del mundo). Es por parte de la rama japonesa que el sistema VLC tendría su auge a partir del 2003 donde se decide que debe estandarizarse y lograr obtener un nuevo sistema en el que cualquier fuente de luz pueda transmitir información, sin embargo se decide utilizar LED por la disponibilidad y el costo que representa utilizar esta fuente de luz.

Su impacto es notorio en el apartado de comunicaciones, sin embargo eso no limita el funcionamiento que esta tecnología puede brindar en otras áreas de igual importancia.

Figura No. 1 Espectro electromagnético



Esta nueva tecnología vendría a sustituir la transmisión de datos por medio de Wi-Fi o una conexión física y proponer modular la luz visible mostrada en el espectro electromagnético de la Figura No.1. Su objetivo principal es lograr transmisión de datos en tiempo real con un espectro de luz que puede modularse y adecuarse según las necesidades que se observan en la industria u hogares.

B. Comunicación VLC

El sistema de comunicación por medio de luz visible es un tipo de comunicación óptica que centra su aplicación en la modulación del espectro electromagnético que los seres humanos pueden percibir. Lo anterior se debe a la facilidad en la actualidad que se tiene de obtener el recurso utilizado en esta comunicación que son los componentes LED (emisor) y fotodiodo (receptor) los cuales más adelante se dará a conocer el análisis realizado para su funcionamiento en el sistema.

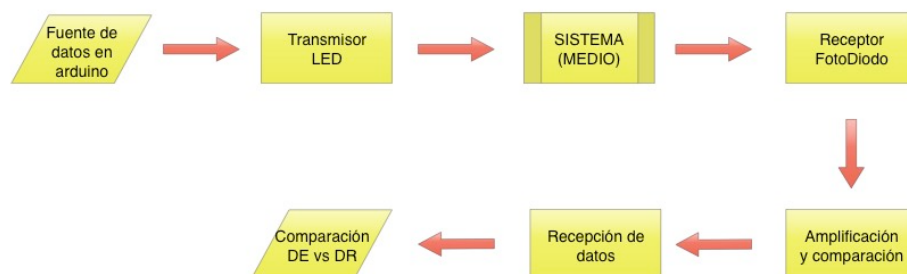
La importancia de este tipo de comunicación se encuentra en la eficiencia en comparación de otras fuentes de iluminación y sus diversas aplicaciones. Varias son las ventajas que ofrece este método de comunicación sobre los métodos convencionales de transmisión de datos, entiéndase WiFi. La velocidad de transmisión bits la cual puede llegar a ser en casos extremos en la medida de Gbps (gigabits por segundo) lo cual es 20 veces más rápido que la fibra óptica considerada la más rápida del mercado en la actualidad.

Uno de los motivos principales por el cual es importante dar un análisis e introducción a esta nueva tecnología es la oportunidad de desarrollarla y obtener mayores distancias de transmisión a las que ya se han obteniendo. Uno de los problemas o desventajas que tiene este tipo de comunicación es el ancho de banda que obtenemos a distancias relativamente extensas. Parte de desarrollar este tipo de tecnología es determinar como el ancho de banda se relaciona directamente con la distancia a la cual está posicionada nuestra bombilla LED.

Disponer de esta tecnología de transmisión de datos es el motivo de sustituir los métodos anteriores de transmisión en ciertos ambientes de trabajo donde no se tendrá perturbaciones de la luz solar. Entiéndase que estos ambientes de trabajo son directamente oficinas, hogares e industrias donde será más versátil y económico utilizar tecnología LED la cual es más segura, barata y rápida.

El esquema final de cómo es la secuencia del sistema VLC se encuentra en la Figura No. 2 donde más adelante se dará detalle del emisor y receptor utilizado, así como también el MCU utilizado para enviar y recibir nuestra información correspondiente.

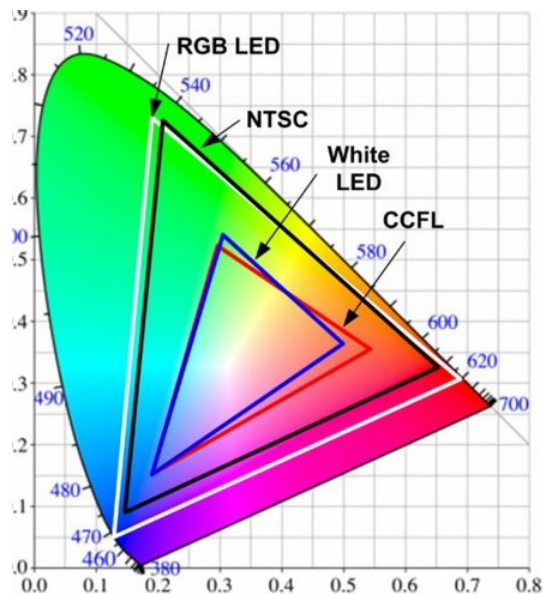
Figura No. 2 Diagrama de la secuencia en sistema VLC



C. Fotoemisor y Fotodiodo

1. Foto emisor LED. Por sus siglas Light Emitting Diode (LED) es un emisor de luz el cual está fabricado a base de un material semiconductor y como resultado de la corriente que eléctrica en este componente, emite luz. Por las características del diodo LED este solo puede emitir luz hasta un total de 120 grados como máximo y el rango de espectro electromagnético que ocupa puede apreciarse en la Figura No. 3. Una de las características clave de este componente es su bajo consumo en relación de lo lúmenes que proporciona.

Figura No. 3 Distribución del espectro electromagnético en tecnología LED



En los LED de 10 a 12 Watts se utilizan modificaciones en el interior del bombillo para lograr obtener un ángulo de 300 grados para la emisión de luz proveniente de este. El promedio de lumens consumidos por una bombilla de 12 Watts equivale a un total de 67 lumen/Watt (Dávid Andor Rácz, 2011) según pruebas realizadas. Lo anteriormente mencionado indica que la tecnología LED asegura poco consumo y más tiempo de vida por parte del componente.

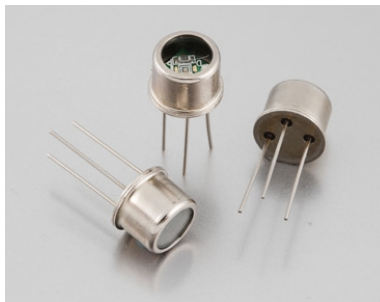
El funcionamiento del bombillo LED es idéntico al de un diodo emisor cualquiera el cual se encuentra conformado por un ánodo (positivo) y un cátodo (negativo). Se puede conocer más a detalle sus componentes principales los cuales se muestran en la Figura No. 4. El lente, el cual encapsula estos componentes y cumple la función de difusor, un lente óptico de fósforo el cual dirige la luz a cierto ángulo junto con sus materiales reflectores.

Figura No. 4 Partes principales del bombillo LED



2. Fotodiodo. Un fotodiodo es un componente electrónico formado por un material semiconductor cuyo comportamiento se asemeja al de un detector de luz. Este a su vez convierte la luz proveniente del emisor en voltaje o corriente dependiendo de la configuración en la cual este se encuentre armado. Es un componente cuyo material semiconductor esta formado de unión P-N el cual se encuentra mezclado entre capas por otro material intrínseco. Su principio de funcionamiento consiste captar los fotones (radiación electromagnética) provenientes del emisor y dependiendo de la dirección en la cual este componente recibe dichos fotones ocurrirá una absorción en la región P-N dejando espacios libres que se moverán al ánodo y los electrones al cátodo, esto produce el fenómeno denominado como fotocorriente en el componente.

Figura No. 5 Fotodiodo de silicio



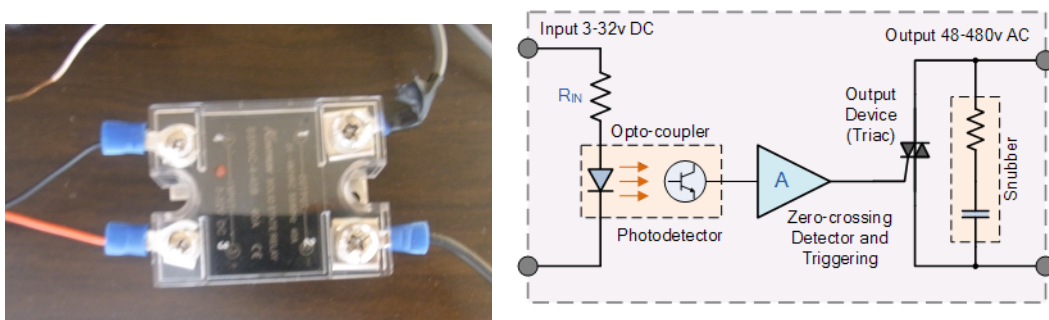
D. Relé de estado sólido

Un relé de estado sólido se entiende como un circuito electrónico el cual es capaz de aislar eléctricamente un circuito de entrada del circuito de salida. Ambas partes operan en voltajes diferentes y una sección (entrada) dará una señal de salida para que la otra sección (salida) conmute.

Las partes más importantes de este dispositivo electrónico son mostrados en la Figura No. 6 y se compone básicamente de lo siguiente:

1. Octocoplador el cual sirve como aislamiento en el sistema y generalmente se encuentra con un acoplamiento óptico con este semiconductor.
2. Detector de paso por cero el cual opera cuando la tensión de la carga es cercana al punto cero como su nombre lo indica.
3. Circuito de salida (Tiriac) el cual dá la ganancia del sistema.
4. Snubbers el cual es un circuito de ayuda para la conmutación del sistema o como supresor del voltaje transiente.

Figura No. 6 Relé de estado sólido utilizado en el sistema VLC y diagrama de conexión



Este componente es necesario en el sistema de VLC ya que permitía la rápida conmutación requerida para la alta frecuencia que se necesitaba al transmitir data. Además, ofrece distintas ventajas frente a los relés mecánicos como el bajo ruido, rebotes y trabajo de vida óptima. Los aspectos más importantes a considerar cuando se utilice este equipo son la disipación de calor ya que son dispositivos electrónicos sensibles a la temperatura del ambiente y las sobretensiones.

Al tratarse de una aplicación en la cual no existirán múltiples dispositivos electrónicos conectados ya sea en serie o en paralelo no es necesario preocuparse por la temperatura del dispositivo. Ya que los únicos parámetros que nos importan son tres distintos bombillos LED no existe un dispositivo que exija mayor corriente o voltaje por lo tanto solo se debe preocupar por la rápida conmutación que debe existir en el sistema de bombillas LED.

E. Programador Arduino como transmisor y receptor

El programador seleccionado y utilizado para el sistema VLC armado en este trabajo es Arduino MEGA, Figura No. 6, el cual cuenta con todas las implementaciones necesitadas como programador para comunicación. El programador Arduino Mega cuenta con la siguiente distribución de pines:

- 54 pines digitales
- 16 pines analógicos
- 3 pines para conexión a tierra (GND)
- 1 pin de alimentación de 5V
- 1 pin de alimentación de 3.3V
- 1 pin de voltaje de entrada (9V máximo)
- 1 pin de reset
- 2 pines de IOREF y AREF respectivamente

Figura No. 7 Programador Arduino MEGA



Para fines prácticos se utilizó la modulación PWM para establecer una comunicación de 9 bits con la instrucción incluida en la programación del Arduino *AnalogWrite()*. Se utilizó una lectura digital del programador (en otro pin) con el fin de obtener un resultado binario y establecer la transmisión proveniente del bombillo LED.

D. Processing

Processing es una herramienta de programación para Arduino en desarrollo con el cual puede controlarse múltiples de estos programadores simultáneamente. El objetivo de utilizar processing en este trabajo de graduación es lograr almacenar diferentes datos obtenidos por medio del programador Arduino y guardarlos para futuras comparaciones o bien tener un resguardo de los datos obtenidos de diferentes sensores.

Processing utiliza un lenguaje de programación abierto, sin embargo, admite librerías especiales de Java los cuales permiten almacenar y exportar datos en diferentes extensiones para hojas de cálculo o bien programas terceros como Matlab. Las librerías utilizadas en processing para exportación de datos del sensor utilizado son las siguientes:

- **Processing.serial:**
Es una librería especial de Processing la cual nos permite leer y escribir información de un dispositivo externo (en este caso Arduino) un byte por ciclo. Esto permite crear una comunicación entre dos PC diferentes, obtener un evento en el serial y procesarlo de forma que tiene múltiples propósitos en este trabajo en particular.
- **Java.io.BufferedWriter:**
Es una librería especial de Java optimizada en processing la cual permite crear una salida de carácter en el buffer el cual después es trasladado o exportado según conveniencia a otro espacio restringido para variables. El tamaño de este buffer puede ser definido por nosotros mismos o modificado según conveniencia del sistema. En este trabajo de graduación solo se importaban 1 byte de información cada vez que el sensor obtenía un valor por lo tanto se utilizó el buffer por defecto.
- **Java.io.FileWriter:**
Funciona como una clase especial la cual permite crear un archivo de escritura, dado un objeto de escrito. El punto final de este es crear un archivo final para exportar nuestros datos obtenidos por el sensor.

E. Tasas de transferencia de bits

La tasa de transmisión de bits hace referencia en informática y telecomunicación al número de bits que transmite por unidad de tiempo en un sistema de transmisión. Para fines de este trabajo se trabajan distintas tasas de transmisión con el fin de establecer una cota máxima de la velocidad máxima de transmisión que puede efectuarse en comunicación por medio de luz visible.

La unidad con la cual se expresa esta tasa de transmisión se encuentra estandarizada por el sistema internacional de unidades, esta es bit por segundo (bit/s o bps). La tasa de transferencia se da en referencia a la cantidad de ancho de banda que se da en un determinado tiempo del día. Esto a su vez determina la cantidad de información que puede enviarse por medio de una conexión de red y se lista la diferencia en cuanto a las unidades de almacenamiento y transferencia de bits listadas en la figura número.

Figura No. 8 Unidades de información digital

Unidades de información digital			
Almacenamiento		Transferencia (bit/s)	
Prefijo + unidad	Símbolo	Prefijo + unidad	Símbolo
byte	B	bit	b - bit
kilobyte	kB	kilobit	kb - kbit
megabyte	MB	megabit	Mb - Mbit
gigabyte	GB	gigabit	Gb - Gbit
terabyte	TB	terabit	Tb - Tbit
petabyte	PB	petabit	Pb - Pbit
exabyte	EB	exabit	Eb - Ebit
zettabyte	ZB	zettabit	Zb - Zbit
yottabyte	YB	yottabit	Yb - Ybit

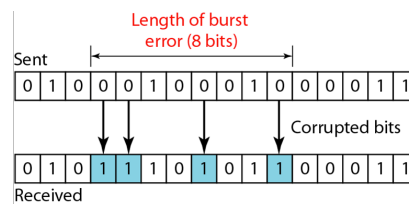
Los factores que determinan la tasa de transferencia pueden verse afectados por la topología en la cual se encuentra configurada el sistema de transmisión, la red y el número de usuarios en este. Existen diferentes tasas de transmisión las cuales son utilizadas dependiendo de la aplicación en la que se utilizará el sistema de comunicación. Para ello se listan diferentes tasas de transmisión típicas de accesos con sus respectivas tasas de transferencia.

- Módem RTB: 56Kbps = 7KB/s
- ADSL: 1024 Kbps = 128 KB/s
- RDSI: 128 Kbps = 8KB/s
- Cable 2400 Kbps = 300 KB/s
- VSAT: 600 Kbps = 75 KB/s
- Telefonía móvil 3G: 384Kbps = 48 KB/s

F. Tasa de error binario

La tasa de error binario o por sus siglas en inglés BER, bit error state hace referencia a una métrica la cual establece el desempeño en cuanto a la calidad de una comunicación digital. En este trabajo se establece el desempeño de la transmisión de información vía óptica hacia un fotodiodo. Un ejemplo claro de esta caracterización puede verse en la Figura número 9 la cual hace referencia a una cadena de 8 bits enviada en secuencia la cual es recibida en la misma longitud con el cambio en algunos bits de la secuencia total. A lo anteriormente mencionado se le conoce como secuencia alterada, lo cual quiere decir que existe un cambio en los bits recibidos respecto a la secuencia total enviada. Según la ecuación número 1 podemos calcular la BER total según los datos obtenidos durante la transmisión hacia el fotodiodo.

Figura No. 9 Representación de la tasa de error binario



Ecuación 1 TEB en comunicación óptica

$$TEB = \frac{\text{No. de bits recibidos con error}}{\text{No. de bits recibidos en total}}$$

Parte de evaluar esta tasa de error binaria en este trabajo es interpretar los datos que estamos obteniendo por parte del sistema de transmisión a lo largo de cierto período de tiempo. Según la institución ITC, “Information and communication technology”, el valor mínimo establecido para una TEB es de 10^{-7} . Para ITU-T, “International Telecommunication Union-Telecommunications Sector”, el valor óptimo de TEB en una comunicación es de un aproximado de 10^{-12} y por último según ANSU/IEEE es de 10^{-8} .

Cuadro No. 1 Tasas de error binario aceptables según aplicación

No.	Servicio	Tasa de error binario aceptable (%)
1	Llamada de voz	0,1 - 0,2
2	Videollamada	0,1 - 0,3
3	Teleimpresora	0,005
4	Transmisión por computadora	10-5 a 10-10
5	Modulación por impulsos codificados	> 0,1
6	Comunicación de voz de alta calidad	0,00005

V. Metodología

A. Componentes utilizados en el sistema de VLC

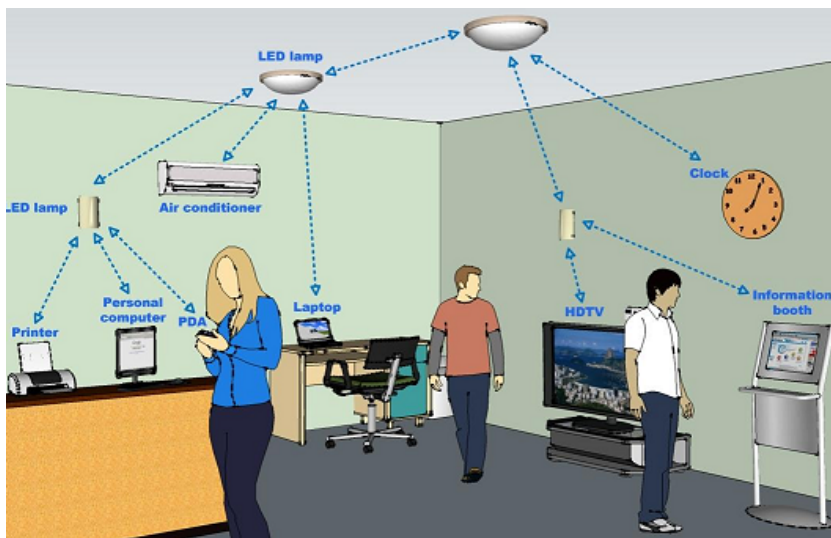
La fabricación del sistema VLC conforma múltiples componentes electrónicos individuales los cuales fueron vistos y explicados en el marco teórico.

Cuadro No. 2 Componentes electrónicos utilizados en el sistema VLC

Componente	Especificaciones individuales	Cantidad
Arduino MEGA	Distribuidor Steren	1 u
Bombillos LED	Light-Tec: 5 – 12 Watt	3 u
Fotodiodo	320 a 720 nm	3 u
Amplificador Operacional	LM328	3 u
Reflectores LED	Sylvanna: 20 Watt	2 u
LED ojo de buey	Light-Tec: 12 - 18 Watt	3 u
Bombillo Dimerizable	EarthBulb: 14 Watt	3 u
Dimmer	Philips	1 u
Relé de estado sólido	SSRNC440B	1 u

Con el fin de construir un medio en el cual las condiciones de iluminación y transmisión sean lo más posiblemente parecidas a una oficina estándar o sala en un hogar se necesitaba que el sistema de iluminación quedase a la altura del techo como se muestra en la Figura No. 13. Así como se explico anteriormente la bombilla LED tiene por lo regular un ángulo de iluminación de 120 grados según lo explicado en el apartado del transmisor. Para fines de simplicidad en este trabajo se utiliza únicamente un sistema de iluminaria en el cual la transmisión de datos se hará con un ángulo directo hacia el receptor.

Figura No. 10 Sistema VLC implementada lámpara LED en una oficina



Los materiales (no eléctricos) necesarios para fabricar el sistema de iluminaria con la altura mínima necesaria para cumplir las condiciones explicadas anteriormente son los siguientes.

Cuadro No. 3 Materiales utilizados en el sistema VLC

Componente	Variado	Cantidad
Tubo hueco de aluminio	-	4 u
Tablones	1 pulgada de grosor	2 u
Abrazadera	$\frac{3}{4}$ de pulgada	16 u
Plafonera	-	3 u
Plafonera para ojo de buey	-	3 u
Cable paralelo	-	8 mts

B. Relé de estado sólido utilizado

El relé de estado sólido utilizado para este trabajo es el SSRNC 440B de Nowy elektronik, (Figura No. 6) cuyas características eran más que suficientes según la aplicación a la que sería sometido este dispositivo electrónico. Únicamente se necesitaba que el voltaje de de encendido para que conmutase el circuito estuviese entre un rango de 3.3V a 10 V para que el sistema no se viese comprometido.

Las características principales del relé de estado sólido en este trabajo son presentadas a continuación:

- Voltaje de entrada (bobina): 3-32VDC
- Voltaje de carga (contacto): 40-480VAC
- Corriente de carga (contacto): 40A
- Voltaje de encendido: $\leq 1V$
- Tiempo encendido/apagado: $\leq 10ms$
- Temperatura de trabajo: -30° a $+70^{\circ}C$
- Medidas: 62mm x 45mm x 32mm

C. LED utilizados

Los bombillos LED utilizados pertenecen a la marca Light-Tec los cuales se son bombillos convencionales utilizados en aplicaciones cotidianas. Se decidió utilizar este tipo de bombillo LED con el fin de demostrar que esta clase de sistema de comunicación puede ser implementado con cualquier tipo de LED convencional y ser aplicado con los mismos resultados que LED de más alto desempeño.

Ya que el sistema VLC debe iluminar una habitación estándar, la cual en este trabajo se utilizó una habitación de 3.8x2.7x2.8, estos debían entregar una potencia lo suficientemente alta para lograr establecer una transmisión de datos entre el emisor y receptor y al mismo tiempo ser capaz de iluminar dicho espacio. Por ende se utilizaron diferentes bombillos LED con diferente potencia con el fin de crear una comparación en cada uno estos y representar la relación que existe de lumens y la tasa de transmisión que permite cada una de estas.

Las características técnicas de cada bombillo LED son catalogadas en los Cuadros no. 3, 4, 5, 6 y 7. Más adelante se da a conocer si existe una diferencia o no entre cada una de estas en la sección de resultados.

Cuadro No. 4 Bombillos LED utilizados en el sistema VLC

Potencia (Watt)	Voltaje (V)	Lúmenes (Lm)	Frecuencia	Horas de Vida (Hrs)	Igualdad en potencia de bombillo de halógeno (Watt)
5	AC85-130V	520	50/60Hz	20000	50
7	AC85-130V	630	50/60Hz	20000	60
10	AC85-130V	960	50/60Hz	20000	75

Cuadro No. 5 Bombillo Dimerizable utilizado en el sistema VLC

Potencia (Watt)	Voltaje (V)	Lúmenes (Lm)	Frecuencia	Horas de Vida (Hrs)	Igualdad en potencia de bombillo de halógeno (Watt)
14	AC100-120V	835	50/60Hz	40000	75

Cuadro No. 6 Reflector LED utilizado en el sistema VLC

Potencia (Watt)	Voltaje (V)	Lúmenes (Lm)	Frecuencia	Horas de Vida (Hrs)	Igualdad en potencia de bombillo de halógeno (Watt)
20	AC100-220V	2000	60Hz	50000	-
20	AC100-240V	3100	50/60Hz	>30000	-

Cuadro No. 7 Ojo de buey LED utilizado en el sistema VLC

Potencia (Watt)	Voltaje (V)	Lúmenes (Lm)	Frecuencia	Horas de Vida (Hrs)	Igualdad en potencia de bombillo de halógeno (Watt)
18	AC85-265V	1350	50/60Hz	30000	26
12	AC85-265V	900	50/60Hz	30000	23 - 25

D. Fotodiodo utilizado

Para este sistema VLC en particular se hizo uso de dos diferentes tipos de fotodiodo de gama media con el fin de crear una comparación entre ambos y discutir en base a los resultados. Lo anteriormente mencionado se realizó con la expectativa de obtener resultados variados los cuales representen alternativas para el usuario, sin embargo se debía variar la circuitería para cada sensor con el fin de obtener resultados que pudiesen ser utilizados y discutidos.

En primera instancia se utilizó un fotodiodo de silicio S8265 de 320nm a 730nm de espectro electromagnético, el cual es ideal para el tipo de aplicación que se está utilizando en este sistema VLC cuyos rangos de luminosidad se establecieron en el apartado de foto emisor y fotodiodos. Las características principales de dicho sensor pueden ser encontrados en la Figura No. 11 y muestran las propiedades básicas a las cuales este sensor puede ser utilizado eficientemente.

Figura No. 11 Especificaciones eléctricas del fotodiodo S8265

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS @25°C (See also VTB curves, pages 21-22)

SYMBOL	CHARACTERISTIC	TEST CONDITIONS	SG5051B			UNITS
			Min.	Typ.	Max.	
I_{sc}	Short Circuit Current	H = 100 ft, 2850 K	8	13		μ A
TC I_{sc}	I_{sc} Temperature Coefficient	2850 K		.02	.08	%/°C
V_{oc}	Open Circuit Voltage	H = 100 ft, 2850 K		420		mV
TC V_{oc}	V_{oc} Temperature Coefficient	2850 K		-2.0		mV/°C
I_D	Dark Current	H = 0, VR = 2.0 V			280	pA
R_{SH}	Shunt Resistance	H = 0, V = 10 mV		.86		Ω
TC R_{SH}	R_{SH} Temperature Coefficient	H = 0, V = 10 mV		-8.0		%/°C
C_j	Junction Capacitance	H = 0, V = 0		3.0		pF
* λ_{resp}	Spectral Application Range		330		720	nm
* λ_p	Spectral Response - Peak			580		nm
V_{BR}	Breakdown Voltage		2	40		V
* $\lambda_{1/2}$	Angular Resp. - 50% Resp. Pt.			\pm 50		Degrees
NEP	Noise Equivalent Power			3.7×10^{-14} (Typ.)		W \cdot \sqrt / Hz
D*	Specific Detectivity			1.0×10^{13} (Typ.)		cm \cdot Hz / W

El segundo de los sensores utilizados en este proyecto es el S5972 el cual es un fotodiodo de alta velocidad catalogado en la gama alta. Al igual que el foto diodo anterior este es utilizado para luz visible o infrarrojo en distancias cercanas lo cual facilita su uso en la aplicación de detección de luz en rápidas conmutaciones con el relé de estado sólido. Sus propiedades eléctricas y ópticas pueden ser apreciadas en la Figura No. 12 presentada a continuación.

Figura No. 12 Especificaciones eléctricas del fotodiodo S5972

■ Electrical and optical characteristics													
Type No.	Spectral response range λ (nm)	Peak sensitivity wavelength λ_p (nm)	Photo sensitivity S (AW)				Short circuit current I_{sc} 100 Lx (μ A)	Dark current I_D		Temp. coefficient of I_D T_{CID} (times/ $^{\circ}$ C)	Cut-off frequency f_c (GHz)	Terminal capacitance C_t $f=1$ MHz (pF)	NEP $V_R=10$ V (W/Hz $^{1/2}$)
			λ_p	660 nm	780 nm	830 nm		Typ. (nA)	Max. (nA)				
S5971	320 to 1060	900	0.64		0.55	0.6	1.0	0.07 *3	1 *3	1.15	0.1 *3	3 *3	7.4×10^{-15}
S5972		800	0.57	0.44		0.55	0.42	0.01 *3	0.5 *3		0.5 *3		3.1×10^{-15}
S5973	320 to 1000	760	0.52		0.51	0.47	0.09						
S5973-01							0.42	0.001 *4	0.1 *4		1 *4	1.6 *4	1.5×10^{-15}
S5973-02			0.45	0.3 *2	0.42	0.37	0.09						

Una de las características más importantes del S5972 es que proveen de un gran ancho de banda con un bajo voltaje de polarización por lo cual es ideal para aplicaciones de comunicaciones por medio de luz visible. Además la alta sensibilidad y confiabilidad del sensor promete resultados bastantes certeros y ayuda a que se mantenga bajo el porcentaje en el error binario que pueda proceder del envío de datos.

E. Fases de VLC

El sistema fabricado consta de siete fases mostradas en la Figura No.2 y el análisis será explicado a continuación.

Primera fase - Fuente de datos Arduino

Esta fase consta del envío de datos hacia el bombillo LED por medio de microcontrolador Arduino. El mensaje completo consta de 26 caracteres los cuales hacen referencia al alfabeto sin la letra “ñ”. El programa ejecutado contiene cada letra del alfabeto con su propio código de bits (8 bits en total por cada uno) los cuales son ejecutados como un PWM.

Segunda fase – Transmisor LED

La segunda fase es una de las más simples ya que únicamente debe ejecutarse el programa para transmitir el PWM al transmisor que en este caso es la bombilla LED.

Tercera fase – Sistema (el medio)

En esta fase únicamente se están haciendo el traslado de datos del transmisor (bombilla LED) hacia el receptor (fotodiodo).

Cuarta fase – Recepción en el fotodiodo

Después de haber transmitido la información por medio del transmisor y esta viajar en el sistema (nuestro medio) esta es captada por nuestro fotodiodo el cual interpreta la señal y según su configuración obtenemos una corriente o voltaje como salida de este componente.

Quinta fase – Amplificación y comparación

Una vez obtenida la señal de salida de nuestro componente receptor se debe amplificar dicha señal ya que se encuentra en una escala minúscula de voltaje o corriente. Una vez amplificada la señal de salida del receptor, se debe comparar esta señal para reconocer si se trata de un uno (1) lógico o un cero (0) lógico con el fin de identificar la codificación realizada en la primera fase y reconocer la letra transmitida.

El comparador en esta fase únicamente tiene la funcionalidad de realizar una comparación con el voltaje de referencia el cual también debe ser un uno lógico (1). Una vez obtenida la comparación la salida de ese comparador (el cual también es un chip UA741) se hace una lectura analógica en la siguiente fase.

Sexta fase – Recepción de datos

En la sexta fase, como se menciono en la fase anterior, se hace una lectura del voltaje de salida del comparador. Esto se hace con el objetivo único de establecer la letra transmitida desde la primera fase y a la velocidad de baudios que se estableció.

Séptima fase- Datos enviados vs datos recibidos

La última fase de nuestro sistema VLC consta de la comparación de datos enviados por parte de nuestro emisor y los datos recibidos en nuestro receptor. Se crea una tabla de comparación y se calcula la confiabilidad y la tasa de error binario representada en nuestro sistema. Como se estableció en el objetivo general la variable de interés en este experimento es la variable “e” que representa la tasa de error binario del sistema VLC construido.

F. Sistema VLC implementado

El sistema de comunicación por medio de luz visible presentado en este trabajo cuenta con las dimensiones 3.8x2.7x2.8 respectivamente al ancho, largo y alto de la habitación en la cual se implemento dicho sistema de comunicación. Como se mencionó anteriormente parte de utilizar este sistema de comunicación además de lograr establecer un correcto envío de datos entre un emisor y receptor es lograr iluminar un área determinada en la cual uno puede estar presente sin que exista perturbación en el sistema VLC.

El sistema construido para implementar la comunicación por medio de luz visible es mostrado en la Figura No. 11 y cada parte de esta fue listada en la sección de materiales para su construcción. El sistema como tal provee una iluminación de aproximadamente 600 lúmenes desde la distancia más alta hasta la más baja en condiciones controladas donde no está presente la luz solar (la cual no se considera en este trabajo como tal).

Figura No. 13 Sistema VLC construido



A pesar de la iluminación que provee el sistema existen diferentes aspectos a tomar en consideración al momento de transmitir información por lo que más adelante se darán a conocer los resultados que se obtuvieron con algunas limitantes. Parte de evaluar si este sistema tiene futuro en la industria o en aplicaciones del uso cotidiano viene dado de la adaptabilidad que el sistema plantea al ser posible que este pueda ser utilizado en un hogar promedio sin necesidad de alterar considerablemente las instalaciones eléctricas del mismo.

Como respuesta a lo anteriormente mencionado este trabajo comprueba que la construcción del sistema es rápido y de fácil acceso (incluyendo modificaciones o reemplazos). Como tal el sistema que se construyó cuenta con cuatro tubos de aluminio que sostiene el sistema de bombillos con el relé de estado sólido lo cual permite su fácil acceso y maniobrabilidad. Aunque claro al tratarse de un sistema controlado (sin luz solar o alguna perturbación óptica) no puede comprobarse su funcionalidad ante esa clase de situaciones.

G. Circuitos utilizados

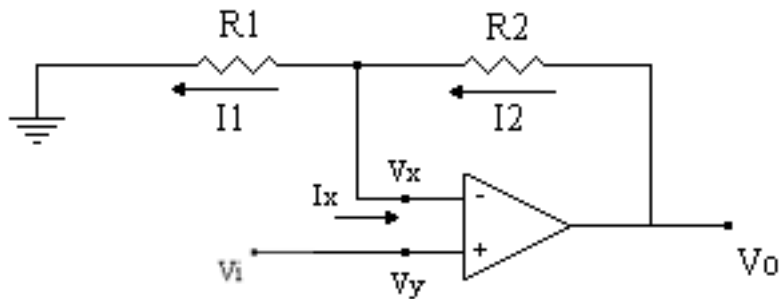
1. Amplificador no inversor.

El primer circuito a tomar en consideración es el amplificador no inversor el cual como su nombre indica sirve como amplificación de la señal de entrada, es decir, el voltaje de salida se encuentra en fase del voltaje de entrada. El esquemático del circuito es mostrado en la Figura no. 14 y la ecuación de ganancia de este circuito viene dado por la siguiente ecuación.

Ecuación 2 Relación voltaje de salida con voltaje de entrada y resistencias

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

Figura No. 14 Amplificador no inversor



2. Comparador no inversor.

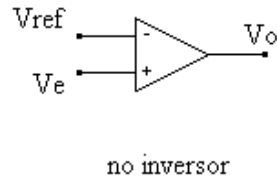
El siguiente circuito se trata de un comparador no inversor, Figura no. 15 cuya única función es comparar un valor de entrada con el valor de referencia que en esta aplicación es tierra (0 Voltios). La salida de este comparador depende de las siguientes condiciones:

Ecuación 3 Relación de voltajes de entrada y referencia

$$\text{Si } V_e > V_{ref} \text{ entonces } V_o = V_e$$

$$\text{Si } V_e < V_{ref} \text{ entonces } V_o = V_{ref}$$

Figura No. 15 Comparador no inversor

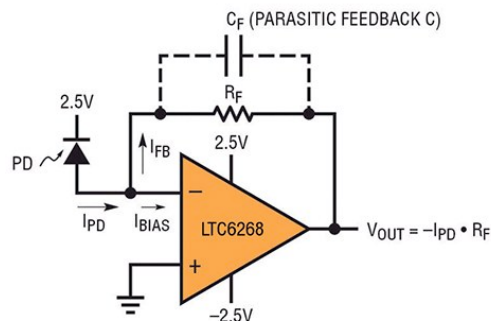


3. Circuito de transimpedancia.

Uno de los aspectos más importantes al momento de utilizar un receptor de cualquier clase, es el rango de captura de la señal que se necesita en operaciones de larga distancia. Al tratarse de una aplicación futura en la cual el sistema presenta un rango de transmisión en el cual el emisor (en este caso el LED) debe emitir señales que sean interpretadas por nuestro sensor, es de gran utilidad que el rango de recepción de nuestro receptor sea el máximo posible. Para ello existe un circuito especial utilizado específicamente en fotodiodos el cual es denominado el circuito de transimpedancia.

El circuito utilizado para esta configuración es mostrada en la Figura no. 16, la característica principal de este circuito radica en la amplificación de la corriente del fotodiodo cuando este se encuentra en modo fotoconductor y su transformación en voltaje en su salida. Sus propiedades también admiten definir cuanta es la amplificación que se necesita, su ancho de banda y una dispersión debido a una diferencia de fase (la cual en este caso no utilizaremos).

Figura No. 16 Circuito de transimpedancia



VI. Resultados

A.Sistema VLC

Se consideran 4 etapas importantes en la construcción del sistema VLC las cuales son la señal de salida de nuestro emisor (LED), el receptor (fotodiodo), el sistema de amplificación y comparación, por último la comparación de datos enviados por nuestro emisor vs los recibidos por nuestro receptor.

1. LED

Cuadro No. 8 Lumens proporcionados en distancia según potencia – Bombillo LED

Número	Potencia (Watts)	Lumens proporcionados A 50 cm	Lumens proporcionados A 100 cm	Lumens proporcionados A 150 cm	Lumens proporcionados A 200 cm
1	5	1093	378	197	154
2	7	1285	423	222	175
3	10	1393	451	262	187

Cuadro No. 9 Lumens proporcionados en distancia según potencia - Reflector LED

Número	Potencia (Watts)	Lumens proporcionados A 50 cm	Lumens proporcionados A 100 cm	Lumens proporcionados A 150 cm	Lumens proporcionados A 200 cm
1	20	5392	4597	3622	2770
2	20	5064	4381	3024	2032

Cuadro No. 10 Lumens proporcionados en distancia según potencia - LED Ojo de buey

Número	Potencia (Watts)	Lumens proporcionados A 50 cm	Lumens proporcionados A 100 cm	Lumens proporcionados A 150 cm	Lumens proporcionados A 200 cm
1	12	1305	1114	922	873
2	18	1877	1568	1412	1203

Cuadro No. 11 Lumens proporcionados en distancia según potencia - Bombillo dimerizable

Número	Potencia (Watts)	Lumens proporcionados A 50 cm	Lumens proporcionados A 100 cm	Lumens proporcionados A 150 cm	Lumens proporcionados A 200 cm
1	14	2927	2365	1849	1204

2. Fotodiodo

Ecuación 4 Resistencia de carga utilizada

$$R_{carga} = 10K\Omega$$

Ecuación 5 Tiempo de subida (rise time) del fotodiodo

$$t_r = \frac{0.35}{f_c(Hz)}$$

De acuerdo a la Figura número 10 el ancho de banda del fotodiodo es de mínimo 1 MHz aunque el datasheet del componente indica que este puede variar según la conexión que se requiera para detección en alta velocidad. La ecuación para hallar el ancho de banda máximo del fotodiodo viene dada en la ecuación número 5.

Ecuación 6 Ancho de banda (bandwidth) del fotodiodo

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

$$f_{BW} = 1 GHz$$

3. Sistema de amplificación y comparación

Figura No. 17 Resistencias utilizadas en el amplificador no inversor

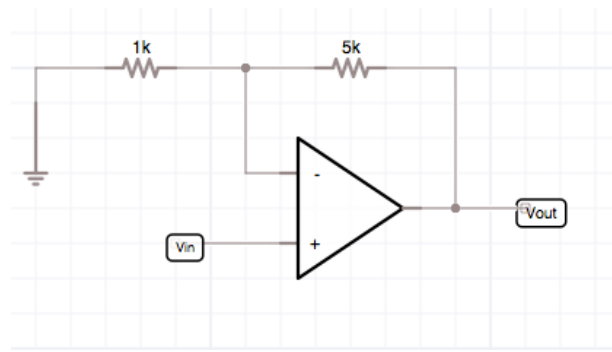
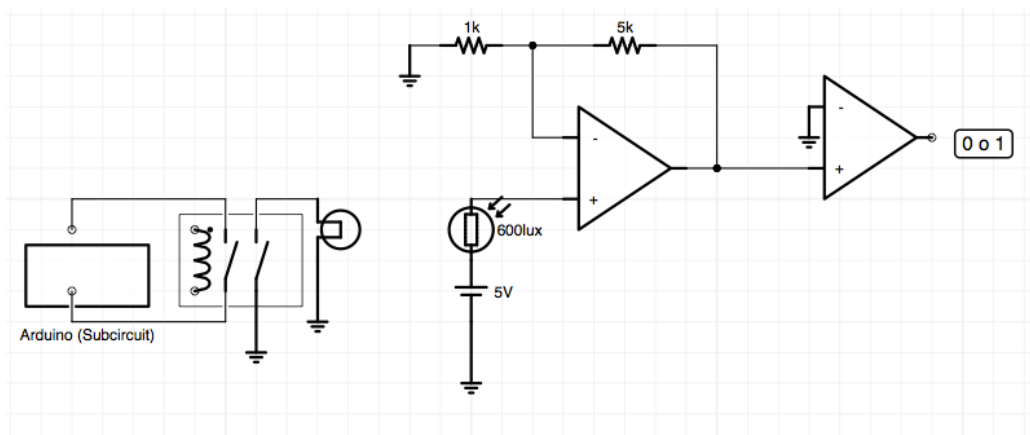


Figura No. 18 Esquemático completo



4. Comparación de datos enviados por nuestro emisor vs los recibidos por nuestro receptor

Figura No. 19 Señal de salida proveniente del LED

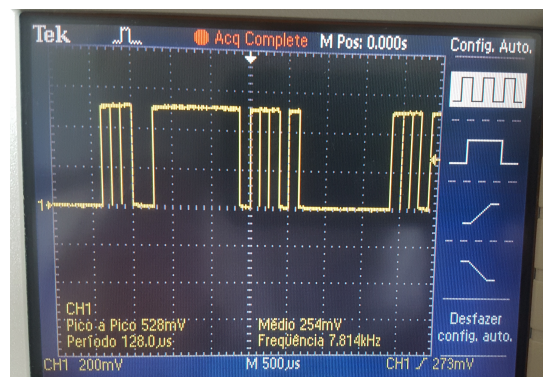
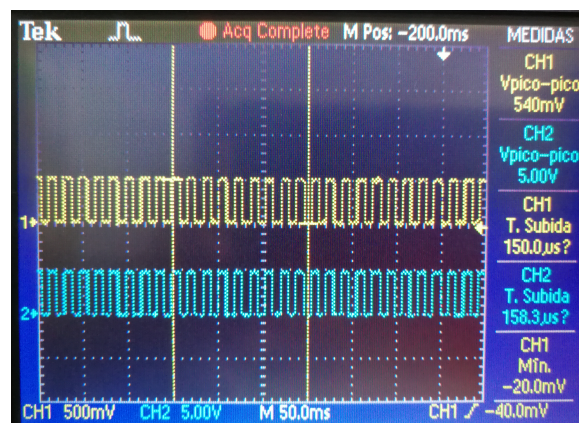


Figura No. 20 Señal única enviada por el emisor y recibida por el fotodiodo



Cuadro No. 12 Pruebas del sistema VLC – Bombillo LED

Muestra	No. De Transmisiones	Bits Transmitidos	Bits perdidos	Tiempo transcurrido	Distancia (cm)	Velocidad (Kbits/s)
1	7110	1187370	6624	15 minutos	100	9.6
2	7110	1187370	6384	15 minutos	100	19.2
3	7110	1187370	4410	15 minutos	50	19.2
4	7110	1187370	6826	15 minutos	100	57.6
5	7110	1187370	4207	15 minutos	50	9.6
6	28440	4749480	161313	1 hora	100	9.6
7	28440	4749480	140155	1 hora	100	19.2
8	28440	4749480	147469	1 hora	100	57.6
9	28440	4749480	156092	1 hora	100	57.6
10	28440	4749480	43665	1 hora	50	9.6
11	85320	14248440	825904	3 horas	100	9.6
12	85320	14248440	1169765	3 horas	100	19.2
13	85320	14248440	583705	3 horas	50	9.6
14	85320	14248440	476137	3 horas	50	57.6
15	85320	14248440	135002	3 horas	100	57.6
16	682560	113987520	26880830	1 dia	100	9.6
17	682560	113987520	25263830	1 dia	100	57.6

Cuadro No. 13 Tasa de error binario – Bombillo LED

Muestra	Bits Transmitidos	Bits perdidos	Tasa de error binario
1	1187370	6624	0.05578716
2	1187370	6384	0.053765886
3	1187370	4410	0.037140908
4	1187370	6826	0.057488399
5	1187370	4207	0.035431247
6	4749480	161313	0.339643498
7	4749480	140155	0.295095463
8	4749480	147469	0.310495044
9	4749480	156092	0.328650715
10	4749480	43665	0.09193638
11	14248440	825904	0.57964521
12	14248440	1169765	0.820977595
13	14248440	583705	0.409662391
14	14248440	476137	0.334167811
15	14248440	135002	0.094748618
16	113987520	26880830	0.235822571
17	113987520	25263830	0.221636807

Cuadro No. 14 Pruebas totales de tasa de transmisión y distancias con bombillo LED

LED	Velocidad (Kbits/s)	Tiempo	TEB: 50 Cm	TEB: 100 Cm	TEB: 150 Cm
Bombilla Normal	9.6	15m	0.06	0.11	0.7
Bombilla Normal	9.6	1h	0.08	0.16	0.82
Bombilla Normal	9.6	3h	0.1	0.27	0.79
Bombilla Normal	9.6	1dia	0.17	0.31	0.73
Bombilla Normal	19.2	15m	0.05	0.13	0.79
Bombilla Normal	19.2	1h	0.06	0.21	0.69
Bombilla Normal	19.2	3h	0.09	0.22	0.73
Bombilla Normal	19.2	1dia	0.14	0.31	0.78
Bombilla Normal	57.6	15m	0.08	0.14	0.78
Bombilla Normal	57.6	1h	0.07	0.19	0.82
Bombilla Normal	57.6	3h	0.09	0.21	0.69
Bombilla Normal	57.6	1dia	0.2	0.25	0.82

Cuadro No. 15 Muestras del sistema VLC – Bombillo LED dimerizable

Muestra	No. De Transmisiones	Bits Transmitidos	Bits perdidos	Tiempo transcurrido	Distancia (cm)	Velocidad (Kbits/s)
1	7110	1187370	783	15 minutos	150	9.6
2	7110	1187370	834	15 minutos	150	19.2
3	7110	1187370	886	15 minutos	150	57.6
4	7110	1187370	874	15 minutos	150	57.6
5	7110	1187370	891	15 minutos	150	57.6
6	28440	4749480	4094	1 hora	150	9.6
7	28440	4749480	4760	1 hora	150	19.2
8	28440	4749480	5673	1 hora	150	57.6
9	28440	4749480	5835	1 hora	150	57.6
10	28440	4749480	5932	1 hora	150	57.6
11	85320	14248440	19563	3 horas	150	19.2
12	85320	14248440	19820	3 horas	150	19.2
13	85320	14248440	22450	3 horas	150	57.6
14	85320	14248440	22538	3 horas	150	57.6
15	85320	14248440	24543	3 horas	150	57.6
16	682560	113987520	9234274	1 día	150	19.2
17	682560	113987520	9763663	1 día	150	57.6

Cuadro No. 16 Pruebas de error binario – Bombillo LED dimerizable

Muestra	Bits Transmitidos	Bits perdidos	Tasa de error binario
1	1187370	783	0.065944061
2	1187370	834	0.070239268
3	1187370	886	0.074618695
4	1187370	874	0.073608058
5	1187370	891	0.075039794
6	4749480	4094	0.08619891
7	4749480	4760	0.100221498
8	4749480	5673	0.119444655
9	4749480	5835	0.122855555
10	4749480	5932	0.124897884
11	14248440	19563	0.137299241
12	14248440	19820	0.139102947
13	14248440	22450	0.157561108
14	14248440	22538	0.15817872
15	14248440	24543	0.172250436
16	113987520	9234274	0.810112721
17	113987520	9763663	0.856555437

Cuadro No. 17 Pruebas totales de tasa de transmisión y distancias con bombillo dimerizable LED

LED	Velocidad (Kbits/s)	Tiempo	TEB: 50 Cm	TEB: 100 Cm	TEB: 150 Cm
Bombilla Dimerizable	9.6	15m	0.08	0.06	0.17
Bombilla Dimerizable	9.6	1h	0.06	0.04	0.24
Bombilla Dimerizable	9.6	3h	0.04	0.05	0.21
Bombilla Dimerizable	9.6	1dia	0.04	0.15	0.03
Bombilla Dimerizable	19.2	15m	0.08	0.05	0.19
Bombilla Dimerizable	19.2	1h	0.07	0.08	0.23
Bombilla Dimerizable	19.2	3h	0.04	0.05	0.22
Bombilla Dimerizable	19.2	1dia	0.01	0.16	0.27
Bombilla Dimerizable	57.6	15m	0.05	0.13	0.15
Bombilla Dimerizable	57.6	1h	0.07	0.12	0.22
Bombilla Dimerizable	57.6	3h	0.08	0.09	0.29
Bombilla Dimerizable	57.6	1dia	0.12	0.18	0.30

Cuadro No. 18 Tasas de error binario según tasa de transmisión - Bombillo dimerizable

Prueba	Tasa de Transmisión (bps)	Distancia (cm)	Tasa de error binario
1	4800	50	0.05
2	9600	50	0.041
4	19200	50	0.043
6	38400	50	0.05
7	57600	50	0.092
8	115200	50	0.09
9	250000	50	0.14

VII. Análisis de resultados

El desarrollo de este sistema de comunicación por medio de luz visible estaba dado por una serie de objetivos planteados que debían cumplirse para evaluar el trabajo final. Como objetivo general se debía crear el sistema o medio por el cual se transmitirían los datos, ya que no se contaba con uno listo para utilizarse en el momento se fabricó uno como puede apreciarse en la Figura número 13. El listado de materiales y componentes eléctricos se dio en el capítulo V, sección A y gracias a la implementación realizada al integrarlo con el sistema de fases que conforma un sistema de comunicación por medio de luz visible se logró cumplir con el objetivo general de este trabajo.

De lo anteriormente mencionado debe darse a conocer que este sistema en particular es utilizado en un ambiente sin interferencia óptica, entiéndase luz solar, lo cual ayuda a que la cantidad lúmenes totales que logra emitir cada bombillo sean captados en su totalidad por el receptor (fotodiodo). Parte de desarrollar una luminaria que logre iluminar las dimensiones de una habitación estándar es uno de los objetivos específicos de este trabajo. Véase la Figura número 8 como fin ilustrativo de cómo es implementado el sistema VLC en una oficina y parte del desarrollo que se estableció en este trabajo para recrear las condiciones que se esperan de esta tecnología en un futuro.

La evaluación de este sistema de comunicación óptica viene representada por dos aspectos fundamentales que son la tasa de error binario y la velocidad de transmisión a la cual el sistema funciona correctamente y de manera continua sin necesidad de operación humana. Para cumplir con las fases de VLC descritas en el capítulo V sección E se decidió utilizar un programador Arduino que sería el microcontrolador que modula la señal en el sistema VLC, por ende la transmisión sería totalmente autónoma y aislada del usuario (como se espera que funcione sin necesidad de operación por parte del usuario) además lo único que debe hacer el usuario es colocarse en línea con la transmisión proveniente del bombillo LED.

Una vez implementada la estructura y definida la secuencia lógica se debieron hacer los cálculos correspondientes a cada circuito con el fin de obtener resultados confiables. Analizando el amplificador no inversor este debía dar cierta magnitud ganancia con el fin de obtener una señal que pudiese ser interpretada y comparada en relación a un voltaje de referencia, en este caso 3.5 V. Para ello se midió con un osciloscopio la señal captada por el fotodiodo (el cual es el primero fotodiodo identificado en el capítulo V sección D) y al tratarse de una señal débil de casi 390 mV en estado alto se obtuvo una relación de resistencias la cual permitía amplificar nuestra señal proveniente del sensor por un factor de ganancia de 30. Algo a tomar en consideración de esto es que a pesar de obtener una ganancia alta esta debía tener un valor que pudiese ser interpretada como un 0 o 1 lógico con el fin de ser interpretada por el microcontrolador.

El procesamiento de datos es ejecutado por la placa Arduino la cual también cumple la función de modular la señal hacia el transmisor, es decir, los bombillos LED. Parte de los objetivos es lograr implementar este sistema VLC de forma que logre transmitir datos hacia un dispositivo electrónico (entiéndase celular, tablet o computadora) por lo tanto una laptop fue la alternativa a utilizar con el fin de recibir los datos provenientes del transmisor e interpretarlos para su proceso final el cual es la comparación de datos.

La resistencia de carga fue establecida según el datasheet del sensor el cual puede ser encontrado en el capítulo XI sección A. Parte de elegir correctamente la resistencia de carga del fotodiodo es debido a que a mayor resistencia de carga, el ancho de banda por parte de este (siendo 1MHz el estándar) disminuye. Con el fin de establecer el mayor ancho de banda y la máxima ganancia que se pudiese conseguir por parte del amplificador no inversor se decidió utilizar la resistencia de carga sugerida en el datasheet del componente electrónico.

En el apartado del comparador no existe mayor complicación ya que únicamente se tiene una referencia que es tierra y el voltaje de entrada el cual se comparó respecto al voltaje de referencia. Cuando el voltaje de entrada es mayor o igual al de referencia entonces el voltaje de salida del comparador es igual al voltaje de entrada. El fin de esta comparación es obtener una clara diferencia entre voltajes y ayudar a evitar errores en los bits que proviene de la emisión de luz visible por parte de nuestro sistema de comunicación óptica.

Algo notorio en esta aplicación es que a mayor velocidad de transmisión mayor es la distorsión se puede observar de la salida del comparador tomando así en cuenta que la tasa de error binaria aumente. Esto a su vez es apreciado aún más cuando el sistema se encuentra en un ambiente no controlado donde la luz solar perturba el sistema.

En este sistema es importante establecer una misma tasa de transmisión tanto en el emisor como receptor para transmitir datos. De esta manera puede existir una comunicación simplex entre ambos componentes con el fin de evaluar que sucede si se incrementa tanto la distancia de transmisión como la distancia a la cual se esta transmitiendo. Para este trabajo se utilizaron tres diferentes velocidades de transmisión en un análisis profundo siendo estas de 9.6, 19.2 y 57.6 Kbit/s. Aunque se utilizaron 9 diferentes tasas de transmisión en total con el fin de evaluar la tasa de error binario a una distancia de 50 cm como puede apreciarse en el Cuadro no. 18.

Una vez realizado el proceso anterior se realizaron mediciones con distintas distancias y potencias en los bombillos LED de el sistema VLC. Las potencias de cada bombillo y los lúmenes que entregan a distintas distancias pueden ser apreciados en el cuadro número 8,9,10 y 11. Algo obvio de notar es que a mayor potencia de consumo de los LED, mayor intensidad (lúmenes) por parte de estos. Una de las dificultades que se encuentra con este tipo de sistemas es la distancia a la cual puede transmitirse datos, siendo en este caso 150 centímetros lo máximo que se consiguió en este sistema sin demasiado error de transmisión de bits.

De las pruebas realizadas en el apartado de resultados, del cuadro 12 al 18, se puede apreciar en gran parte que la tasa de error binaria es menor conforme la distancia también es menor ya que en gran medida los lúmenes aumentan conforme se acerca el fotodiodo a la bombilla. Existe un porcentaje de mejora en los datos que el fotodiodo capta aunque claro está no puede obtenerse un porcentaje en concreto (estándar) al existir tanta variación entre los bits obtenidos en medidas con la misma distancia y en diferentes tiempos.

Una de las implementaciones finales en el sistema de VLC fue el de utilizar bombillos dimerizables con una mayor potencia en comparación de los bombillos convencionales de 12 Watt. El motivo principal de esto consistía en establecer una comunicación mas confiable a distancias mayores de 100 cm con lo que pudiese variarse la intensidad de este y concentrar el rango que este bombillo dimerizable provee de iluminación. Los resultados finales de esta implementación pueden apreciarse del cuadro 15 al 17, los cuales indican que existe una mejora en la tasa de error binario que se obtiene al momento de incrementar tanto la distancia como la tasa de transferencia.

Con el fin de obtener información valiosa de acuerdo a las diferentes velocidades de transmisión se optó por comprobar si existe relación entre la distancia a la cual se transmite y la velocidad de la misma. Al obtener resultados claramente parecidos entre los cuales el porcentaje variaba aproximadamente un 4% se estimó que la variación en la tasa de error binaria depende en mayor parte de la distancia en la cual se transmite y velocidad de transmisión. Claro que se comprueba de igual forma si a mayor potencia de salida del emisor (lo cual entrega más lúmenes al sistema) existe una mejor transferencia de datos ya que disminuye la tasa de error binario.

Todos los resultados de este trabajo aplican únicamente para este sistema en particular donde no existe interferencia óptica y se tiene un sistema controlado, libre perturbaciones externas (luz solar). Estos porcentajes de error deben más elevados al tomar en consideración dicho factor, sin embargo para fines de este trabajo no son evaluados en el sistema final y se obtienen resultados aceptables. Los únicos diez casos en los cuales se puede apreciar un cambio radical en la tasa de error binario es en las pruebas cuya duración es de un día entero. Esto último se dio debido a la presencia de lúmenes por parte de luz solar a pesar de encontrarse en un sistema lo más aislado que se pudiese, sin embargo la cantidad de lúmenes que se registraron fueron de 148 lúmenes (luz solar) durante un período aproximado de 8 horas.

VIII. Conclusiones

- Se cumplió el objetivo general del trabajo al implementar un sistema de comunicación por medio de luz visible. El cual a su vez funciona con diferentes tasas de transmisión de datos.
- La potencia de consumo en la bombilla es directamente proporcional a la cantidad de lúmenes que este componente puede proporcionar.
- Los lúmenes mínimos necesarios para transmitir datos es de 400 lúmenes y es necesario utilizar bombillos LED de potencia mayor a 12 Watt para cumplir con estas condiciones en distancias mayores a 100 centímetros.
- La distancia máxima a la cual se logró transmitir datos fue de 150 cm.
- Se comprobó que a distancias mayores de 200 centímetros la transferencia de datos es nula ya que el fotodiodo no es capaz de captar la señal proveniente del transmisor
- Los factores que más repercuten en la tasa de error binario son la distancia de transmisión y la velocidad de transmisión de datos. Esto puede ser solucionado si se cuenta con componentes más aptos para la aplicación y con circuitos especializados que requieren estos componentes.
- Se implemento un sistema VLC con nueve diferentes tasas de transmisión siendo la más baja de esta de 4.8 Kbit/s.
- Se logró una tasa de transmisión máxima de 250 Kbit/s con bombillo dimerizable de 14 Watt a una distancia de 50 cm.
- Se implemento una iluminaria para un espacio con dimensiones estándar de una vivienda común con un sistema de VLC el cual lleva a cabo transmisiones en tiempo real.
- La evaluación final con base en los resultados proporcionados indica que existe un grado de confiabilidad elevado según investigaciones realizadas por ITU-T y ANSI/IEEE.

IX. Recomendaciones

- Implementar un filtro de iluminación de luz solar básico con el fin de eliminar por completo las perturbaciones ópticas causadas por la luz solar. Ya que es un sistema el cual tiene contemplado utilizarse en ambientes con ventanas por las cuales puede ingresar este tipo de iluminación al sistema, es altamente recomendable contar con este tipo de filtro.
- Implementar un sistema de comunicación que permita transmitir dos diferentes tipos de información. Esto a su vez implementando un sistema que ya no sea simplex y permita obtener una retroalimentación por parte del receptor.
- De ser posible evitar utilizar el microcontrolador de Arduino ya que no cuenta con funciones básicas utilizadas para crear una comunicación síncrona entre dos dispositivos a menos que ambos estén conectados bajo otro protocolo de comunicación como SPI, I2C o UART. Esto con el fin de evitar un delay de sincronización por parte del fotodiodo el cual capta una secuencia de bits en específico el cual le indicia que es el inicio de una cadena de caracteres.
- Trabajar directamente con circuitos especializados de foto detección rápida, aunque claro este pide componentes especiales que en algunas ocasiones puede resultar costoso y con un tiempo de espera largo de entrega. Utilizando esto pueden obtenerse resultados con una tasa de error binaria menor y con velocidades de transmisión incluso más elevadas. (Ver Anexos, sección B).

X. Bibliografía

Rootherport Sinai. (2013). *VISIBLE LIGHT COMMUNICATION*(roll no:39). Febrero 14 de 2017, de LBS kuttipedia Sitio web: <https://lbsitbytes2010.wordpress.com/2013/03/21/visible-light-communicationroll-no39/>.

Belen Canavillas. (2015). *Comunicaciones de Luz Visible VLC: factores de demanda, beneficios y oportunidades*. Febrero 14 de 2017, de SmartLighting Sitio web: <http://smart-lighting.es/comunicaciones-de-luz-visible-vlc-factores-de-demanda-beneficios-y-oportunidades/>

Dávid Andor Rácz, *Journal of Environmental Sustainability*, 2012, (98) 86-92.

Physics.tutorvista .(2011), *Light Emitting Diode*, Febrero 15 de 2017, Sitio Web: <http://physics.tutorvista.com/electricity-and-magnetism/light-emitting-diode.html>

T. Komine and M. Nakagawa, “*Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights*”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Febrero 15 de 2017, Vol. 50, no. 1, pp. 96-107

Yingjie He ,Liwei Ding, Yuxian Gong, Yongjin Wang, “ *Real-time Audio & Video Transmission System Based on Visible Light Communication*”, (2011), Optics and Photonics Journal 143-159.

Povey, Gordon. (2004), *An IEEE Standard for Visible Light Communications*. 16 de Febrero de 2017. Sitio Web. <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>

Chung Ghiu Lee (2011). *Visible Light Communication, Advanced Trends in Wireless Communications*, Dr. Mutamed Khatib (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/16034. Sitio Web: <https://www.intechopen.com/books/advanced-trends-in-wireless-communications/visible-light-communication>

Visible Light Communications Consortium (VLCC).(2009) *Visible Light Communications Consortium Success in Long-Distance Visible Light Communication Experiment Using Image Sensor Communication*, Retrieved Febrero 18 de 2017, Sitio Web <http://www.reuters.com/article/pressRelease/idUS122756+27-Mar-2009+BW20090327>

G. Gautschi, “*Piezoelectric Sensorics*” SpringerVerlag Berlin Heidelberg (2002).

F. Fernando Santos. “*Desarrollo de un amplificador de transimpedancia para sensores piezoel'ectricos de banda ancha*” Universidad de Buenos Aires, Argentina.

ANSI T1.510-1999, *Network Performance Parameters for Dedicated Digital Services for Rates Up to and Including DS3-Specifications*, American National Standards Institute, New York, NY. www.ansi.org.

"Data Transmission Systems. Bit-Error Rate," Aston University School of Engineering and Applied Science, Birmingham,
UK. www.ee.aston.ac.uk/ik/OptoComm/Lectures/L13_BER.pdf.

"Data Transmission Systems. Bit-Error Rate," Aston University School of Engineering and Applied Science, Birmingham,
UK. www.ee.aston.ac.uk/ik/OptoComm/Lectures/L13_BER.pdf.

TWS-434 TRANSMITTER RWS-434 RECEIVER, Reynolds Electronics (2010)

NCRP, *Radiofrequency Electromagnetic Fields—Properties, Quantities and Units, Biophysical Interaction, and Measurements*, NCRP Report no. 67, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD, 1981.

New Zealand Ministry of Health and Ministry of Environment, "*Managing radiofrequency emissions under the Resource Management Act: An overview*," New Zealand Ministry of Health, December 2000.

IEEE Std C95.1,™1999 Edition, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*.

Nérrou, Jean Pierre, *Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas*, Madrid, Trillas, 1997.

XI. Anexos

A. Fichas técnicas de los diodo emisores de luz utilizados

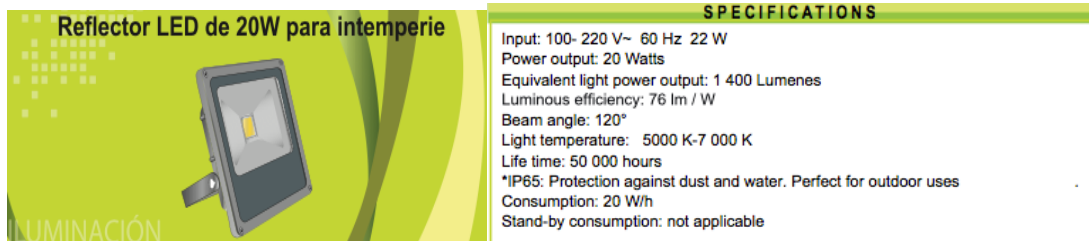
4.

1. Bombillo LED E27 10 Watt

Figura No. 21 Ficha técnica del bombillo LED



2. Reflector LED Sylvania par 80



5.

3. Bombillo LED dimerizable PAR30 14 Watt

Item Number: 19184

Manufacturer: EarthTronics

Manufacturer Part No: L3P314301BDW25C** - Ear

Operating Voltage: 120 VoltTechnology: LEDWatts: 14

Lumens: 850

Shape: PAR30Color Temp: 3000KCRI (Color Rendering Index): 83Benefit: Energy Star Qualified, Closeout, Wet LocationBase Type: Medium E26Common Name of Color Temperature: Warm WhiteDimmable: YesBeam Angle Range: 20-29Incandescent Replacement: 75 Watt

Product Specifications - Quick Reference			
Lamp Wattage:	14 Watts	Dimensions:	3.74" W x 4.61" (MOL)
Working Voltage:	120 Volt	Dimmability:	YES - Dimmable
CRI:	83 CRI	Beam Angle:	25° Spot
Lumens:	850 Lumens	Certifications:	ENERGY STAR, cUL, RoHS, Wet Location
Light Color:	3000K	Warranty:	3 Year Limited

4. Led Ojo de Buey 18 Watt

OJO DE BUEY EMPOTRABLE 18 WATTS

Voltaje: 85 - 265V
 Consumo: 18 Watts
 Ángulo: 120°
 Eficiencia: 75 lm/w
 Lumens: 1,350 lm
 Color: 3,500k / 6,000k
 Factor de Potencia: > 0.9
 Grado de protección: IP20

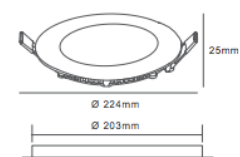
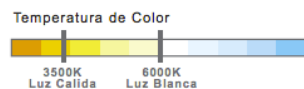


30,000hrs
Horas de Vida

EQUIVALENCIA



Ahorro hasta un 65%



B.Datasheet del fotodiodo S5972

Figura No. 22 Fotodiodo S5972

PHOTODIODE



Si PIN photodiode S5971, S5972, S5973 series

High-speed photodiodes (S5973 series: 1.5 GHz)

S5971, S5972 and S5973 series are high-speed Si PIN photodiodes designed for visible to near infrared light detection. These photodiodes provide wideband characteristics at a low bias, making them suitable for optical communications and other high-speed photometry. S5973 series includes a mini-lens type (S5973-01) that can be efficiently coupled to an optical fiber and a violet sensitivity enhanced type (S5973-02) ideal for violet laser detection.

Features

- High-speed response
 - S5971 : 100 MHz ($V_R=10$ V)
 - S5972 : 500 MHz ($V_R=10$ V)
 - S5973 series: 1 GHz ($V_R=3.3$ V)
- Low price
- High sensitivity
 - S5973-02: 0.3 A/W, QE=91 % ($\lambda=410$ nm)
- High reliability

Applications

- Optical fiber communications
- High-speed photometry
- Violet laser detection (S5973-02)

Figura No. 23 Hoja de datos del foto diodo S5972

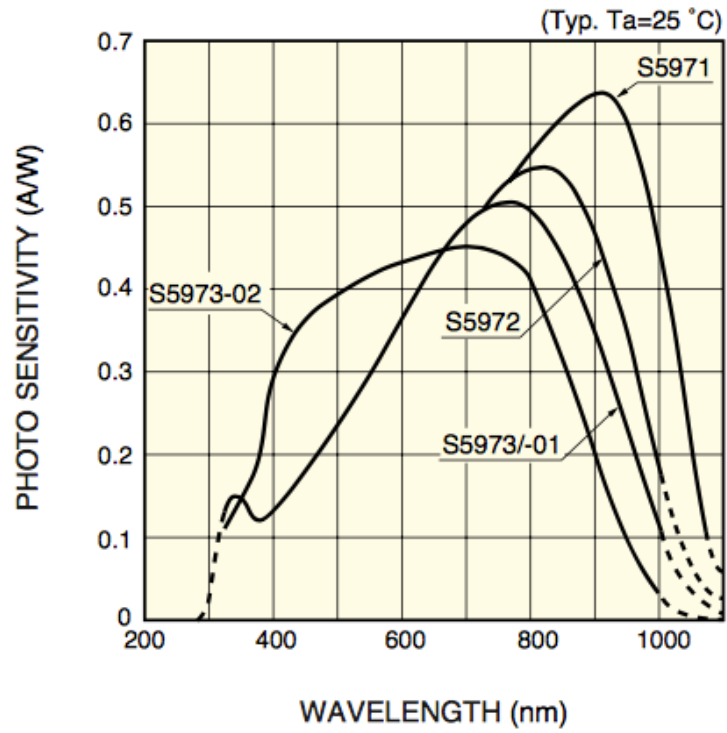
Type No.	Dimensional outline/ Window material *1	Package (mm)	Active area size (mm)	Effective active area (mm ²)	Absolute maximum ratings			
					Reverse voltage V_R Max. (V)	Power dissipation P (mW)	Operating temperature T_{opr} (°C)	Storage temperature T_{stg} (°C)
S5971	①/K	TO-18	$\phi 1.2$	1.1	20	50	-40 to +100	-55 to +125
S5972			$\phi 0.8$	0.5				
S5973			$\phi 0.4$	0.12				
S5973-01	②/L							
S5973-02	③/K							

■ Electrical and optical characteristics

Type No.	Spectral response range λ (nm)	Peak sensitivity wavelength λ_p (nm)	Photo sensitivity S (A/W)				Short circuit current I_{sc} 100 L_x (μ A)	Dark current I_D		Temp. coefficient of I_D T_{CID} (times/°C)	Cut-off frequency f_c (GHz)	Terminal capacitance C_t f=1 MHz (pF)	NEP $V_R=10$ V $\lambda=\lambda_p$ (W/Hz ^{1/2})
			λ_p	660 nm	780 nm	830 nm		$I_{D, Typ.}$ (nA)	$I_{D, Max.}$ (nA)				
S5971	320 to 1060	900	0.64	0.44	0.55	0.6	1.0	0.07 *3	1 *3	1.15	0.1 *3	3 *3	7.4 × 10 ⁻¹⁵
S5972		800	0.57		0.55	0.42	0.01 *3	0.5 *3	0.5 *3		3.1 × 10 ⁻¹⁵		
S5973	320 to 1000	760	0.52	0.51	0.47	0.09	0.42	0.001 *4	0.1 *4	1.5 *4	1.6 *4	1.1 × 10 ⁻¹⁵ *4	
S5973-01													
S5973-02			0.45	0.3 *2	0.42	0.37	0.09					1.9 × 10 ⁻¹⁵ *2, *4	

Figura No. 24 Respuesta espectral del fotodiodo S5972

■ Spectral response



C.Datasheet del fotodiodo S8265

Figura No. 25 Fotodiodo S8265

Type no.	Spectral response range (nm)	Peak sensitivity wavelength (nm)	Photosensitivity $\lambda = \lambda_p$ (A/W)	Dark current $V_{R=1V}$ max. (pA)	Photosensitive area size (mm)	Package	Photo
----------	------------------------------	----------------------------------	--	-----------------------------------	-------------------------------	---------	-------

Filter type (general use)

These are Si photodiodes with visible-compensated filters. The S8265 is a high humidity resistance type of S1133.


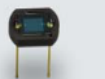


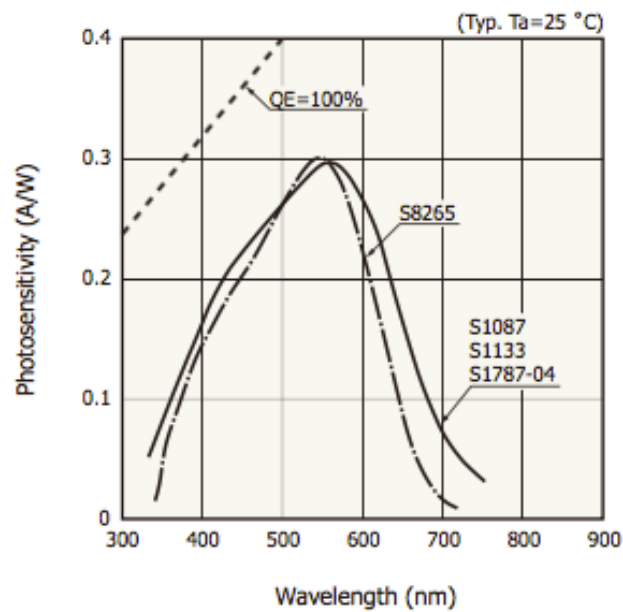
S1087	320 to 730	560	0.3	10	1.3 × 1.3	Ceramic	
S1133					2.4 × 2.8		
S8265	340 to 720	540		20	2.4 × 2.8	Ceramic	
S1787-04	320 to 730	560		10	2.4 × 2.8	Plastic	

Figura No. 26 Respuesta espectral del fotodiodo S5972

Spectral response

S1087, S1133, S1787-04, S8265



KSPDB0277EC

D.Luxómetro utilizado

Figura No. 27 Luxómetro medidor de luminosidad TPM-HER-410

LUXOMETRO Medidor de luminosidad TPM-HER-410



Figura No. 28 Características TPM-HER-410

- Selector de rangos de 1, 10 y 100 Lux
- Frecuencia de muestreo: 2 veces por segundo para datos digitales
 - Pantalla de 3,5 dígitos
 - Mensaje de sobre rango: 1
 - Entrada: 9 Vcc (1 pila de 9 V)
 - Indicador de batería baja
 - Longitud del cable del sensor de luz: 1,5 m
 - Dimensiones del sensor de luz: 5 x 8 x 1,2 cm
 - Dimensiones del equipo: 7 x 12 x 2,5 cm
 - Peso: 140g