

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
COMUNICACIÓN DE LUZ VISIBLE (VLC)**

ANDRÉS FELIPE LÓPEZ GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2015**

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PROTOTIPO DE
COMUNICACIÓN DE LUZ VISIBLE (VLC)**

ANDRÉS FELIPE LÓPEZ GONZÁLEZ

Proyecto de grado

**Director
Ingeniero Ricardo Alfonso Pinto García**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2015**

Nota de aceptación:

El documento y el desarrollo del proyecto que le dirijo al estudiante Andrés Felipe López González, está terminado y por lo tanto aceptado para que pueda ser evaluado por los jurados que nombre el Comité de Investigaciones del programa.

Firma

Nombre: Ricardo Alfonso Pinto García
Director del proyecto de grado

Bogotá, 9 de mayo de 2015

“Lo importante es no dejar de hacerse preguntas”.
Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios dueño de todo conocimiento, a todos mis profesores de la universidad, a los estudiantes del IDII - Italia por la creación de la tarjeta de desarrollo Arduino, a mi familia y amigos por motivar el desarrollo de este trabajo.

Especiales agradecimientos al Ingeniero Ricardo Alfonso Pinto director de este trabajo, quien con su paciencia, motivación y orientaciones pudo llevarse a cabo esta investigación y al Dr. Luis de la Peña docente e investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México, quién a través de sus libros "Cien años de la luz" y "Albert Einstein: Navegante solitario" me llenó de conocimiento e inspiración para el inicio de este proyecto.

Finalmente agradezco a los directivos del programa Ingeniería de Telecomunicaciones quienes han promovido la investigación en áreas novedosas como la desarrollada.

CONTENIDO

GLOSARIO.....	14
RESUMEN.....	16
INTRODUCCIÓN	17
1. NATURALEZA DE LAS ONDAS	18
1.1. DEFINICIÓN Y COMPORTAMIENTO	18
1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS	21
1.2.1. Ondas mecánicas	22
1.2.2. Ondas Electromagnéticas.....	23
1.2.3. El espectro electromagnético.....	24
1.3. LA LUZ	25
1.3.1. El efecto fotoeléctrico	26
1.3.2. Efecto Compton	27
1.3.3. Características de la luz.....	28
1.3.4. Generación de la luz.....	29
1.3.5. Descomposición de la luz.....	30
1.3.6. El espectro de la luz	32
1.3.7. Luz solar.....	34
1.3.8. Luz artificial.....	35

1.3.9.	El ojo humano.....	37
1.3.10.	Teoría del color.....	39
2.	DETECTORES Y FUENTES DE LUZ	41
2.1.	LED	41
2.1.1.	Estructura.....	41
2.1.2.	Características.....	43
2.2.	FOTODETECTORES	44
2.2.1.	Características.....	44
2.2.2.	Fotodetector PIN.....	45
2.2.3.	Fotodetector APD	46
3.	TÉCNICAS DE MODULACIÓN.....	47
3.1.	MODULACIÓN PWM	49
3.2.	MODULACIÓN OOK.....	50
4.	VLC	51
4.1.	CARACTERÍSTICAS	52
4.2.	SERVICIOS.....	53
5.	PROTOTIPO VLC IMPLEMENTADO	54
5.1.	HARDWARE USADO.....	54

5.2.	SOFTWARE UTILIZADO	56
5.3.	PARTES DEL PROTOTIPO	57
5.3.1.	Transmisor	57
5.3.2.	Receptor	58
5.3.3.	Protocolo de comunicación.....	59
5.4.	CIRCUITO IMPLEMENTADO	60
5.5.	ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN.....	61
5.5.1.	Análisis del rendimiento del sistema.....	61
5.5.2.	Análisis de la longitud del enlace	66
6.	CONCLUSIONES.....	72
7.	RECOMENDACIONES	74
	BIBLIOGRAFÍA	75
	ANEXOS.....	80

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Espectro Electromagnético	25
Cuadro 2. Características de la luz	28
Cuadro 3. Valores de índice de refracción para algunas sustancias.	31
Cuadro 4. Valores de índice de refracción de acuerdo a longitud de onda.	32
Cuadro 5. Espectro de la luz	33
Cuadro 6. Tabla de Materiales LED	42
Cuadro 7. Descripción de la luz emitida por el led RGB	55
Cuadro 8. Arduino Tx loop()	62
Cuadro 9. Arduino Rx loop()	62
Cuadro 10. Cuadro comparativo de Voltaje x Distancia	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Características de una onda periódica	18
Figura 2. Refracción	20
Figura 3. Interferencia	20
Figura 4. Interferencia constructiva y destructiva	20
Figura 5. Difracción	21
Figura 6. Onda polarizada	21
Figura 7. Onda Longitudinal	22
Figura 8. Onda Transversal	22
Figura 9. Onda electromagnética	23
Figura 10. Efecto Fotoeléctrico	27
Figura 11. Flujo luminoso.	28
Figura 12. Intensidad luminosa	29
Figura 13. Desviación de la luz a través de un prisma.	32
Figura 14. Resumen del espectro electromagnético	33
Figura 15. Espectro visible (λ).	34
Figura 16. Foco Incandescente.	36
Figura 17. Lámpara fluorescente compacta (LFC).	37

Figura 18. Lámpara LED	37
Figura 19. Ojo humano	38
Figura 20. Diagrama de bloques	38
Figura 22. Modelo RGB	39
Figura 23. Modelo de color CMYK	40
Figura 24. Estructura interna de un LED	42
Figura 25. Diferencia de intensidad luminosa entre dos led	43
Figura 26. Patrones de radiación LED	44
Figura 27. Fotodetector PIN	46
Figura 28. Fotodetector APD	46
Figura 29. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación	47
Figura 30. Modulación AM	48
Figura 31. Árbol de modulación por pulsos	49
Figura 32. Modulación PWM	49
Figura 33. OOK-NRZ y OOK-RZ	50
Figura 34. Prototipo LiFi creado por Oledcomm	52
Figura 35. VLC vs RF	53
Figura 36. Prototipo VLC	54

Figura 37. Arduino UNO	54
Figura 38. Led RGB 8mm	55
Figura 39. Descripción de un led RGB	55
Figura 40. Fotodiodo BPW21	56
Figura 41. Diagrama de bloques: Transmisor	57
Figura 42. Diagrama de bloques: Receptor.	58
Figura 43. Detección y autocorrección de señal a reloj	59
Figura 44. Datagrama a menor escala con protocolo de comunicación	60
Figura 45. Circuito transmisor	60
Figura 46. Circuito receptor	61
Figura 47. Esquema de medición espectral de un LED.	63
Figura 48. Fotografía de un espectroscopio	63
Figura 49. Tren de pulsos	64
Figura 50. Respuesta de led RGB a 0.5 Kbps	64
Figura 51. Respuesta de led RGB a 1 Kbps	64
Figura 52. Respuesta de led RGB a 1.5 Kbps	65
Figura 53. Rendimiento por dispositivo	65
Figura 54. Ley cuadrática Inversa	66

Figura 55. Voltaje x Distancia	67
Figura 56. Transmitiendo la palabra “hola”	68
Figura 57. Recibiendo la palabra “hola”	68
Figura 58. Proceso de transmisión y recepción	69
Figura 59. BER con 0 cm de distancia	69
Figura 60. BER con 3 cm de distancia	70
Figura 61. BER con 5 cm de distancia	70
Figura 62. BER con 10 cm de distancia	71
Figura 63. BER x Distancia	71
Figura 64. Montaje utilizado para la recepción de la señal, utilizando el fotodiodo BPW21 y tarjeta Arduino.	80
Figura 65. Montaje utilizado para la transmisión de la señal, utilizando una arreglo de tres leds RGB y tarjeta Arduino.	81
Figura 66. Receptor y transmisor separados a 3 cm aproximadamente, antes de comenzar la transmisión.	82
Figura 67. Foto panorámica del receptor y transmisor en funcionamiento.	83

GLOSARIO

APD: diodo de avalancha

ASK: amplitude shift keying

BER: bit error ratio

CES: consumer electronics show

CMYK: cyan, magenta, yellow, key o black

EM: electro-magnético

ETRI: electronics and telecommunications research institute

GPS: global position system

IEEE: instituto de ingeniería eléctrica y electrónica

IM/DD: intensity modulation with direct detection

IR: infrarrojo

LC: bobina L y condensador C

LD: diodo láser

LED: diodo emisor de luz

LFC: lámpara fluorescente compacta

NEP: potencia de ruido equivalente

NRZ: non return to zero

OOK: on-off keying

OWC: optical wireless communications

PAM: pulse amplitude modulation

PCL: power line communication

PIN: diodo de capas P-I-N

PWM: pulse width modulation

RF: radio frecuencia

RGB: red, green, black

RMS: root mean square o valor eficaz

RZ: return to zero

SNR: signal to noise ratio

USB: universal serial bus

UV: ultravioleta

VLC: visible light communication

VLCC: visible light communications consortium

RESUMEN

A lo largo de este documento, se expone el fenómeno de la luz en aplicaciones de iluminación y transmisión de datos, y la utilización de LED y fotodiodos aplicables a la tecnología VLC. Se describe también el proceso de implementación de un prototipo de transmisión de datos, utilizando la luz como portadora y el espacio libre como medio de propagación, a través del empleo de tarjetas de desarrollo Arduino y modulación OOK (On-Off Keying). También se desarrolla una técnica de reconstrucción de la señal a reloj en el dispositivo receptor a través de la implementación de un protocolo de comunicación, con los cuales se pueden alcanzar velocidades de hasta 1 Kbps.

PALABRAS CLAVE:

OOK, RGB, señal a reloj, luz visible, VLC, sistema de comunicación, Arduino, LED.

INTRODUCCIÓN

En una descripción breve y desde el punto de vista físico, el fenómeno de la luz es explicado a lo largo del documento, indicando la utilidad que tiene no solo para dispositivos de iluminación sino también para objetos de transmisión de información. Si se habla del uso que ha tenido a través de los tiempos el espectro electromagnético, se nota que el desarrollo de las comunicaciones depende en gran manera del desarrollo de la electrónica, porque aunque se hayan diseñado técnicas de modulación, multiplexación y tecnologías para la manipulación de las ondas, es necesario también contar con elementos que permitan la generación, detección y modificación de las mismas para adecuarlas a los medios y a los servicios, este trabajo se soporta en esos desarrollos electrónicos con el fin de hacer útil una técnica novedosa que usa la luz como portadora para poder transmitir grandes velocidades en la transmisión de datos, denominada VLC (Visible Light Communication).

A partir de la búsqueda y clasificación de información científica en bases de datos, se puede advertir que el estado del arte de esta tecnología está en proceso de estandarización y maduración y abierta a propuestas para el diseño de sistemas que permitan llegar a un punto de convergencia con las tecnologías actuales de comunicación. Así, en este documento se ha descrito todo el proceso de implementación de un prototipo VLC, con recursos básicos que pueden posteriormente ampliarse para aplicaciones más robustas. En el prototipo desarrollado se muestran los principios básicos de la transmisión de datos a través de luz en el espacio libre y se analizan las distintas variables que intervienen en el proceso. Este trabajo permitirá también que mediante desarrollos y proyectos de investigación futuros se perfeccione la implementación para lograr aplicaciones más visibles y prácticas.

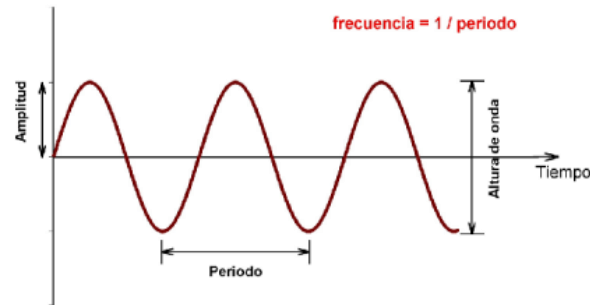
El documento se ha dividido en seis capítulos, de manera que en el capítulo uno se describe la luz como fenómeno físico, en el capítulo dos se exponen los dispositivos electrónicos que se usan para la detección y generación de la luz, en el capítulo tres se desarrolla el sistema de modulación usado (OOK: On-Off Keying), en el capítulo cuatro se explica la tecnología VLC además de sus posibles aplicaciones, en el capítulo cinco se describe el proceso realizado para la implementación del prototipo y en el capítulo seis se escriben las conclusiones y recomendaciones que surgen a partir de los resultados obtenidos.

1. NATURALEZA DE LAS ONDAS

1.1. DEFINICIÓN Y COMPORTAMIENTO

Una onda se define como una perturbación en el espacio-tiempo que causa vibraciones sobre algún elemento, también como un desplazamiento permanente o como el transporte de energía sin materia. Existen varios tipos de ondas, aquellas que requieren de un medio y aquellas que no requieren de un medio para propagarse. En la figura 1, se puede observar una onda de tipo periódica, dónde se indican las distintas características de una onda, tales como la amplitud, periodo y frecuencia.

Figura 1. Características de una onda periódica



Fuente: (<http://www.acusticaintegral.com/3309/el-oido-humano-el-decibelio-y-el-dba/>, Descargado en noviembre de 2014)

Las ondas presentan comportamientos típicos, que permiten identificarlas, tales como: reflexión, refracción, interferencia, difracción y polarización.

- **Reflexión:** existen dos tipos de reflexión, la reflexión especular y la reflexión difusa. La reflexión especular es el cambio de dirección que experimenta una onda cuando incide sobre una superficie reflectora lisa sin cambiar de medio de propagación. La reflexión difusa, se presenta cuando la reflexión se produce sobre una superficie rugosa y por ende, la onda se refleja en todas las direcciones, aquí la onda sufre mayor atenuación debido a que su energía es distribuida de forma incoherente.
- **Refracción:** es el cambio de dirección y de velocidad que experimenta una onda cuando atraviesa de un medio a otro, tal y como se explica en la figura 2. Cada medio presenta un índice de refracción característico y viene dado por la ecuación:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Dónde,

n = índice de refracción del medio.

c = velocidad de propagación de la onda en el vacío o velocidad de la luz.

v = velocidad de propagación de la onda en el medio.

De la fórmula (1.1), se puede inferir que a medida que una onda se propaga y ésta a su vez cambia de medio, puede variar en longitud de onda (λ) pero no en frecuencia (f), esto debido a que su velocidad de propagación cambia. Cabe recordar la relación de frecuencia:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1.2)$$

Dónde,

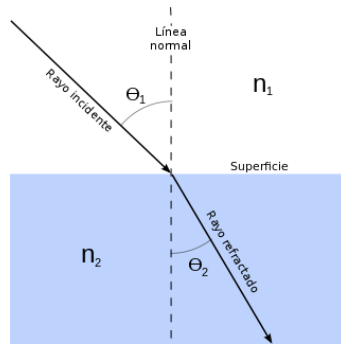
f = frecuencia en Hz.

v = velocidad de propagación.

λ = longitud de onda.

- **Interferencia:** es la superposición o suma de dos o más ondas que generan una onda de mayores características o que provocan la anulación de las mismas tal y como se muestra en la figura 3. Dependiendo principalmente de las amplitudes, longitudes de onda y de la distancia aparente entre las mismas, se identifican dos tipos de interferencias: constructiva y destructiva. En la figura 4 se puede observar con detalle estos dos tipos de interferencias.
- **Difracción:** es la propiedad que poseen las ondas de rodear los obstáculos en determinadas condiciones. Cuando una onda enfrenta un obstáculo de dimensiones similares a su longitud de onda, la onda se convierte en un nuevo foco emisor de la onda; cuanto más parecida es la longitud de onda al obstáculo mayor es el fenómeno de difracción, tal y como se muestra en la figura 5.

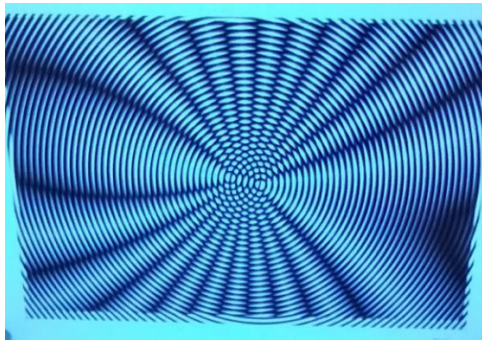
Figura 2. Refracción



Fuente:

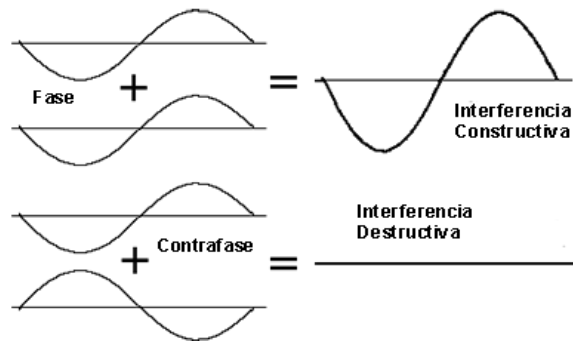
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/63/Refracción.svg/400px-Refracción.svg.png>, Descargado en noviembre de 2014)

Figura 3. Interferencia



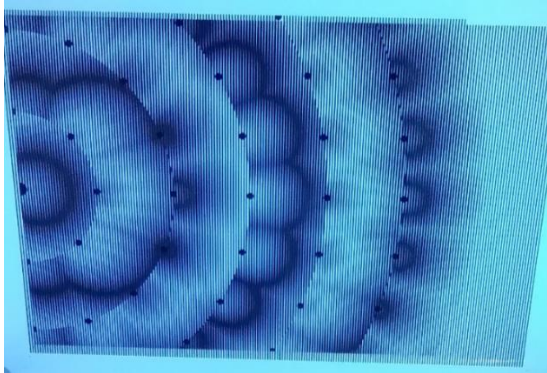
Fuente: (Mochán, Luis, 2014)

Figura 4. Interferencia constructiva y destructiva



Fuente: (Georgia State University, 2014)

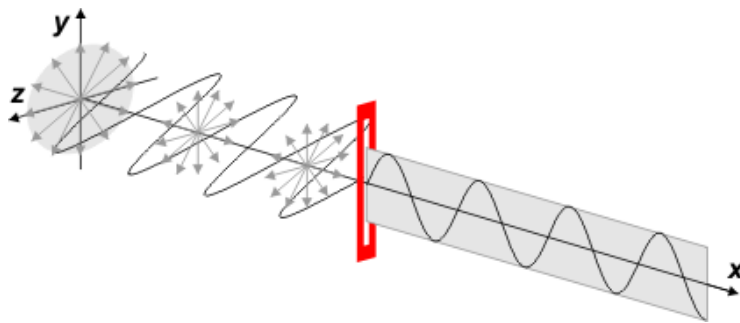
Figura 5. Difracción



Fuente: (Mochán, Luis, 2014)

- **Polarización:** es la acción de imprimir una dirección definida a las perturbaciones de una onda. La polarización de una onda puede ser manipulada, al utilizar una rendija tal y como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Onda polarizada



Fuente: (http://ricuti.com.ar/No_me_salén/ONDAS/Ap_ond_04.html, Descargado en noviembre 2014)

1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS

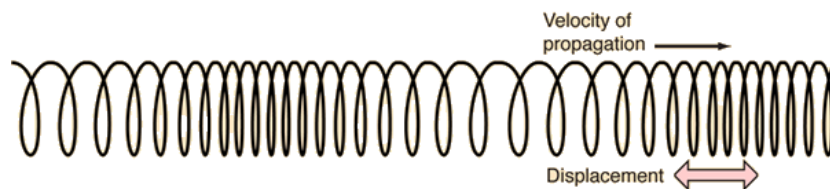
Las ondas se han clasificado en dos grandes grupos de acuerdo a su naturaleza: ondas mecánicas y ondas electromagnéticas.

1.2.1. Ondas mecánicas

En este grupo se encuentran las ondas sonoras, ondas en el agua, ondas en una cuerda y se clasifican de esta forma debido a que requieren de un medio para propagarse, alterando las propiedades mecánicas de sus elementos. Este tipo de ondas, se han subdividido de la siguiente forma:

- **Ondas longitudinales:** son aquellas ondas que generan vibraciones de forma paralela a la dirección de propagación tal y como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Onda Longitudinal

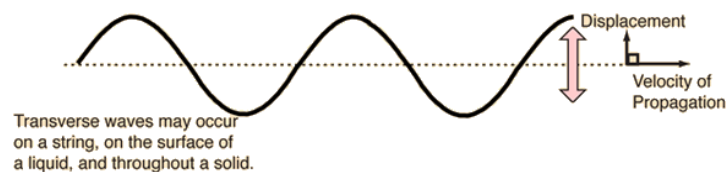


Fuente: (Georgia State University, 2014)

El sonido es una onda longitudinal que se propaga en el aire a una velocidad entre 330 m/s - 350 m/s (dependiendo de la temperatura del aire).

- **Ondas transversales:** son aquellas ondas que generan vibraciones perpendicularmente a la dirección de propagación tal y como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Onda Transversal



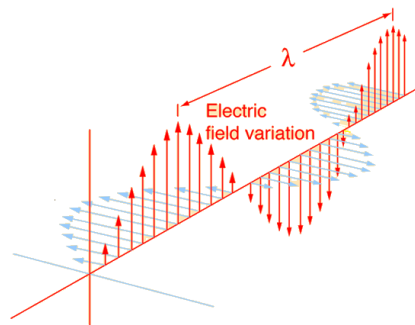
Fuente: (Georgia State University, 2014)

Las ondas secundarias de un terremoto serían un ejemplo en ondas transversales de tipo mecánico.

1.2.2. Ondas Electromagnéticas

Son ondas transversales que pueden propagarse a través del espacio vacío, es decir, no requieren de un medio. En este grupo se encuentran las ondas de radio, los rayos Infrarrojos, la luz visible, Los rayos Ultravioleta, los rayos X, los rayos Gamma, los rayos Cósmicos.

Figura 9. Onda electromagnética



Fuente: (Georgia State University, 2014)

En la Figura 9, se puede observar cómo el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético y estos a su vez perpendiculares a la dirección de propagación, esto es conocido como la Ley de la mano derecha.

Las ondas electromagnéticas, presentan las siguientes características:

- Los campos generados por cargas en movimiento abandonan las fuentes y viajan a través del espacio vacío, creándose y recreándose mutuamente.
- Las radiaciones electromagnéticas se propagan en el vacío a la velocidad de la luz c . Este valor se deduce de las ecuaciones de Maxwell y se simplifica en:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1.3)$$

Dónde,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$ es la permeabilidad del vacío.

$\epsilon_0 = 8,85418 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}$ es la permitividad del vacío.

- Los campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. Estos campos se representan matemáticamente por las ecuaciones (1.4) y (1.5).

$$E_{max} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (1.4)$$

$$B_{max} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (1.5)$$

Dónde,

$$\frac{E_{max}}{B_{max}} = \frac{\omega}{k} = c \quad (1.6)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.7)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (1.8)$$

- La velocidad, longitud de onda y frecuencia de una onda electromagnética se encuentran relacionadas por la expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.9)$$

- Las ondas electromagnéticas se diferencian por su longitud de onda (λ).
- Las ondas electromagnéticas conducen energía y momento aún en el vacío, de tal forma que en su propagación transfieren energía a objetos ubicados en su trayectoria.
- La potencia (medida en Watts) de una onda electromagnética hace referencia a la cantidad de energía por unidad de tiempo.

1.2.3. El espectro electromagnético

De acuerdo a los avances tecnológicos, se ha logrado generar y detectar ondas electromagnéticas, lo cual ha generado la necesidad de ordenar el uso de las distintas frecuencias. Esto se considera como el espectro electromagnético, el cual se ha dividido en diferentes regiones cuyos límites son relativamente arbitrarios y

se han ordenado, de acuerdo a las aplicaciones que se han ido descubriendo con el paso del tiempo para cada una de ellas, tal y como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Espectro Electromagnético

Nombre	Abreviatura	Banda ITU	Frecuencias (f)	Lambda (λ)
Radio				
Extra baja frecuencia	ELF	1	3-30 Hz	100.000 - 10.000 Km
Super baja frecuencia	SLF	2	30 - 300 Hz	10.000 - 1.000 Km
Ultra baja frecuencia	ULF	3	300 - 3000 Hz	1.000 - 100 Km
Muy baja frecuencia	VLF	4	3 - 30 kHz	100 - 10 Km
Baja frecuencia	LF	5	30-300 kHz	10 - 1 Km
Media frecuencia	MF	6	300-3000 kHz	1 Km - 100 m
Alta frecuencia	HF	7	3 - 30 MHz	100 - 10 m
Muy alta frecuencia	VHF	8	30 - 300 MHz	10 - 1 m
Ultra alta frecuencia	UHF	9	300 - 3000 Mhz	1 m - 100 mm
Super alta frecuencia	SHF	10	3 - 30 GHz	100 - 10 mm
Extra alta frecuencia	EHF	11	30 - 300 GHz	10 - 1 mm
Infrarrojo				
Lejano			300 GHz - 6 THz	1000 - 50 μ m
Medio			6 - 120 THz	50 - 2.5 μ m
Cercano			120 - 430 THz	2.5 μ m - 700 nm
Luz Visible				
Gama de colores			430 - 790 THz	700 - 380 nm
Ultravioleta				
UV-A			790 - 952 THz	380 - 315 nm
UV-B			952 THz - 1 PHz	315 - 280 nm
UV-C			1 PHz - 30 PHz	280 - 10 nm

Fuente: (<http://www.astrofisicayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html>, Descargado en noviembre de 2014)

1.3. LA LUZ

A través del tiempo, la definición y comprensión de este fenómeno natural, ha ido evolucionando a partir de trabajos desarrollados por Christian Huygens (1629 – 1695, pionero en afirmar que la luz es una onda), Isaac Newton (1642 – 1727, quién logró explicar el fenómeno de difracción existente en las ondas de luz), Thomas Young (1773 – 1829, afirmó que la luz es una onda de tipo transversal), Max Planck (1858 – 1947, demostró matemáticamente el origen de las ondas electromagnéticas), Albert Einstein (1879 – 1955, obtuvo el premio nobel de física por su trabajo del Efecto Fotoeléctrico), Arthur H. Compton (1892 – 1962, desarrolló el trabajo del Efecto Compton), entre muchos otros. Cada uno de esos estudios

permitieron definir a la luz como una forma de energía que se manifiesta de dos formas, como onda electromagnética y como partícula, esta última posteriormente denominada con el término “fotón” por Gilbert N. Lewis (1875 – 1946).

En este trabajo se analizarán y aplicarán las propiedades ondulatorias de la luz con el fin de explicar y desarrollar las técnicas de transmisión de datos más apropiadas al contexto. De igual manera es necesario realizar una breve explicación del *Efecto Fotoeléctrico* y del *Efecto Compton*, los cuales explican la naturaleza cuántica de la luz y son la base del funcionamiento de los dispositivos electrónicos utilizados en el prototipo desarrollado en este trabajo.

1.3.1. El efecto fotoeléctrico

El Efecto Fotoeléctrico, es el proceso de colisión inelástica entre dos partículas, un fotón y un electrón, en el cual el fotón cede toda su energía al electrón¹ tal y como se explica en la figura 10. Sus características principales son²:

- Para cada material hay una frecuencia mínima o umbral de la radiación electromagnética por debajo de la cual no se producen fotoelectrones.
- La emisión electrónica aumenta cuando se incrementa la intensidad de la radiación que incide sobre la superficie de un material conductor, esto debido a que existe más energía disponible para liberar electrones.
- La cantidad de energía por fotón de una onda electromagnética depende de su frecuencia y es calculada con la siguiente expresión:

$$E = h \cdot f \quad (1.11)$$

Dónde,

E = energía del fotón en J

$h = 6,628 \times 10^{-34} J \cdot s$ es la constante de Planck.

f = frecuencia en Hz.

- No se presenta en todas las frecuencias de radiación electromagnética.
- Este fenómeno es expresado en la ecuación (1.12)³.

¹ (Castañeda & Ewert, 2008)

² (Vasco, 2015)

³ (Castañeda & Ewert, 2008)

$$K_{max} = h\nu - \phi_0 \quad (1.12)$$

Dónde,

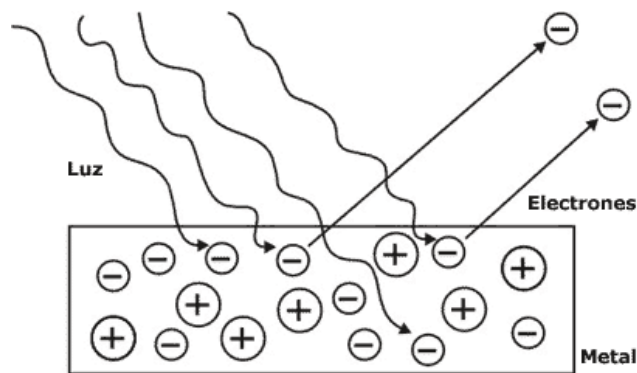
K_{max} = energía máxima cinética que puede tener un electrón al salir del material.

h = constante de Planck, $6,62606896 \times 10^{-34}$ J/s.

ν = frecuencia umbral.

ϕ_0 = energía necesaria para el desprendimiento o función de trabajo.

Figura 10. Efecto Fotoeléctrico



Fuente: (ILCE, 2014)

1.3.2. Efecto Compton

El desarrollo del Efecto Fotoeléctrico realizado por Albert Einstein, no consideró que un fotón tiene un momento lineal o inercia, y por esta razón, Compton mediante la ecuación (1.13) encuentra la relación que existe entre la energía y la cantidad de movimiento de un fotón que viaja a la velocidad de la luz⁴.

$$E = p \cdot c \quad (1.13)$$

Dónde,

E = energía resultante.

p = cantidad de movimiento o inercia del fotón.

c = velocidad de la luz en el vacío.

⁴ (Córdoba, El Efecto Compton, 2015)

El Efecto Compton es la confirmación experimental de la naturaleza corpuscular de la radiación electromagnética, lo que significa que todo el espectro electromagnético es de naturaleza dual: partícula y onda.

1.3.3. Características de la luz

Un rayo luminoso posee características que pueden llegar a ser medidas. De acuerdo a estas características, las cuales se pueden observar en el cuadro 2, se definen las aplicaciones que una fuente de luz puede llegar a tener.

Cuadro 2. Características de la luz

Magnitud	Unidad	Símbolo
Flujo luminoso	Lumen (lm)	ϕ
Intensidad luminosa	Candela (cd)	I
Iluminancia	Lux (lx)	E

Fuente: (Universidad de Alcalá, 2001)

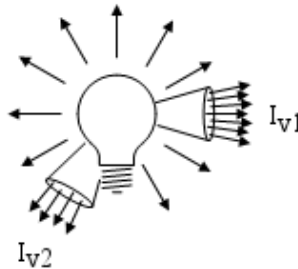
- **Flujo luminoso:** hace referencia a la suma de componentes radiadas por una fuente de luz hacia todas las direcciones sin importar el patrón de radiación de la fuente, tal y como se puede observar en la figura 11.
- **Intensidad luminosa:** hace referencia al flujo luminoso que existe en un ángulo determinado tal y como se muestra en la figura 12.
- **Iluminancia:** hace referencia a la intensidad luminosa que existe por área, cuando la luz se encuentra viajando en una determinada dirección.

Figura 11. Flujo luminoso.



Fuente: (<http://www.giangrandi.ch/optics/lmcdcalc/lmcdcalc.shtml>, Descargado en enero de 2015)

Figura 12. Intensidad luminosa



Fuente: (<http://www.giangrandi.ch/optics/lmcdcalc/lmcdcalc.shtml>, Descargado en enero de 2015)

1.3.4. Generación de la luz

La luz puede generarse de dos formas, por luminiscencia o por incandescencia.

1.3.4.1. Por luminiscencia. La luminiscencia, puede definirse como una forma de "luz fría" en la que la emisión de radiación lumínica es generada en condiciones de temperatura baja o normal. Este proceso se ha subdividido en diferentes clases:

- **Quimioluminiscencia:** es el fenómeno de emisión de radiación electromagnética, ultravioleta o visible, que se observa cuando una especie electrónicamente excitada, producida por una reacción química a temperatura ambiente regresa a su estado fundamental.
- **Bioluminiscencia:** ocurre en un organismo vivo o en sistemas químicos derivados de éstos, generando reacciones quimioluminogénicas enzimáticas. Un ejemplo de esto son las luciérnagas.
- **Electroluminiscencia:** hace referencia a la emisión de luz por parte de un material o sustancia cuando éste es sometido a la aplicación de algún voltaje. Un ejemplo de la naturaleza de este fenómeno son los rayos.
- **Fotoluminiscencia:** este es el fenómeno descrito en el "Efecto Fotoeléctrico", en donde una sustancia o material absorbe fotones y luego radía fotones. Es una técnica relevante para la medición de pureza y calidad cristalina de semiconductores; también es útil para la medición de la vida útil de elementos como el arseniuro de galio.

- **Fluorescencia:** Hace referencia al fenómeno mediante el cual una sustancia puede liberar energía y posterior a esto emitirla en forma de luz pero, a diferencia de la fosforescencia, lo hace de forma inmediata.
- **Fosforescencia:** Hace referencia al fenómeno mediante el cual una sustancia puede "almacenar" energía y posterior a esto emitirla en forma de luz. Es decir en el momento en que sobre la sustancia inciden fotones, la energía suministrada por éstos es lentamente liberada.

1.3.4.2. Por incandescencia. La incandescencia puede definirse como el fenómeno de emisión de luz debido a la energía calorífica o altas temperaturas en las que es sometido un cuerpo, el cual, emite una radiación luminosa que es, además, característica de cada sustancia. Este es el fenómeno observado cuando un metal es "calentado al rojo" al igual cuando una bombilla que posee un filamento de wolframio, es atravesado por corriente eléctrica, y por tal motivo alcanza la incandescencia emitiendo una luz brillante.

1.3.5. Descomposición de la luz

El arco iris es el mejor ejemplo para explicar la descomposición de la luz, el arco iris es un fenómeno meteorológico producido por los rayos solares que atraviesan las gotas de agua presentes en la atmósfera, descomponiendo la luz solar en todas las longitudes de onda que estructuran el espectro visible: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo, violeta. Para explicar este fenómeno, se debe tener en cuenta el índice de refracción de cada material, ya que como la luz se refracta al atravesar de un medio a otro, que en este caso es una gota de agua, sus componentes presentan un ángulo de desviación al salir de ésta. Este fenómeno se puede representar matemáticamente utilizando la Ley de Snell indicado en la ecuación (1.14) y en la ecuación (1.15) correspondiente al índice de refracción del material (n).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.14)$$

Dónde,

n_1 = *índice de refracción medio inicial.*

θ_1 = *ángulo de incidencia inicial.*

n_2 = *índice de refracción medio secundario.*

θ_2 = *ángulo de refracción dentro del medio secundario.*

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.15)$$

Dónde,

n = índice de refracción del medio.

c = velocidad de propagación de la onda en el vacío o velocidad de la luz.

v = velocidad de propagación de la onda en el medio.

La Ley de Snell indica que un haz de luz se desvía a diferentes ángulos cuando incide sobre un material refractante⁵. El índice de refracción es una relación entre el ángulo de incidencia inicial con el que se emite un haz de luz, sobre el ángulo que forma el haz de luz al salir del material. Esta refracción se debe al cambio de velocidad que experimenta el haz de luz dentro del material atravesado, permitiendo que su longitud de onda cambie. En el cuadro 3 se pueden observar los valores típicos del índice de refracción para algunas sustancias.

Cuadro 3. Valores de índice de refracción para algunas sustancias.

Sustancia	Índice de refracción
Diamante (C)	2,419
Fluorita (CaF_2)	1,434
Silice (SiO_2)	1,458
Vidrio, óptico	1,52
Cristal	1,66
Hielo (H_2O)	1,309
Poliestireno	1,49
Cloruro de sodio ($NaCl$)	1,544
Circón	1,923
Vacío	1

Fuente: (Serway, 1997)

Los valores de índice de refracción medidos sobre un prisma de vidrio, se pueden observar en el cuadro 4. En el cuadro 4 se puede observar que para ondas de mayor frecuencia ($\lambda = 434 \text{ nm}$), la velocidad de propagación es más baja dentro del medio refractante que para las ondas de menor frecuencia ($\lambda = 640 \text{ nm}$), esto podría

⁵ (Serway, 1997)

explicar el por qué esta característica es perceptible en el espectro visible y no en el espectro de radio.

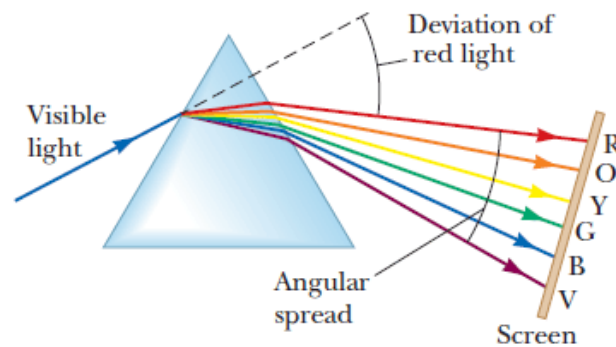
Cuadro 4. Valores de índice de refracción de acuerdo a longitud de onda.

Color	Longitud de onda (nm)	Índice de refracción
Rojo	640	1,50917
Amarillo	589	1,51124
Verde	509	1,51534
Azul	486	1,51690
Violeta	434	1,52136

Fuente: (UPV, 2015)

En la figura 13 se puede observar cómo un haz de luz es descompuesto al atravesar un prisma, este principio es el utilizado en los dispositivos utilizados para la detección de luz (filtros).

Figura 13. Desviación de la luz a través de un prisma.



Fuente: (<http://narodnoeveche.org/ppt-on-refraction-of-light.htm>, Descargado en febrero de 2015)

1.3.6. El espectro de la luz

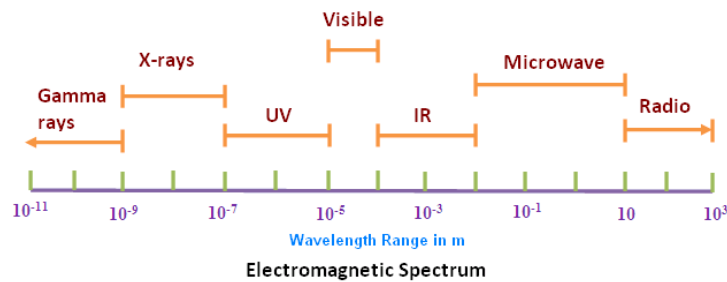
Las reacciones nucleares internas de una estrella, se deben a la conversión de Hidrógeno en Helio, este proceso libera energía pura y parte de esta energía es

radiada como luz blanca⁶. Esta luz, generada por incandescencia, es la que llega al planeta Tierra, en este caso del sol, sufriendo procesos de refracción al momento en que incide sobre la atmósfera. Parte de esta luz es absorbida y reflejada, en gran porción, como luz violeta y azul, tal es la razón por la que el firmamento de la Tierra se torna de estos colores, provocando que la atmósfera se comporte como un filtro. El espectro de luz es la composición de sub-regiones espectrales demostradas en el cuadro 5. En la figura 14, se puede observar un breve resumen del espectro electromagnético que permite evidenciar la pequeña región del espectro que es visible para el ojo humano.

Cuadro 5. Espectro de la luz

Región espectral	Rango en f	Total β
Infrarrojo (IR)	300 GHz - 430	429 THz
Visible	430 THz - 790	360 THz
Ultravioleta (UV)	790 THz - 30 PHz	29.21 PHz

Figura 14. Resumen del espectro electromagnético



Fuente: (<http://physics.tutorvista.com/waves/wavelength-spectrum.html>,
Descargado en febrero de 2015)

En la figura 15, se puede observar con mayor detalle cómo la región del espectro visible es dividida y percibida por el ojo humano. Sin embargo posee un gran ancho de banda, por debajo del espectro infrarrojo y del espectro de los rayos Ultravioleta (UV) tal y como se muestra en el cuadro 5.

⁶ un experimento que comprueba que la luz porta energía es el radiómetro de Crookes.

Figura 15. Espectro visible (λ).

Color	Frecuencia	Longitud de onda
Violeta	668–789 THz	380–450 nm
Azul	631–668 THz	450–475 nm
Ciano	606–630 THz	476–495 nm
Verde	526–606 THz	495–570 nm
Amarillo	508–526 THz	570–590 nm
Naranja	484–508 THz	590–620 nm
Rojo	400–484 THz	620–750 nm

Fuente: (CATEDU, 2015)

1.3.7. Luz solar

La luz solar es el espectro total de radiación emitida por el sol, debido a su gran temperatura. La luz directa del sol, suministra alrededor de 93 lúmenes de iluminación por vatio de potencia, incluyendo espectro infrarrojo, espectro visible y espectro ultravioleta. La intensidad luminosa es de aproximadamente 100,000 candelas por metro cuadrado en la superficie terrestre, teniendo en cuenta que una vela produce alrededor de una candela de intensidad luminosa. Su composición puede dividirse de la siguiente manera⁷:

- Ultravioleta C (rayos UV-C), se expanden en el rango de los 10 a los 280 nm. Debido a la absorción de la atmósfera solo una pequeña porción de estos llega a la superficie de la Tierra (Litósfera). Este espectro de radiación es usualmente utilizado para objetivos germicidas, por lo que algunos equipos denominados esterilizadores ultravioleta la utilizan para la purificación de aire, agua o de superficies.
- Ultravioleta B (rayos UV-B), se expanden en el rango de los 280 a los 315 nm. Es también absorbida en gran cantidad por la atmósfera, y junto a la UV-C es causal de las reacciones fotoquímicas que provoca la producción de la capa de ozono.
- Ultravioleta A (rayos UV-A), se expanden en el rango de los 315 a los 380 nm. Estos rayos son catalogados como menos dañinos para el ADN.
- Rango visible o luz que se expande en el rango de los 380 a los 700 nm. La suma de sus componentes da origen a la luz blanca, la cual puede ser refractada mediante un prisma.

⁷ (EcuRed, 2015)

- Rango infrarrojo que se expande en el rango de los 700 nm a los 1000 μm . Esta radiación, es la principal responsable del calentamiento o calor que proporciona el sol.

1.3.8. Luz artificial

Se denomina luz artificial, a toda fuente de luz creada por el ser humano. Comenzando por quemar o calentar materiales se crearon lámparas de llama. Posterior a esto y con el descubrimiento de la electricidad han surgido un sinnúmero de lámparas, dentro de las que se encuentra a las incandescentes, las fluorescentes y las led. Cada una de ellas satisface diferentes necesidades de iluminación y el tipo de luz que ofrecen es distinto. Con la fabricación de lámparas de distinta tecnología, se ha logrado aumentar la eficiencia de las mismas, incrementando el porcentaje de potencia utilizado en luz y disminuyendo el porcentaje que se desperdicia en calor.

A continuación se hará una breve descripción de las lámparas más comunes en el mercado.

- **Foco incandescente:** un foco incandescente está constituido, normalmente, por un casquillo metálico, una bombilla de vidrio y, en su interior, un delgado filamento de tungsteno sujeto en sus extremos por un alambre de cobre. A la bombilla se le retira el aire y se le inyecta un gas inerte, habitualmente argón, que ayuda a prolongar la vida del filamento. Cuando se hace atravesar una corriente eléctrica por el filamento, su temperatura aumenta a niveles que llegan hasta los 2500 C, emitiéndose luz visible y radiación infrarroja que se manifiesta como calor. El 95% de la energía eléctrica que requiere un foco de este tipo se disipa al medio ambiente en forma de calor y sólo el 5% de la energía consumida se transforma en luz visible. La vida útil de estos focos es de, aproximadamente, entre 750 a 1000 horas de uso continuo. La lámpara incandescente halógena de tungsteno es una variante más que brinda mayor calidad en la luz generada y eficiencia en el uso de la energía (menor porcentaje desperdiciado en calor). En la figura 16 se puede observar este tipo de foco.

Figura 16. Foco Incandescente.



Fuente: (<https://lastresyuncuarto.files.wordpress.com/2011/07/foco.jpg>,
Descargado en febrero de 2015)

- **Lámpara Fluorescente compacta (LFC):** por lo general, se compone de un tubo de vidrio de 0.6 a 1.6 cm de diámetro, doblado en espiral o en forma de "U" invertida y con acabados finales que asemejan algunas variantes de focos incandescentes. Su longitud depende de la potencia en Watts que tenga la lámpara. En el interior del tubo se encuentran dos electrodos localizados en los extremos, un gas inerte a baja presión como el neón, el kriptón o con mayor frecuencia el argón y en ocasiones alguno de ellos es mezclado con vapor de mercurio. Pueden ser de alta o de baja presión de acuerdo a la necesidad de iluminación y también a la duración del foco. La parte interior del tubo está recubierta con un polvo fluorescente que se activa con la energía ultravioleta de la descarga producida al ser conectado a la fuente de electricidad (por esta razón también son llamadas lámparas de descarga). En la base de la lámpara se localiza un balastro electrónico que se encarga de proporcionar las características eléctricas especiales para el funcionamiento de la lámpara. Dentro de este tipo de lámparas se encuentran las lámparas de mercurio, las lámparas de neón, las lámparas de sodio, entre otras. Estas lámparas emiten unos cuantos colores, por lo que su luz no puede ser descompuesta como se hace con la luz incandescente. En la figura 17 se puede observar este tipo de foco.

Figura 17. Lámpara fluorescente compacta (LFC).



Fuente: (OSRAM, 2015)

- **Lámpara LED:** aunque fue en los años 60s que se inventó el primer diodo emisor de luz que fue utilizado como indicador, no fue sino hasta finales de los 90s que los LEDs se utilizaron para iluminación arquitectónico y de displays, así como para semáforos. Los leds han demostrado ser muy eficaces en la absorción de potencia y por tal motivo hoy en día cuentan con múltiples aplicaciones, pueden verse comúnmente en semáforos, en linternas, en vehículos, etc. En la figura 18 se puede observar un foco conformado por un arreglo de diodos LED.

Figura 18. Lámpara LED



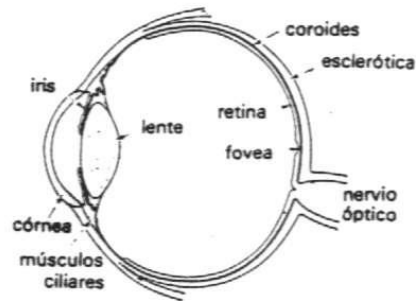
Fuente: (<http://media.static.castorama.pl/media/catalog/category/Clipboard59.jpg>, Descargado en febrero de 2015)

1.3.9. El ojo humano

El ojo humano es un sistema óptico que se encuentra compuesto principalmente por el cristalino o lente, la retina, el iris, la córnea, la pupila, el párpado tal y como se puede observar en la figura 19. El iris es quién define el color de nuestros ojos y el que controla de forma automática el diámetro de la pupila para nivelar la intensidad de luz que recibe el ojo. La córnea refracta los rayos luminosos y el cristalino o lente se encarga de ajustar el enfoque de los objetos situados a

diferentes distancias sobre la retina, este proceso es conocido como acomodación o adaptación⁸. De esta forma los rayos luminosos son transformados en impulsos eléctricos que son conducidos al centro nervioso de la visión en el cerebro.

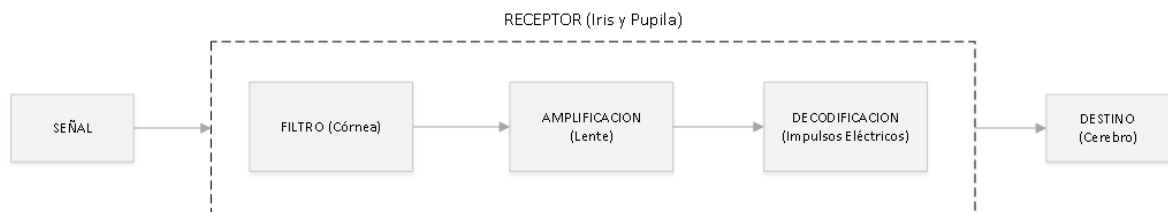
Figura 19. Ojo humano



Fuente: (Universidad de Alcalá, 2001)

Desde el punto de vista de las telecomunicaciones, el ojo humano es un ejemplo de un sistema demodulador de señales descrito en la figura 20.

Figura 20. Diagrama de bloques



Fuente: (el autor)

Parte del proceso ilustrado en la figura 24, es implementado en el prototipo VLC desarrollado en este trabajo.

⁸ (El ojo humano: características y defectos de la visión., 2015)

1.3.10. Teoría del color

1.3.10.1. Modelo RGB

El modelo RGB es la abreviatura de los colores en inglés Red, Green y Black y ha sido un gran descubrimiento que ha permitido la existencia de cámaras, proyectores, televisores, monitores, etc. Este modelo obedece a la ley de síntesis aditiva la cual hace referencia a una actuación conjunta de estímulos de color sobre la retina. Es decir, una fuente luminosa artificial agrega o suma componentes sobre el mismo punto con el objetivo de generar un color específico tal y como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Modelo RGB



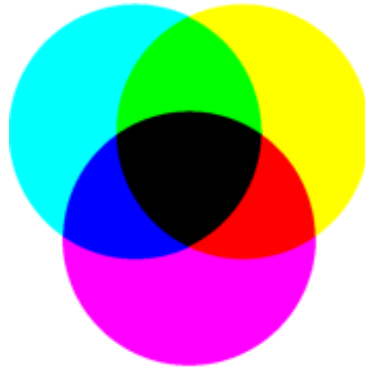
Fuente: (<http://www.proyectacolor.cl/wp-content/uploads/2008/10/aditiva.gif>, Descargado en febrero de 2015)

1.3.10.2. Modelo CMYK

El modelo CMYK es la abreviatura de los colores en inglés Cyan, Magenta, Yellow y Key o Black y es usado popularmente en la industria para la impresión a color. Un programa de diseño en general que vaya a generar archivos de impresión debe convertir estos archivos al modelo CMYK antes de ser impresos. Este modelo utiliza como principio la absorción de la luz, es decir, obedece a la ley de síntesis sustractiva (opuesto al principio de RGB) en el que por la capacidad de absorción de tres filtros juntos se puede obtener la diversidad del espacio de colores tal y como se puede observar en la figura 22. Cuando la luz solar o artificial incide sobre la superficie de un objeto, éste absorbe diferentes longitudes de onda del espectro total de la luz, mientras que refleja otras. Estas longitudes de onda reflejadas son precisamente las causantes de los colores de los objetos, colores que por ser

generados por filtrado de longitudes de onda se han denominado como colores sustractivos.

Figura 22. Modelo de color CMYK



Fuente: (<http://www.proyectacolor.cl/wp-content/uploads/2008/10/sustrac.gif>,
Descargado en febrero de 2015)

En síntesis, se ha explicado la naturaleza de la luz la cual demuestra propiedades ondulatorias, lo que permite que pueda llegar a ser utilizada como portadora dentro de un sistema de transmisión de datos, entendiendo desde un punto de vista físico, cómo puede llegar a ser generada y detectada.

2. DETECTORES Y FUENTES DE LUZ

Existen varios tipos de fuentes de luz y fotodetectores que pueden ser usados en sistemas OWC (Optical Wireless Communications). Lo más común es utilizar fuentes incoherentes como los LED (diodo emisor de luz) y fuentes coherentes como los LD (diodo láser). Los LED, son frecuentemente usados en espacios interiores y pueden ser empleados para enlaces de corta distancia en espacios exteriores⁹. Los LD son comúnmente usados en exteriores para enlaces de más de un kilómetro de distancia; los LD emiten un haz de luz altamente direccional que permite concentrar la energía de forma coherente, permitiendo enlaces de distancia moderada a una tasa de bit aceptable. Para la detección de luz generada por los dispositivos mencionados, existen fotodetectores PIN (P-I-N Combination Photodiode) y APD (Avalanche Photodiode).

2.1. LED

El diodo emisor de luz es un componente opto electrónico pasivo que funciona a partir de la excitación electrónica de componentes semiconductores. La radiación óptica generada por un LED presenta muy baja radiación térmica a comparación de fuentes de luz incandescentes, lo cual favorece a la disminución del ruido térmico que presenta cualquier sistema de comunicación. Los LED pueden ser de bajo tamaño y requieren de bajos voltajes y bajas corrientes para su operación. Los LED también han logrado brindar un buen factor de brillo junto con la opción de radiar en una sola banda o región del espectro visible, lo cual favorece a la implementación de procesos de modulación. La generación de luz se debe a la transición de un electrón de un estado excitado a un estado bajo de energía¹⁰, proceso considerado como electroluminiscencia.

2.1.1. Estructura

El LED es la unión P-N de materiales semiconductores, de tal forma que cuando es alimentado con una corriente continua emiten radiación una vez los pares electrón-hueco se recombinan. El color reflejado dependerá de los materiales utilizados tal y como se muestra en cuadro 6.

⁹ El proyecto RONJA ha logrado enlaces de hasta un kilómetro utilizando LED.

¹⁰ Para mayor detalle revisar el principio de Efecto Fotoeléctrico.

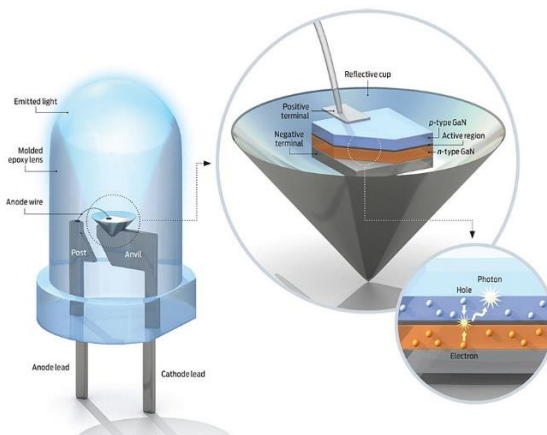
Cuadro 6. Tabla de Materiales LED

Material	Longitud de Onda Pico (nm)
AlGaIn/GaN	230-350
InGaIn/GaN	360-525
ZnTe/ZnSe	459
SiC	470
GaP	470
GaAs _{0,15} P _{0,85}	589
AlGaInP/GaAs	625-700
GaAs _{0,35} P _{0,65} /GaAs	632
GaAs _{0,6} P _{0,4} /GaAs	650
GaAsP/GaAs	700
Ga _{1-x} Al _x As/GaAs	650-900
GaAs	910-1020
InGaAsP/InP	600-1600

Fuente: (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari, 2012)

En la figura 23 también se puede observar con detalle el funcionamiento y estructura de un led.

Figura 23. Estructura interna de un LED



Fuente: (IEEE, 2015)

2.1.2. Características

Un led cuenta con ciertas características de acuerdo a la aplicación que se le vaya a dar. Dentro de estas características se encuentran las variables de flujo luminoso, intensidad luminosa, ángulo de vista, eficiencia luminosa. En la figura 24, se puede observar la diferencia entre dos led con mismo flujo luminoso pero con un ángulo de vista distinto, generando una intensidad luminosa diferente.

Figura 24. Diferencia de intensidad luminosa entre dos led



Fuente: (<http://www.giangrandi.ch/optics/lmcdcalc/lmcdcalc.shtml>, Descargado en enero de 2015)

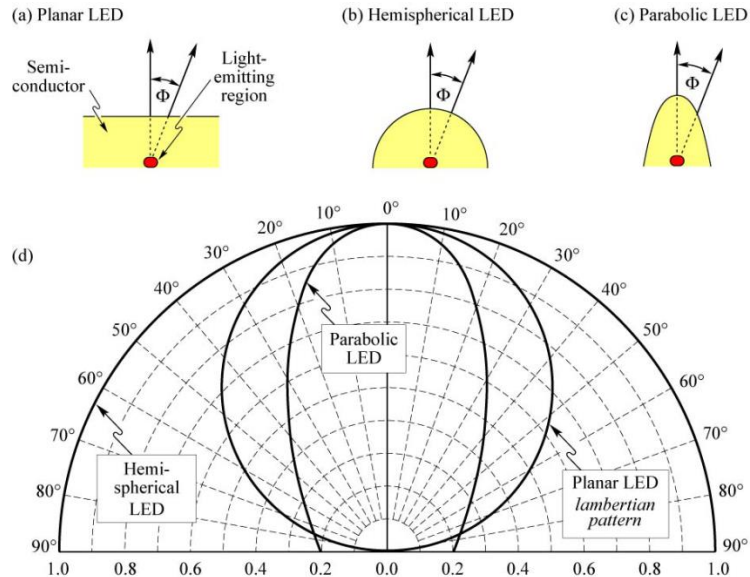
2.1.2.1. Patrón de radiación

Existen varios tipos de LED que se diferencian en la forma en como son construidos:

- LED Plano
- LED Hemisférico o Domo
- LED de borde o parabólico

De acuerdo al tipo de LED utilizado se obtendrán los patrones de radiación indicados en la figura 25.

Figura 25. Patrones de radiación LED



Fuente: (ECSE, 2015)

2.2. FOTODETECTORES

El fotodetector es un dispositivo opto eléctrico compuesto de materiales semiconductores, que genera una señal eléctrica proporcional al cuadrado del campo instantáneo óptico incidente en su superficie. De esta forma, la señal generada por un fotodetector siempre es proporcional a la potencia instantánea recibida. La longitud de onda a la que responde un fotodetector depende de la composición de materiales del mismo, dentro de los cuales se encuentran: Si, GaAs, Ge y InGaAs. Siendo Si y GaAs los materiales utilizados para detección de longitudes de onda dentro del espectro visible, y Ge y InGaAs para detección de longitudes de onda dentro del espectro infrarrojo.

2.2.1. Características

La variable de corriente oscura, es una de las características más importantes de un fotodetector. La corriente oscura, es la corriente que se encuentra a través del fotodetector en la ausencia de luz; la corriente oscura establece una referencia para la detección mínima de una señal, debido a que una señal debe producir más

corriente que la corriente oscura con el fin de ser detectada. Esta corriente puede variar de acuerdo a la temperatura en la que se encuentre el dispositivo y por el tipo de fotodetector. La corriente oscura, se contempla como un factor de ruido en la implementación de sistemas de comunicación ópticos (OWC).

También existe otra característica denominada “potencia de ruido-equivalente” o NEP, la cual hace referencia a la entrada mínima de potencia óptica para generar una fotocorriente equivalente al valor RMS de una corriente de ruido en 1 Hz de ancho de banda. El NEP permite medir la señal mínima detectable debido a que compara el ruido, directamente con la potencia óptica incidente. Dentro de las ventajas que estos dispositivos electrónicos pueden ofrecer para la implementación de sistemas de comunicación ópticos, se pueden nombrar las siguientes:

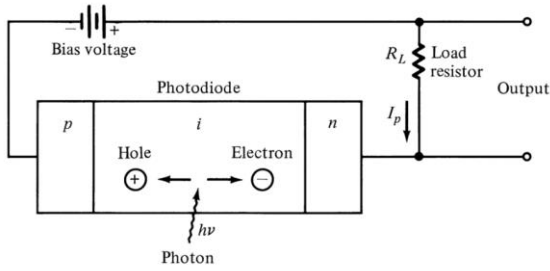
- Superficie de detección extensa. Para aplicaciones de alta velocidad, es recomendado utilizar arreglos de fotodetectores.
- Alta sensibilidad y alta respuesta a longitudes de onda.
- Ruido bajo y con esto un valor alto en SNR (Signal-to-noise Ratio).
- Tiempo de respuesta rápido.
- Bajo costo, tamaño reducido y alta confiabilidad.

Actualmente, existen cuatro tipos de fotodetectores: PIN, APD, Fotoconductores y Semiconductor-metal, teniendo en cuenta que los fotodetectores PIN y APD, son los más populares y usados para sistemas OWC, por lo que serán descritos con mayor detalle a continuación.

2.2.2. Fotodetector PIN

El fotodetector PIN está compuesto de materiales semiconductores de unión tipo P-N separados ligeramente por una región dopada, el cual se alimenta de una fuente de tensión con polarización inversa tal y como se muestra en la figura 26. Para que el dispositivo convierta un fotón incidente en una corriente, la energía del fotón incidente no debe ser menor que la energía de banda prohibida del material semiconductor; de esta forma, el fotón incidente aprovecha su energía para excitar un electrón dentro de la banda de valencia hacia la banda de conducción. Con fotodetectores PIN, ha sido posible alcanzar tasas de transmisión de hasta 100 Gbps.

Figura 26. Fotodetector PIN

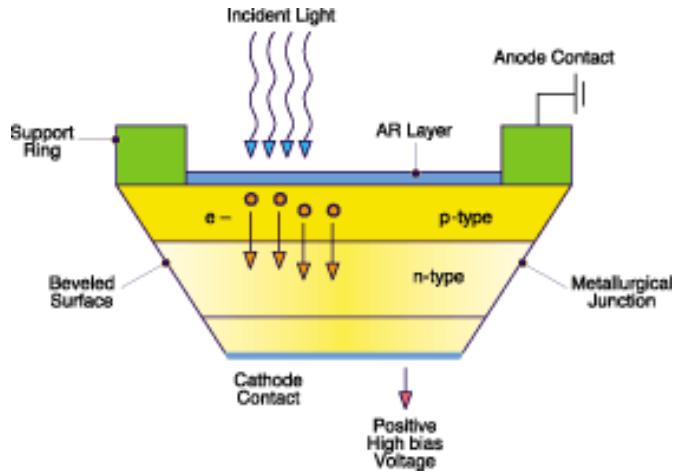


Fuente: (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari, 2012)

2.2.3. Fotodetector APD

El fotodetector de avalancha APD, se diferencia del fotodetector PIN, en que este genera una corriente inherente de ganancia a través del proceso de ionización de electrones, lo cual genera una muy alta sensibilidad en la detección; sin embargo, el factor de ruido se ve multiplicado. El proceso de avalancha también se encuentra altamente sensible a la temperatura y requiere de altos voltajes de operación. En la figura 27 se puede observar un esquema que describe este fotodetector.

Figura 27. Fotodetector APD

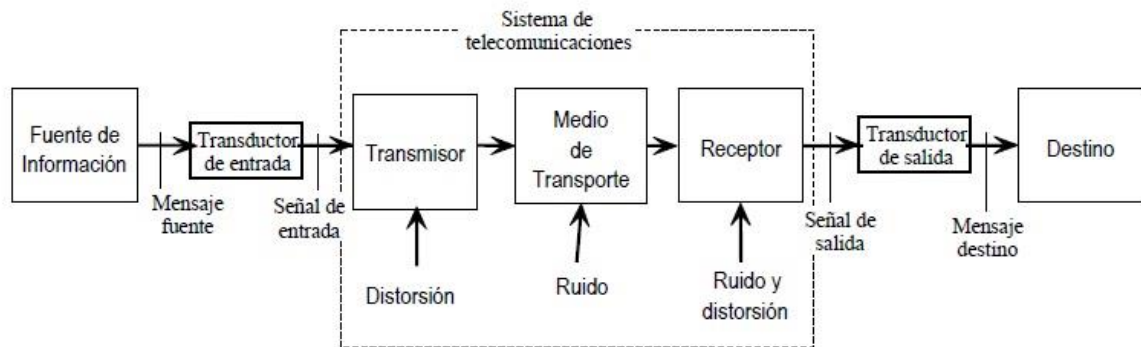


Fuente: (SPIE, 2001)

3. TÉCNICAS DE MODULACIÓN

Un sistema de comunicación electrónico normalmente se compone de dos señales: una señal portadora y una señal de información (también llamada señal inteligente). La señal portadora es una onda de mayor frecuencia a la onda de información, que se encarga de transportar el mensaje por todo el sistema. En la figura 28 se puede observar, como un sistema electrónico de comunicaciones se compone generalmente por un emisor y un receptor que tienen un circuito modulador y un circuito demodulador respectivamente.

Figura 28. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación



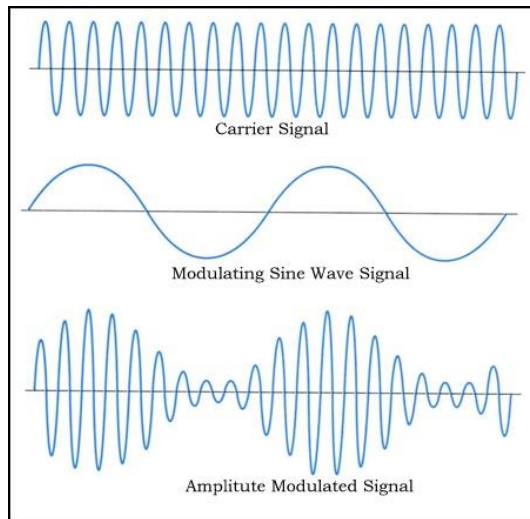
Fuente: (UNAD, 2015)

La modulación es el proceso de cambiar una o más propiedades de la señal portadora; estas propiedades pueden ser frecuencia, amplitud, fase, polaridad. En la figura 29, se puede observar el proceso de modulación de una señal de información, cambiando la amplitud original de la señal portadora.

La modulación obedece al principio de superposición donde dos o más señales pueden ser combinadas de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$y_r = y_1 + y_2 = A_0 \sin(\omega t - kx) + A'_0 \sin(\omega' t - k' x) \quad (3.1)$$

Figura 29. Modulación AM



Fuente: (<http://www.electronicshub.org/wp-content/uploads/2013/10/Amplitude-Modulation.jpg>, Descargado en febrero de 2015)

Existen dos tipos básicos de comunicaciones electrónicas¹¹:

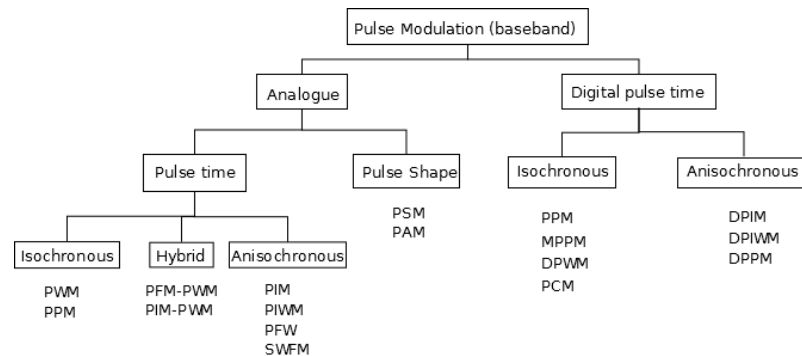
- **Sistema de comunicación electrónico analógico:** en este tipo de sistemas, tanto la señal de información como la señal portadora son analógicas, es decir, ondas con variación continua en el tiempo, como por ejemplo las ondas sinusoidales.
- **Sistema de comunicación electrónico digital:** en este tipo de sistemas se recibe y se transmite utilizando pulsos de onda que oscilan con valores discretos; este tipo de sistemas no utilizan portadoras analógicas, sin embargo la señal de información puede tomar forma análoga o digital. El término "radio digital" existe cuando hay transmisión de portadoras analógicas moduladas digitalmente, en estos casos, la señal de información siempre es digital.

En sistemas de comunicación ópticos, a pesar de utilizar portadoras que corresponden a componentes del espectro visible, es decir portadoras de naturaleza análoga, en algunas técnicas de modulación como por ejemplo OOK, los pulsos de luz son interpretados como señales digitales, por lo tanto hacen parte de los sistemas de comunicación electrónico digital. Los sistemas de comunicación ópticos en su gran mayoría, varían la intensidad con la que una portadora óptica es transmitida; este esquema es conocido como "modulación de intensidad con

¹¹ (Tomasi, 2003)

detección directa" o **IM/DD** (Intensity Modulation with Direct Detection). En la figura 30, pueden detallarse las diferentes técnicas de modulación aplicadas en OWC (optical wireless communication), las cuales hacen parte del conjunto de técnicas de modulación de pulso.

Figura 30. Árbol de modulación por pulsos

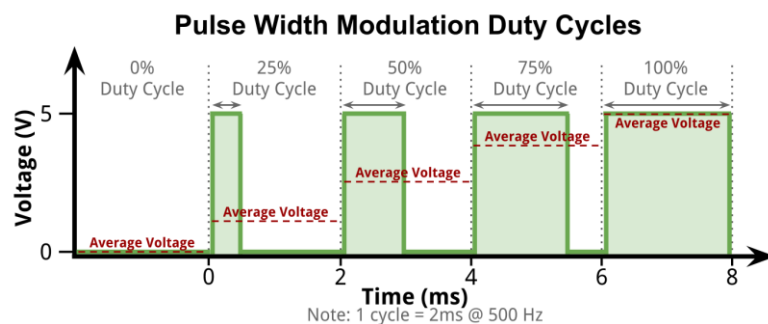


Fuente: (Ghassemlooy, Popoola, & Rajbhandari, 2012)

3.1. MODULACIÓN PWM

PWM (pulse width modulation) es una técnica de modulación digital que modifica el ciclo de trabajo de una señal de acuerdo a una señal de reloj tal y como se muestra en la figura 31. Esta técnica de modulación es usada comúnmente para controlar el voltaje enviado en cada pulso de señal, lo que permite varia la intensidad de luz generada por un LED en un tiempo determinado.

Figura 31. Modulación PWM

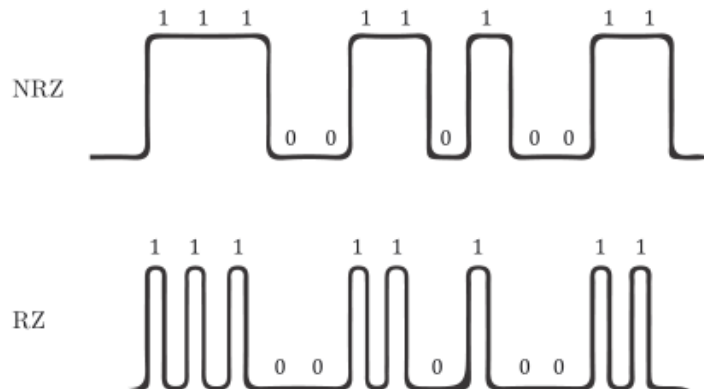


Fuente: (http://www.hho4free.com/pulse_width_modulator__pwm.htm, Descargado en marzo de 2015)

3.2. MODULACIÓN OOK

OOK (On-Off keying) es una técnica de modulación digital que hace parte del conjunto de técnicas IM/DD, altamente usada en comunicaciones ópticas debido a su gran simplicidad. Originalmente se define como el cambio de amplitud de una señal portadora o ASK (Amplitude Shift Keying) pero a diferencia de esta, se utilizan portadoras digitales las cuales se componen del apagado o encendido de pulsos ópticos que generan señales cuadradas. Existen dos tipos de esquemas utilizados por esta técnica de modulación: retorno a cero (RZ) y no retorno a cero (NRZ). En el esquema de modulación OOK-RZ la señal siempre tomará valores de 0V cada vez que un bit sea transmitido independiente de la secuencia de bits del mensaje. En el esquema de modulación OOK-NRZ la señal mantendrá valores entre +5V y 0V (sobre un nivel DC) de acuerdo a la secuencia de bits del mensaje a transmitir tal y como se indica en la figura 32.

Figura 32. OOK-NRZ y OOK-RZ



Fuente: (Mesalles, Pol, 2013)

La modulación PWM puede ser usada en sistemas OWC para distancias largas pero velocidades bajas, mientras que la modulación OOK puede ser utilizada para distancias cortas pero velocidades altas de transmisión. Algunas ventajas adicionales de la utilización de modulación OOK son:

- Circuito sencillo
- Velocidad de transmisión
- Menor costo

4. VLC

VLC es una tecnología de transmisión de datos de forma inalámbrica y viene del acrónimo en inglés "Visible Light Communication", lo que significa comunicación por luz visible. A través de la historia, la luz se ha utilizado en muchas ocasiones no solo para iluminar sino también para comunicar, pero a velocidades bajas; en tiempos pasados, la llama de fuego encendida sobre alguna muralla tenía un significado, hoy en día la luz de un faro en el mar advierte sobre la proximidad a la costa y los semáforos cumplen la función de sincronizar el tráfico peatonal y vehicular alrededor del mundo. Debido al desarrollo tecnológico, se ha logrado implementar técnicas de generación y detección de luz que permiten aumentar la velocidad de transmisión, aumentando el número de aplicaciones que se le han dado a la luz. El instituto de ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) ha creado el estándar 802.15.7 dedicado al funcionamiento de VLC desde el año 2008, en conjunto con las entidades Samsung Electronics, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), Visible Light Communications Consortium (VLCC) y la Universidad de Oxford¹².

Desde el año 2011, a esta tecnología también se le ha conocido con el término "LiFi"; término adoptado por el profesor Harald Haas, quién ha desarrollado trabajos en el área de "Optical Wireless Communications (OWC)" en la Universidad de Edimburgo (Escocia, Reino Unido), desde el año 2008. A partir de la demostración realizada por Harald Haas, han empezado a surgir empresas con la intención de comercializar esta tecnología dentro de las cuales se encuentran, "Purelifi" (Reino Unido), "Oledcomm" (Francia), "Sisoft" (México). Sin embargo, la investigación de esta tecnología, sigue aumentando de manera global. La universidad Fudan de Shanghai (Shanghái, China) desarrolló, en el año 2013, un LED capaz de transmitir a 150 Mbps, lo cual es casi el triple de lo ofrecido por el estándar WiFi 802.11g. En el año 2014, el Instituto Fraunhofer (Alemania) logró alcanzar una velocidad de transmisión de hasta 1 Gbps, utilizando VLC (lo que actualmente ofrece el estándar WiFi 802.11ac).

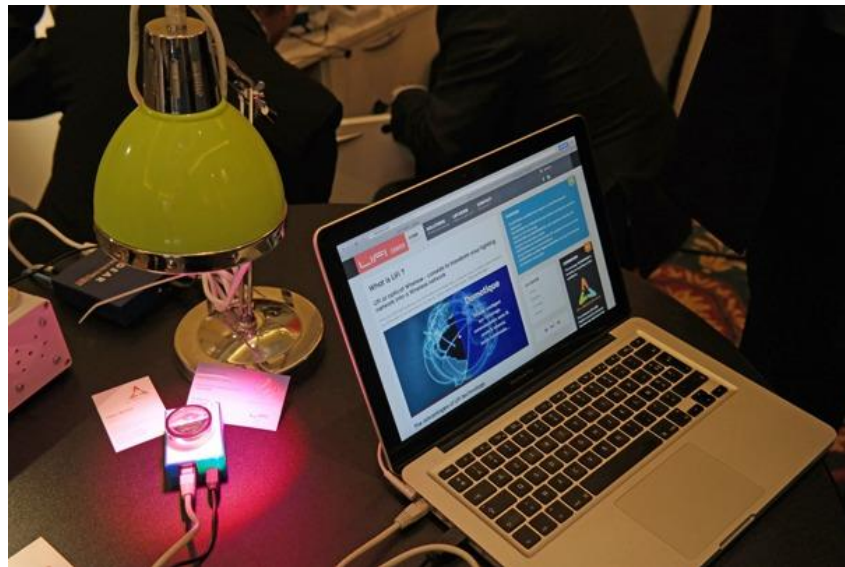
Los prototipos implementados inicialmente, han sido pruebas de concepto, en las que se transmite en una sola vía, es decir, existe solo un transmisor y solo un receptor. Este tipo de transmisión también es conocida como simplex, utilizada para servicios de "broadcasting" como la transmisión de un video o una canción. Para la transmisión en doble vía, debe existir un transceptor en ambos lados de la

¹² (IEEE, 2008)

comunicación, es decir, un transmisor y un receptor dentro de la misma circuitería. Un ejemplo de una comunicación de doble vía es Internet.

En el “Consumer Electronics Show (CES) 2014”, realizado todos los años en la ciudad de Las Vegas, Estados Unidos, la empresa “Oledcomm” expuso un prototipo de tecnología LiFi, capaz de transmitir a 10 Mbps, tal y como se muestra en la figura 33.

Figura 33. Prototipo LiFi creado por Oledcomm



Fuente: (<http://blog.laptopmag.com/wordpress/wp-content/uploads/2014/01/1389213880.jpg>, Descargado en marzo de 2015)

4.1. CARACTERÍSTICAS

- Aprovechamiento del alumbrado para transmisión de información.
- Consciencia ecológica al utilizar dispositivos de alta eficiencia y poco consumo como los LED.
- La operación no cuenta con ninguna regulación tal y como sucede con los sistemas de radio frecuencia (RF).
- VLC tiene afinidad con la tecnología Power Line Communication (PLC).
- Ofrece mayor nivel de seguridad a comparación de los sistemas de radio frecuencia (RF), debido a que es una tecnología de difícil interferencia que no traspasa paredes.

En la figura 34 puede observarse una comparación entre la tecnología VLC y la tecnología de radio frecuencia (RF).

Figura 34. VLC vs RF

Property		VLC	RF
	Bandwidth	Unlimited, 400nm~700nm	Regulatory, BW Limited
	EMI	No	High
	Line of Sight	Yes	No
	Standard	Beginning (IG-VLC)	Matured
	Hazard	No	Yes
Mobile To Mobile	Visibility (Security)	Yes	No
	Power Consumption	Relatively low	Medium
	Distance	Short	Medium
Infra to Mobile	Visibility (Security)	Yes	No
	Infra	LED Illumination	Access Point
	Mobility	Limited	Yes
	Coverage	Narrow	Wide

Fuente: (IEEE, 2008)

4.2. SERVICIOS

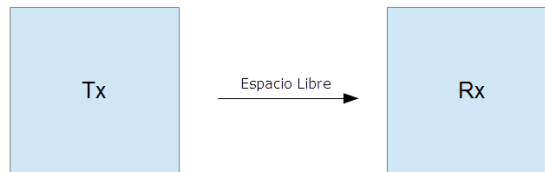
La tecnología VLC puede ser utilizada para brindar los siguientes servicios:

- **Sistema de comunicación para transmisión de sonido:** puede ser de tipo análogo y digital, utiliza las componentes RGB para enviar el sonido de un instrumento por cada una de ellas. Por ejemplo, el sonido del piano viaja en la componente R, el sonido de la batería viaja en la componente G y el sonido de la guitarra en la componente B.
- **Sistema de reconocimiento y seguridad:** es de tipo digital, y puede ser utilizado para ubicar una posición exacta dentro de un edificio de acuerdo a las bombillas instaladas, con el fin de ser un complemento al servicio de GPS, como por ejemplo, la esquina de la habitación 203 de un hotel. También puede ser utilizado para efectos de seguridad vehicular, como por ejemplo, la activación del sistema de frenado de un vehículo.
- **Sistema de transmisión a alta velocidad:** es de tipo digital, y puede ser utilizado en complemento a las tecnologías inalámbricas de acceso a internet como WiFi.

5. PROTOTIPO VLC IMPLEMENTADO

En este desarrollo se ha implementado un prototipo VLC con línea de vista, utilizando modulación OOK-NRZ y auto detección de señal a reloj, el cual transmite información en una sola dirección, a través del espacio libre, tal y como se muestra en la figura 35.

Figura 35. Prototipo VLC



Fuente: (el autor)

5.1. HARDWARE USADO

Para la implementación del prototipo se han utilizado los siguientes componentes de hardware:

- **Arduino UNO:** Tarjeta de desarrollo, basada en el microprocesador ATmega328, con 14 entradas y salidas digitales, 6 entradas análogas, un oscilador de cristal a 16 Mhz y una conexión a USB; utiliza el lenguaje de programación C++. En la figura 36 se puede observar la parte frontal de esta tarjeta.

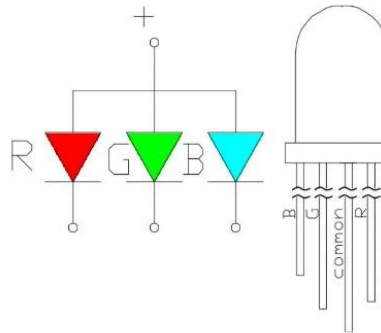
Figura 36. Arduino UNO



Fuente: (<http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>, Descargado en marzo de 2015)

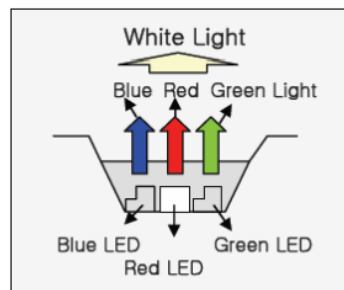
- **Led RGB:** diodo emisor de luz parabólico, con 65 ° de ángulo de vista, detección de longitud de onda entre los 620 - 470 nm, con intensidad luminosa máxima de 2000 mcd en la componente verde, cuando la corriente sea de 20 mA. En las figuras 37 y 38 pueden observarse algunos esquemas de este led.

Figura 37. Led RGB 8mm



Fuente: (<https://solarbotics.com/product/LED-RGB-8CD5kCA/>, Descargado en marzo de 2015)

Figura 38. Descripción de un led RGB



Fuente: (IEEE, 2008)

Cuadro 7. Descripción de la luz emitida por el led RGB

Variable	Valor
Potencia	17 dBm
Flujo luminoso	2 mlm
Eficiencia luminosa	0,0333 lm/W

- **Fotodiodo BPW21:** fotodiodo PN plano hecho en Si, diseñado para aplicaciones de alta precisión, con un área sensible a radiación de 7.5 mm^2 , un ángulo medio de sensibilidad de $\pm 25^\circ$ y una ventana en vidrio plana de cobertura. Detección de longitudes de onda entre los 420 - 675 nm, con tiempos de subida y bajada de aproximadamente 6 μs . En la figura 39 se puede observar un ejemplo de este fotodiodo.

Figura 39. Fotodiodo BPW21



Fuente:

(<http://static.rapidonline.com/catalogueimages/Module/M076209P01WL.jpg>,
Descargado en marzo de 2015)

5.2. SOFTWARE UTILIZADO

El software utilizado para el desarrollo de este prototipo se resume en:

- **Arduino IDE 1.6.2:** software de código abierto, utilizado para la escritura de código C++ y ejecución en la tarjeta Arduino.
- **Matlab R2012b:** software de programación a alto nivel, especializado en simulación y ejecución de diseños de ingeniería, utilizado para los procesos realizados por el dispositivo receptor tal y como se describe en la figura 41.
- **Microsoft Excel 2013:** software especializado en hojas de cálculo, utilizado para la generación de gráficas y cálculos de rendimiento y BER.
- **Proteus 8 Professional:** software especializado en diseño de circuitos electrónicos, utilizado para la simulación de los circuitos de los dispositivos transmisor y receptor.

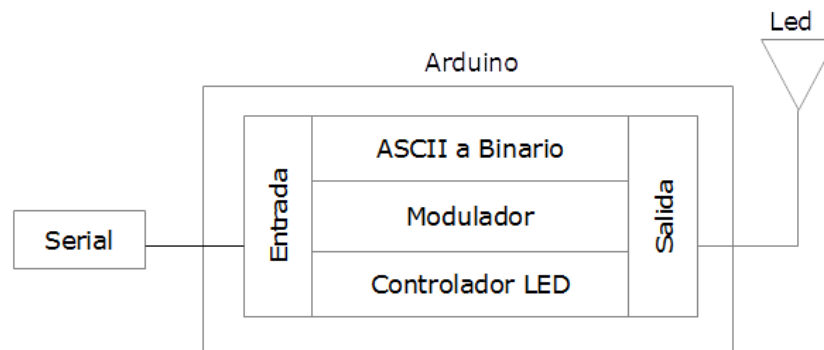
5.3. PARTES DEL PROTOTIPO

A continuación se explica mediante diagramas de bloques el funcionamiento de los dispositivos receptor y transmisor.

5.3.1. Transmisor

Tal y como se observa en la figura 40, en el dispositivo transmisor existe una interfaz de comunicación Serial, la cual está parametrizada a 112500 bps. Para el proceso de modulación OOK, se emplea la componente verde, ubicada en la longitud de onda entre los 495 - 570 nm, emitida por el diodo LED. Las componentes roja y azul se utilizan para efectos de iluminación. Se escogió la componente verde debido a que el diodo LED, presenta mayor intensidad lumínica en este espectro¹³, junto con el fotodiodo BPW21, el cual presenta un pico máximo de sensibilidad en la longitud de onda de los 565 nm.

Figura 40. Diagrama de bloques: Transmisor



Fuente: (el autor)

La modulación OOK-NRZ se realiza a cabo mediante la programación de las salidas digitales del Arduino UNO enviando 5V cuando la información captada sea "1" o enviando 0V cuando la información captada sea "0" binarios¹⁴.

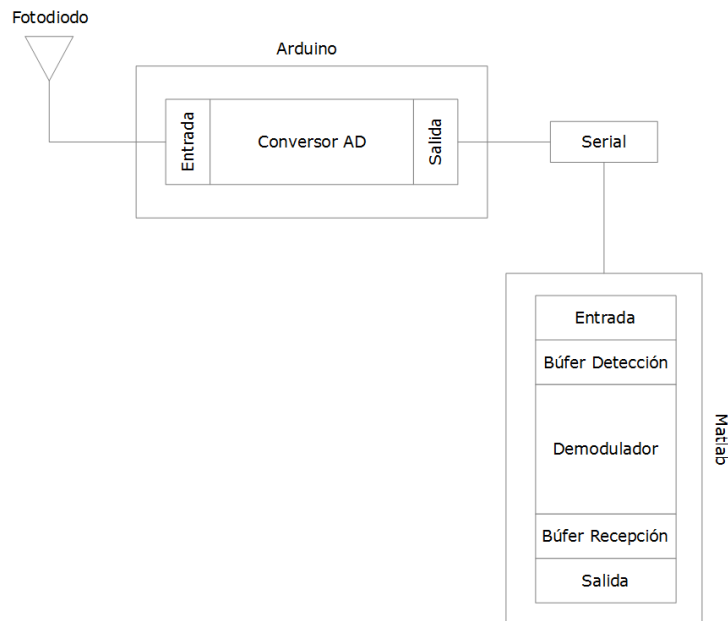
¹³ consultar hoja técnica del fabricante dentro de los anexos de este trabajo.

¹⁴ consultar anexo de código de programación en C++ "Modulación OOK-NRZ"

5.3.2. Receptor

En la figura 41, se observa la existencia de tres dispositivos distintos: el fotodiodo, el Arduino y el software Matlab ejecutado en un computador. A la entrada del Arduino, se detecta la señal de voltaje proveniente del fotodiodo, la cual es convertida de analógica a digital. Estos valores son transmitidos por interfaz Serial a 112500 bps, hacia el software Matlab dentro del cual se ha construido por lógica de programación, el proceso de demodulación y reconstrucción de señal a reloj, utilizando un búfer de detección y un búfer de recepción¹⁵

Figura 41. Diagrama de bloques: Receptor.



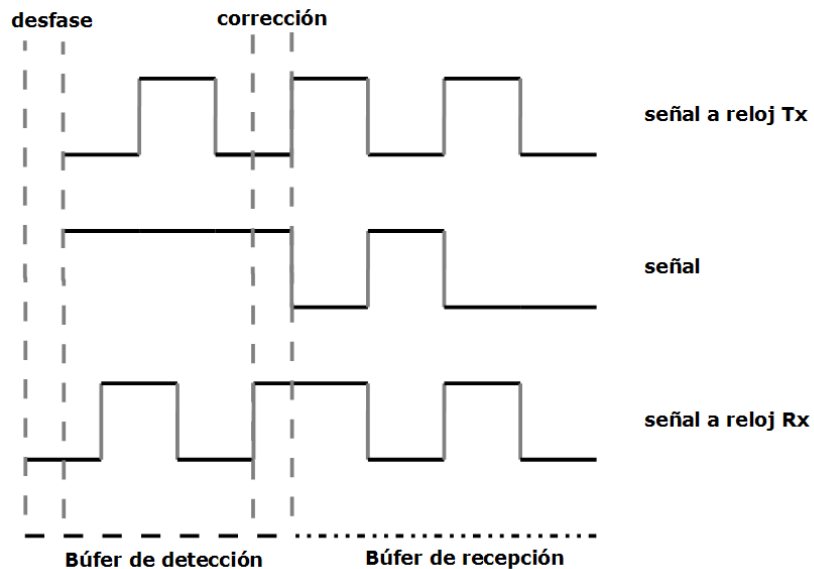
Fuente: (el autor)

En la figura 42 se explica cómo la detección y autocorrección de señal a reloj funciona en el diseño de este prototipo, configurando el transmisor de tal manera que se encuentre iluminando en las tres componentes: rojo, verde y azul (generando luz blanca). Esta señal inicial será recibida por el receptor y almacenada en un búfer de detección, donde los valores detectados por el fotodiodo no presentarán mayor diferencia, en el momento en que el transmisor reciba una señal de mensaje, la componente de color verde comenzará a ser

¹⁵ consultar anexo de código de programación en Matlab "Demodulación y reconstrucción de señal a reloj"

modulada en OOK. Esto provocará una disminución en la amplitud de la señal inicialmente detectada por el receptor y activará el búfer de recepción. El búfer de recepción tiene un tamaño fijo de acuerdo a la tasa de bit parametrizada en el código, una vez el búfer de recepción alcance su máxima capacidad, se activará nuevamente el búfer de detección.

Figura 42. Detección y autocorrección de señal a reloj



Fuente: (el autor)

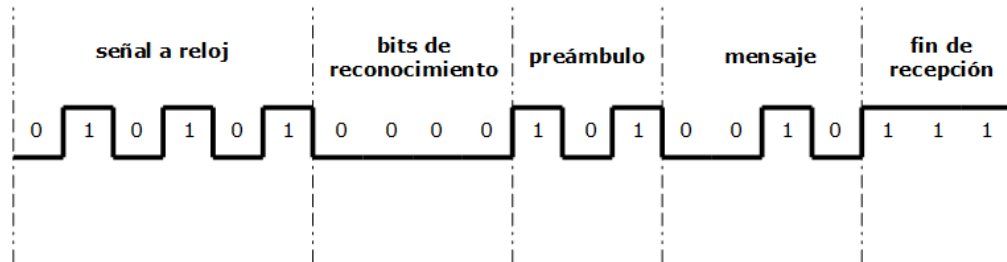
5.3.3. Protocolo de comunicación

Para la correcta recepción del mensaje transmitido, fue necesario implementar un protocolo de comunicación que permita en el receptor, diferenciar entre los bits de sincronización a reloj y los bits de mensaje. El protocolo de comunicación consiste en:

- Enviar 400 bits con "0" y "1" para poder iniciar el proceso de detección de señal a reloj en el receptor.
- Enviar 200 bits con "0" para diferenciar entre la señal a reloj y el mensaje.
- Iniciar el mensaje con un preámbulo "101" lo que significa que los bits posteriores serán el mensaje original.
- Al detectar más de 8 bits en "1" después del preámbulo, se dará por terminada la comunicación.

Este proceso se puede observar en la figura 43.

Figura 43. Datagrama a menor escala con protocolo de comunicación

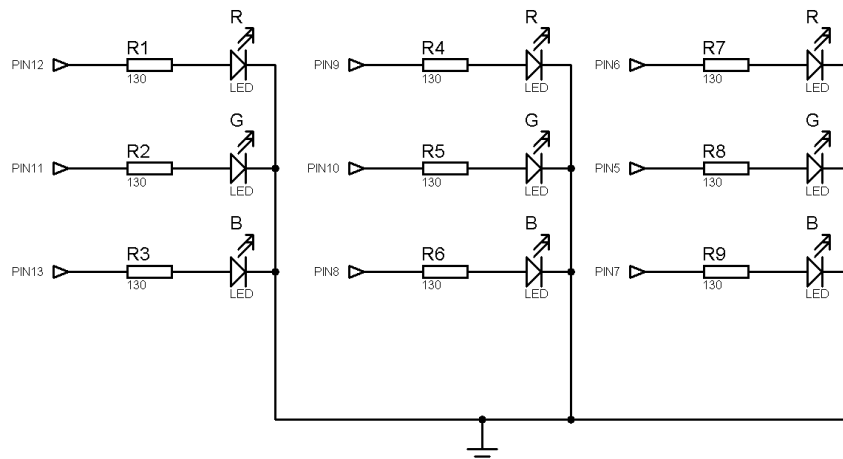


Fuente: (el autor)

5.4. CIRCUITO IMPLEMENTADO

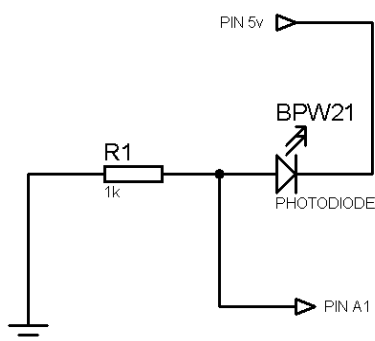
Para el dispositivo transmisor fue necesario implementar el circuito indicado en la figura 44, el cual representa un arreglo de leds que se conectan a cada una de las salidas o pines del Arduino indicadas. De igual forma, en la figura 45 se puede observar el circuito utilizado para la conexión del fotodiodo con el Arduino, dónde el "PIN 5v" representa una fuente de voltaje continua y el "PIN A1" representa la entrada de lectura hacia la tarjeta de desarrollo.

Figura 44. Circuito transmisor



Fuente: (el autor)

Figura 45. Circuito receptor



Fuente: (el autor)

5.5. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

5.5.1. Análisis del rendimiento del sistema

En un sistema de transmisión de datos, los cuellos de botella son generados por acoplamiento o interfaces de conexión, asimismo por los componentes que integran el dispositivo transmisor o receptor. Para este prototipo, se han realizado pruebas de rendimiento sobre la tarjeta Arduino y el led RGB, con el fin de determinar la tasa de transmisión más alta posible, sin olvidar las características técnicas del fotodiodo BPW21.

5.5.1.1. Arduino: esta tarjeta de desarrollo, permite con gran facilidad la implementación de proyectos de electrónica debido a su capacidad de ser programada en lenguaje C++. Sin embargo, esto tiene ciertas desventajas al momento de exigir tiempos de respuesta bajos en la lectura y escritura de cada una de sus salidas y entradas. Esto se debe en gran parte, a la conversión interna que realiza la tarjeta de un lenguaje de programación de alto nivel a un lenguaje de programación de bajo nivel como el lenguaje ensamblador o "assembler". En el cuadro 8, se observan los valores aproximados que tarda el Arduino en escribir mil veces de forma digital y análoga en tres salidas de forma paralela. De acuerdo a estos resultados se considera que la tarjeta tiene la capacidad de encender un led a una frecuencia de 43 Khz y por ende ofrecer una tasa de bit nominal de hasta 43 Kbps para el dispositivo transmisor, utilizando modulación OOK.

Cuadro 8. Arduino Tx loop()

Arduino Tx loop()				
instrucción	puertos	ciclos	tiempo (segundos)	bitrate máximo (Kbps)
digitalWrite	3	1000	0,025	40
analogWrite(255)	3	1000	0,038	26
analogWrite(128)	3	1000	0,023	43
analogWrite(64)	3	1000	0,023	43

En el cuadro 9 se observan los valores aproximados que tarda el Arduino en leer mil veces de forma análoga una entrada, así como los valores aproximados que tarda al utilizar la interfaz Serial para presentar los valores adquiridos.

Cuadro 9. Arduino Rx loop()

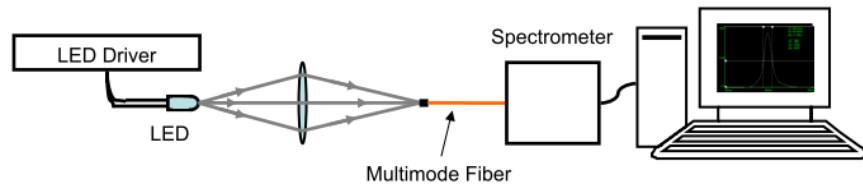
Arduino Rx loop()				
instrucción	puertos	ciclos	tiempo (segundos)	bitrate máximo (Kbps)
analogRead	1	1000	0,017	59
analogRead	1	1000	0,134	7
Serial.print (115200 bps)	NA			
analogRead	1	1000	2,012	0
Serial.print (9600 bps)	NA			

De acuerdo a estos resultados, se afirma que el Arduino es más rápido leyendo que escribiendo valores, lo que brinda una tasa de bit nominal de hasta 59 Kbps para el dispositivo receptor al utilizar modulación OOK. Sin embargo, para el proceso de demodulación y reconstrucción de reloj es necesario adquirir estos datos a través de interfaz Serial a la máxima velocidad ofrecida por el Arduino: 115200 bps, lo que genera un cuello de botella que disminuye esta tasa de recepción hasta los 7 Kbps. Cabe aclarar que el código de programación utilizado para la lectura de las entradas se encuentra optimizado, ya que sin esta mejora los tiempos de respuesta serían demasiado altos para la realización de este prototipo

5.5.1.2. Led RGB y Fotodiodo: para conocer características tales como ancho de pulso, respuesta a impulso o tiempos de subida y bajada de un led determinado, es necesario contar con equipos especializados

como un espectroscopio, con una configuración similar a la indicada en la figura 46 y la figura 47.

Figura 46. Esquema de medición espectral de un LED.



Fuente: (Thorlabs, 2007)

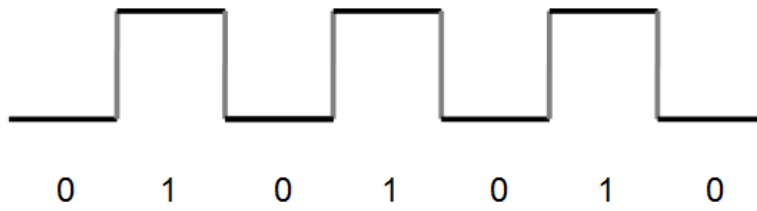
Figura 47. Fotografía de un espectroscopio



Fuente: (Thorlabs, 2007)

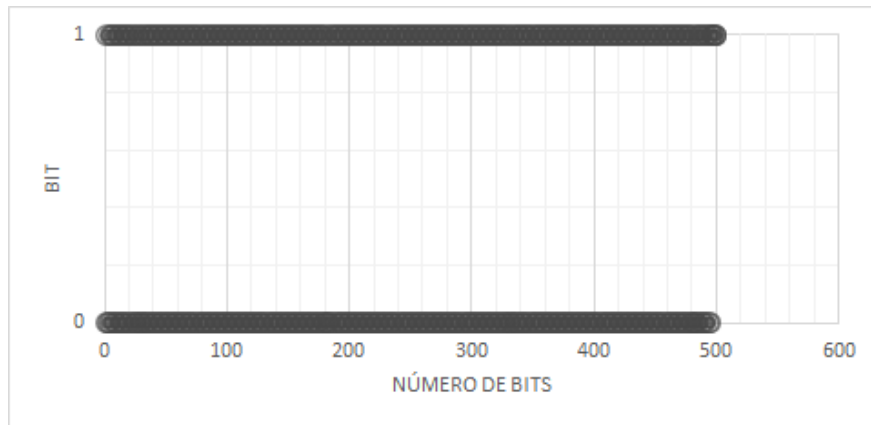
Pese a no contar con el equipo de medición nombrado anteriormente, se ha realizado una medición empírica de la tasa de bit máxima soportada por el led RGB. Para esta medición, se ha transmitido el tren de pulsos indicado en la figura 48, inicialmente a una tasa de bit de 0.5 Kbps y así aumentando sucesivamente. En las figuras 49 y 50 se pueden observar los resultados de la transmisión en los que aproximadamente existe el mismo número de bits "0" que de bits "1", lo cual indica una buena respuesta del led a estas velocidades. Sin embargo, en la figura 51, se puede observar una saturación en la operación del led, dando como resultado un número incoherente de bits "0" y de bits "1".

Figura 48. Tren de pulsos



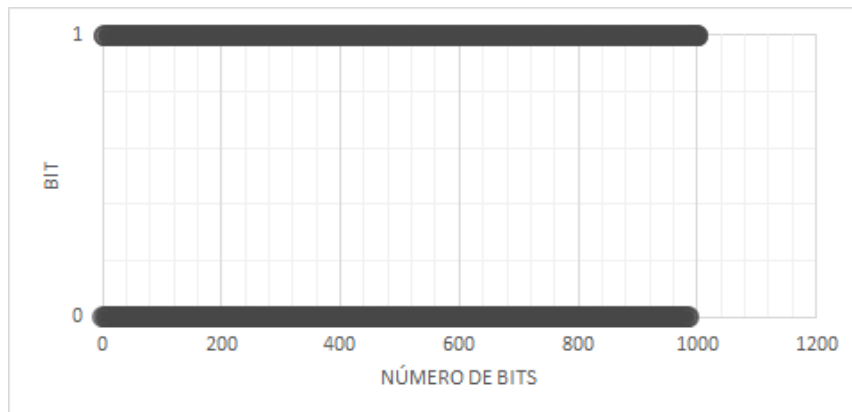
Fuente: (el autor)

Figura 49. Respuesta de led RGB a 0.5 Kbps



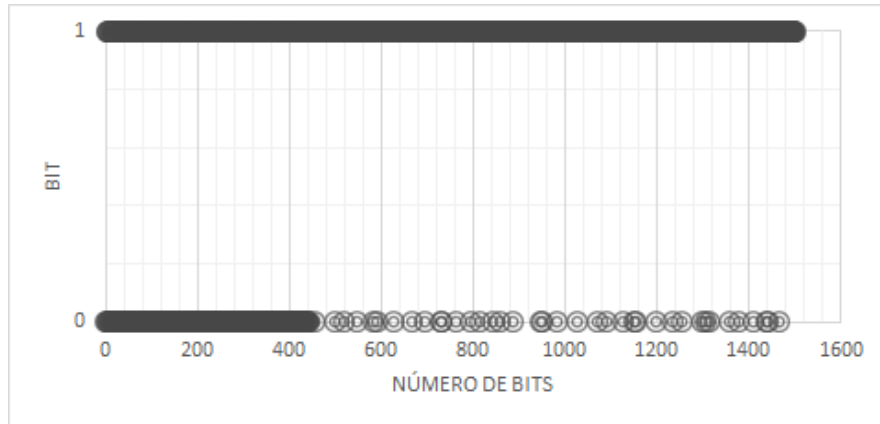
Fuente: (el autor)

Figura 50. Respuesta de led RGB a 1 Kbps



Fuente: (el autor)

Figura 51. Respuesta de led RGB a 1.5 Kbps

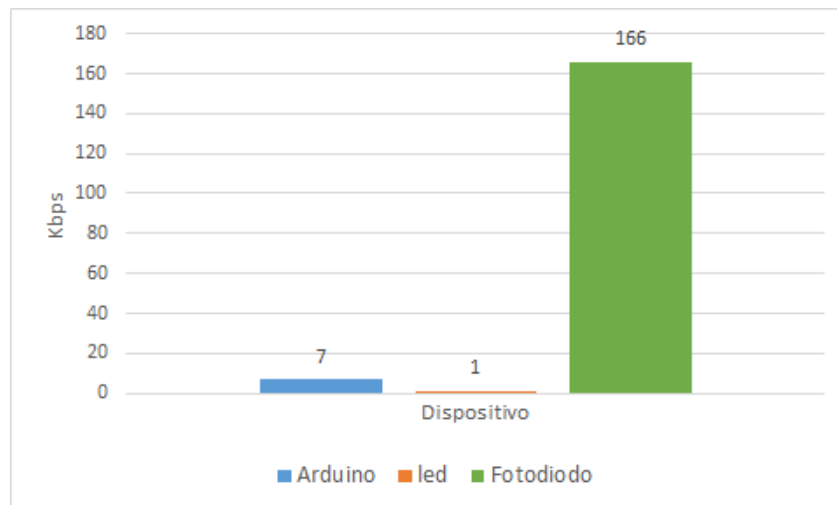


Fuente: (el autor)

De acuerdo a la ficha técnica del fotodiodo BPW21¹⁶, este dispositivo presenta un tiempo de subida de 3 μ S y un tiempo de bajada de 3 μ S, lo que permite calcular una tasa de bit máxima nominal de 166 Kbps.

En resumen, los valores máximos de rendimiento calculados, se pueden observar en la figura 52.

Figura 52. Rendimiento por dispositivo



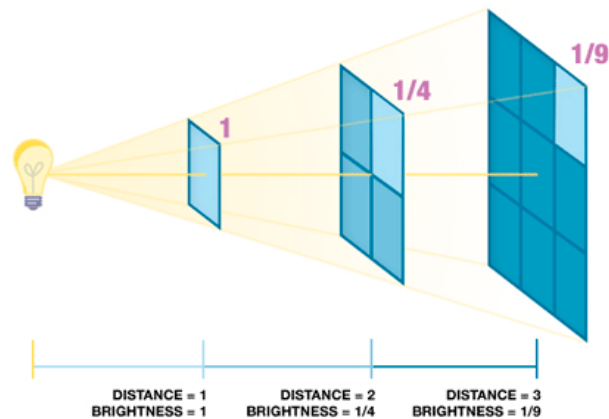
Fuente: (el autor)

¹⁶ la ficha técnica del fotodiodo BPW21, se encuentra dentro de los anexos de este documento.

5.5.2. Análisis de la longitud del enlace

De acuerdo a la Ley cuadrática inversa de la luz, se define la relación que existe entre la irradiación que hay desde una distancia determinada hacia el punto de origen donde se encuentra la fuente. La Ley afirma que la intensidad por unidad de área es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia y se interpreta como una pérdida de potencia a medida que la onda viaja a través del espacio¹⁷. Esta Ley se aplica para todas las ondas electromagnéticas y se puede observar en la figura 53.

Figura 53. Ley cuadrática Inversa



Fuente: (http://www.paulcbuff.com/images/graphics/sfe/inverse_square_law.png, Descargado en marzo de 2015)

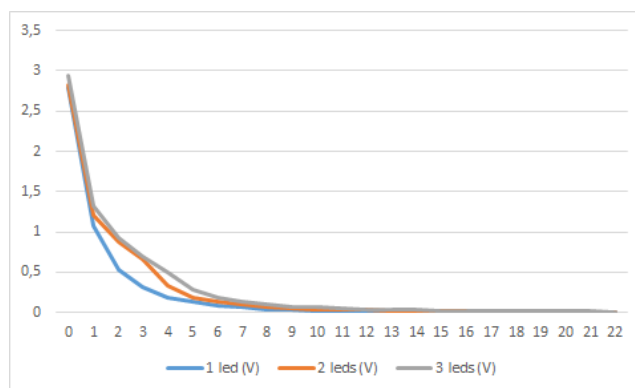
Para el cálculo de la distancia máxima alcanzada por este prototipo, se han realizado mediciones de voltaje adquiridas por el fotodiodo a determinadas distancias tal y como se muestra en el cuadro 10. Al detallar la figura 54, se puede observar cómo la intensidad de luz se ve afectada por el cuadrado de la distancia.

¹⁷ (NASA, 2015)

Cuadro 10. Cuadro comparativo de Voltaje x Distancia

Distancia (cm)	1 led (V)	2 leds (V)	3 leds (V)
0	2,8	2,82	2,94
1	1,08	1,2	1,33
2	0,53	0,87	0,93
3	0,31	0,66	0,69
4	0,19	0,33	0,49
5	0,13	0,19	0,29
6	0,08	0,13	0,19
7	0,06	0,1	0,14
8	0,04	0,07	0,1
9	0,03	0,05	0,07
10	0,02	0,04	0,06
11	0,02	0,03	0,05
12	0,01	0,03	0,04
13	0,01	0,02	0,03
14	0,01	0,01	0,03
15	0	0,01	0,02
16	0	0,01	0,02
17	0	0,01	0,01
18	0	0,01	0,01
19	0	0	0,01
20	0	0	0,01
21	0	0	0,01
22	0	0	0

Figura 54. Voltaje x Distancia



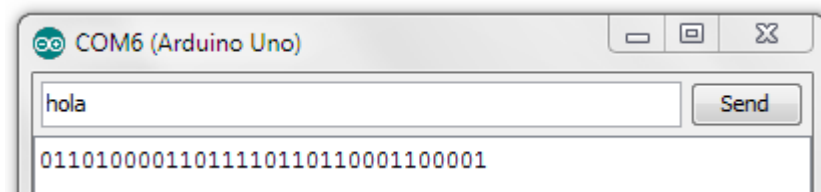
Fuente: (el autor)

De acuerdo a estas mediciones, utilizar un arreglo de tres led RGB permitió aumentar el radio de cobertura detectado por el fotodiodo, tal y como se observó en el cuadro 10.

5.5.3. Análisis del BER (Bit Error Ratio)

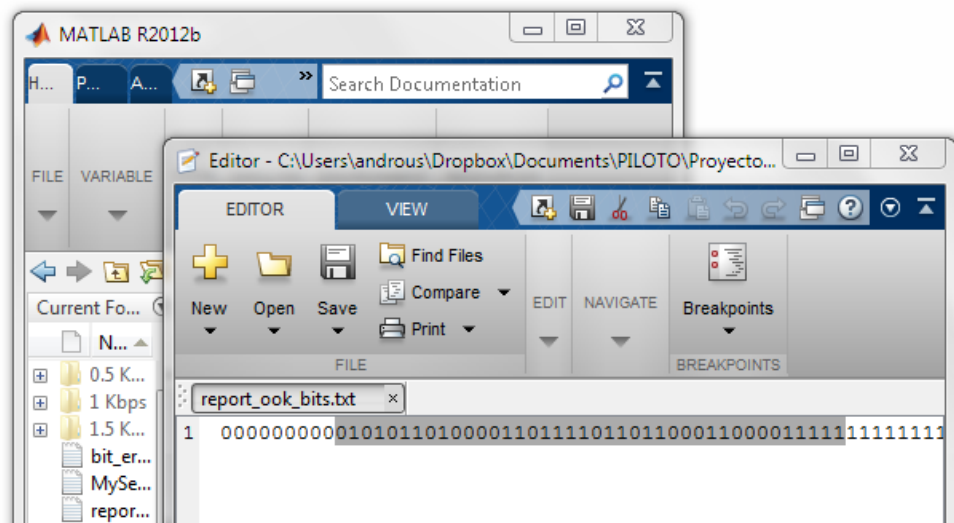
La tasa de error de bit (BER), fue calculada a una velocidad de 1 Kbps, comparando los bits correspondientes a la palabra "Hola", es decir, la secuencia "01101000011011110110110001100001", en el receptor y los bits de preámbulo descritos en el protocolo de comunicación. La conversión de ASCII a Binario se realiza desde el transmisor. En las figura 55, 56 y 57 se puede observar el proceso de transmisión y recepción. También se puede observar en la recepción del mensaje, una parte del protocolo de comunicación descrito anteriormente.

Figura 55. Transmitiendo la palabra "hola"



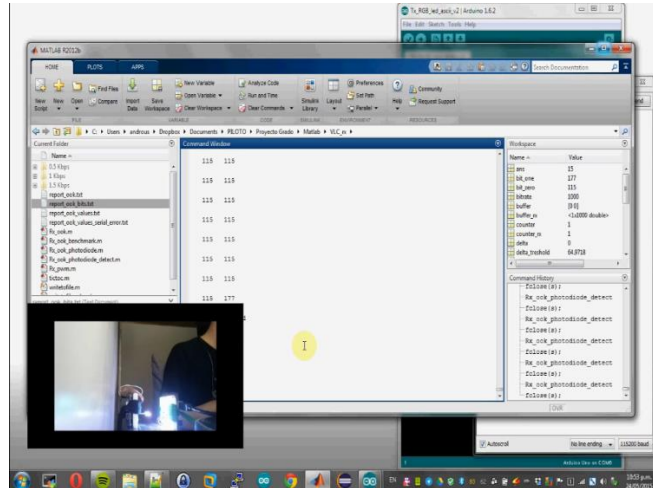
Fuente: (el autor)

Figura 56. Recibiendo la palabra "hola"



Fuente: (el autor)

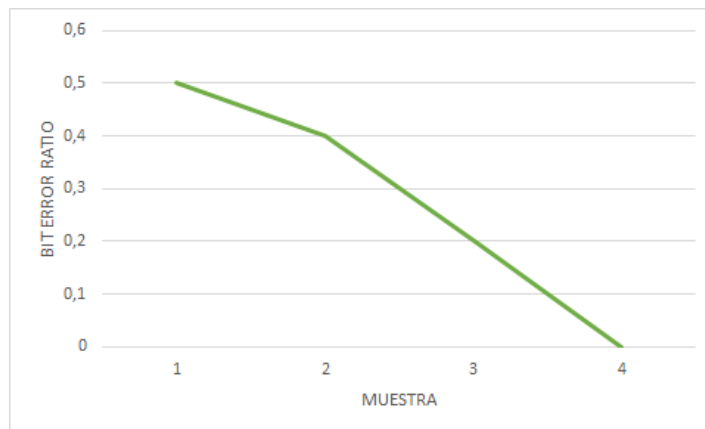
Figura 57. Proceso de transmisión y recepción



Fuente: (el autor)

Para este cálculo, se tomaron cuatro muestras para una distancia específica tal y como se puede observar en las figuras 58, 59, 60 y 61. Se pudo observar que conforme aumentaba la distancia, el bit error ratio aumentaba.

Figura 58. BER con 0 cm de distancia



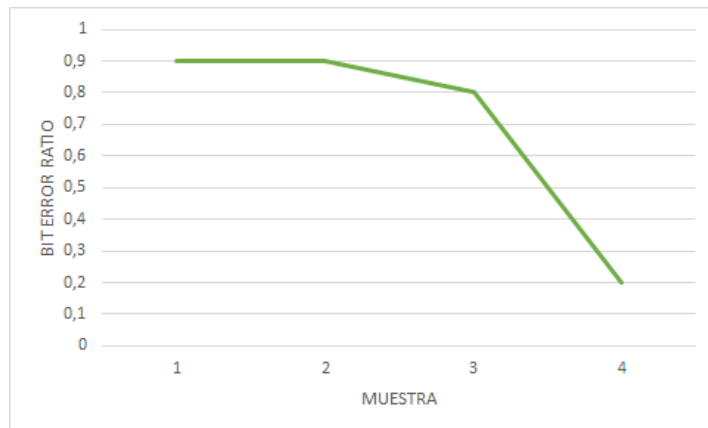
Fuente: (el autor)

Figura 59. BER con 3 cm de distancia



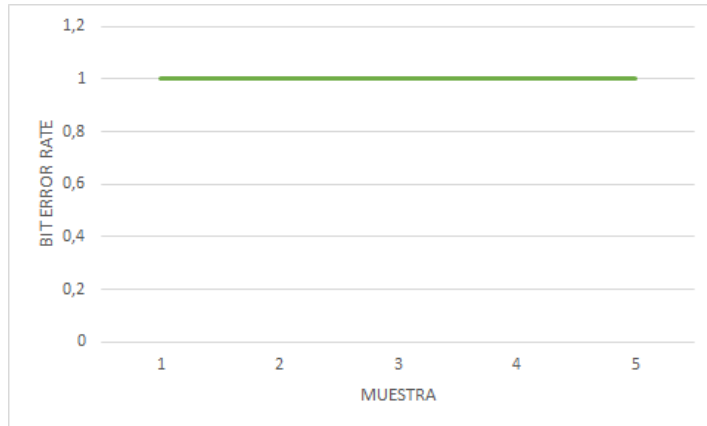
Fuente: (el autor)

Figura 60. BER con 5 cm de distancia



Fuente: (el autor)

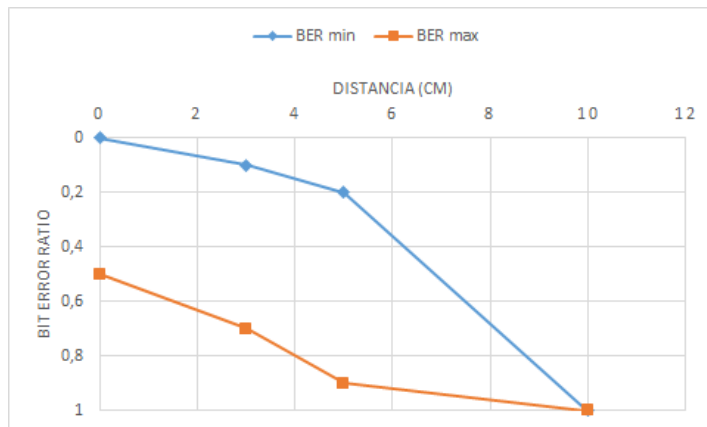
Figura 61. BER con 10 cm de distancia



Fuente: (el autor)

En la figura 62, se puede observar de manera resumida los valores máximos y mínimos del BER obtenidos a cierta distancia. De acuerdo a estos resultados, se puede afirmar que son similares a los cálculos de distancia realizados anteriormente midiendo valores de voltaje. Las pruebas de transmisión y recepción, pueden observarse en video, en la siguiente dirección web: <http://www.youtube.com/playlist?list=PLOn8Ea7EMujC2715riCwNNYkcjDUBG7CE>

Figura 62. BER x Distancia



Fuente: (el autor)

6. CONCLUSIONES

- A través del estudio realizado en este proyecto, se entendió la complejidad que existe en lograr un sincronismo perfecto entre un transmisor y un receptor, más aún, cuando se transmite a través del espacio libre. Dado esto, se comprendió la importancia de la incorporación de protocolos de comunicación y técnicas de reconstrucción de bits.
- El desarrollo de este prototipo, ha permitido comprender e implementar los elementos básicos que existen en un sistema de comunicación, lo cual impulsa el desarrollo de nuevos prototipos que logren profundizar en detalles que permitan mejorar variables como distancia y tasa de bit.
- En el desarrollo de este trabajo, se realizaron pruebas de concepto de la tecnología emergente "LiFi", con las cuales se puede argumentar una pronta revolución en el sector de las telecomunicaciones, que ofrecerá a la sociedad, un gran conjunto de soluciones de conectividad para casi cualquier necesidad, en donde las tecnologías se complementarán unas con otras (LiFi + WiFi + Fibra Óptica), con el fin de brindar cobertura de señal de hasta un 100% en cualquier edificación.
- A partir del estudio desarrollado, se puede afirmar que cualquier fuente de luz podría llegar a ser utilizada para transmisión de información, sin embargo, para lograr transmitir a grandes velocidades, hoy en día, los mejores dispositivos que ayudan a cumplir este objetivo, son el diodo emisor de luz (LED) y el fotodiodo.
- A partir del estudio de técnicas de modulación, se encontró que uno de los problemas que afronta la tecnología VLC para lograr ser comercializada, se encuentra en el parpadeo de la luz que emiten los LED al momento de transmitir la información, independientemente de su velocidad, lo cual genera un flujo luminoso inestable en las fuentes utilizadas en ocasiones perceptibles para el ojo humano.
- Uno de los factores que representó mayor dificultad en este desarrollo, fue la sincronización a reloj, debido que al utilizar un medio de transmisión como el espacio libre, existe una pérdida de la señal transmitida, dificultando la reconstrucción del mensaje. Esto se pudo solucionar a nivel de software, mediante la implementación de un búfer de detección y un búfer de recepción que permitió sincronizar la señal a reloj tanto en el receptor como en el transmisor.

- En este desarrollo se logró construir un prototipo VLC que logró transmitir a 0, 3 y 5 cm, a una velocidad máxima de 1 Kbps, utilizando un led RGB de baja corriente de 20 mA, el mismo que significó una limitante para el desarrollo de un prototipo más veloz y con mayor alcance, lo cual podría mejorar al emplear un LED de 700 mA.
- En la implementación de este prototipo, se invirtieron alrededor de \$ 200.00 US, con lo cual se puede argumentar que la tecnología LiFi puede llegar a ser viable en el mundo comercial, debido a la existencia de microcontroladores de alto procesamiento y bajo costo, al igual que la manufacturación masiva de lámparas LED.

7. RECOMENDACIONES

- Para aumentar la distancia del prototipo además de usar un LED de mayor corriente, también puede utilizarse un arreglo de fotodiodos similar al que viene en el sensor de luz TCS3414FN, el cual fue estudiado para ser utilizado en este desarrollo pero debido a sus altos tiempos de respuesta, el prototipo no iba a ofrecer una velocidad mayor de de 8 bps y por tal razón se optó por el fotodiodo BPW21. Sin embargo la distancia obtenida con este sensor alcanzó más de 1 m.
- Para aumentar la distancia del prototipo, también se puede hacer uso de una lente que aumente la intensidad luminosa del LED emisor. Dentro de las posibles opciones para esta lente, pueden utilizarse las referencias "N-BK7 Bi-Convex Lenses" del fabricante Thorlabs.
- Para aumentar la velocidad de transmisión del prototipo es necesario remover la interfaz serial del diseño, debido a que representa un cuello de botella significativo. Esto podría realizarse utilizando el módulo EEPROM para Arduino, el cual puede almacenar los datos de lectura y funcionar como búfer de detección y recepción.
- Para disminuir el BER es necesario remover la interfaz serial del diseño, ya que una parte de los errores de lectura tenían origen en esta interfaz de conexión.
- Para tener velocidades del orden de los megabits, sería necesario sustituir la tarjeta de desarrollo Arduino por una tarjeta de desarrollo FPGA que permita un mayor rendimiento en la escritura y lectura de puertos de salida y de entrada.
- El proceso de recuperación de señal a reloj implica una disminución en la capacidad por datagrama para la transmisión de un mensaje, ya que en este desarrollo se utilizaron 600 bits de señalización de los 1000 bits transmitidos por segundo, por lo que sería coherente evaluar otras técnicas de modulación asíncronas como DPPM.

BIBLIOGRAFÍA

- Castañeda G., M., & Ewert, J. (2008). *Introducción a la física moderna*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- CATEDU. (2015). Obtenido de E-educativa: http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3233/html/21_espectro_visible.html
- CC, A. (2015). Obtenido de Pulse Width Modulation: <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>
- Córdoba, U. d. (2015). Obtenido de El Efecto Compton: <http://www.uco.es/hbarra/FisicaCuantica/apuntes/0103.pdf>
- Córdoba, U. d. (2015). Obtenido de Química - Física: <http://www.uco.es/dptos/quimica-fisica/quimica-fisica/FQM204/Resumen.pdf>
- Distancia., U. N. (2015). Obtenido de Luminiscencia: [http://www.uned.es/cristamine/mineral/prop_fis/luminiscencia1.htm#Concepto y definición](http://www.uned.es/cristamine/mineral/prop_fis/luminiscencia1.htm#Concepto_y_definición)
- ECSE. (2015). *LED basics: Optical properties*. Obtenido de Optical Properties: <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap05/chap05.htm>
- EcuRed. (2015). Obtenido de Luz Solar.: http://www.ecured.cu/index.php/Luz_solar
- Georgia State University. (2014). *Electromagnetic Waves*. Obtenido de HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/imgel2/emwavec.gif>
- Georgia State University. (2014). *Interference of Sound*. Obtenido de HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/interf.html>
- Georgia State University. (2014). *Longitudinal Waves*. Obtenido de HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/imgsou/lwav.gif>
- Georgia State University. (2014). *Transverse Waves*. Obtenido de HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/imgsou/twav.gif>
- Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2012). *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. New York: CRC Press.

Greenfacts. (2015). Obtenido de Efectos de la luz artificial sobre la salud.:
<http://copublications.greenfacts.org/es/luz-artificial/>

<http://blog.laptopmag.com/wpress/wp-content/uploads/2014/01/1389213880.jpg>. (Descargado en marzo de 2015). *Bright Idea: Smartphone Sensor Receives Data Via Light.*

<http://media.static.castorama.pl/media/catalog/category/Clipboard59.jpg>. (Descargado en febrero de 2015).

<http://narodnoeveche.org/ppt-on-refraction-of-light.htm>. (Descargado en febrero de 2015).

<http://physics.tutorvista.com/waves/wavelength-spectrum.html>. (Descargado en febrero de 2015).
Wavelength Spectrum.

http://ricuti.com.ar/No_me_salen/ONDAS/Ap_ond_04.html. (Descargado en noviembre 2014).
Obtenido de Ondas polarizadas.

<http://static.rapidonline.com/catalogueimages/Module/M076209P01WL.jpg>. (Descargado en marzo de 2015). *Fotodiodo BPW21.*

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/63/Refracci3n.svg/400px-Refracci3n.svg.png>. (Descargado en noviembre de 2014). Obtenido de Fen3meno de refracci3n.

<http://www.acusticaintegral.com/3309/el-oido-humano-el-decibelio-y-el-dba/>. (Descargado en noviembre de 2014). *El o3do humano, el decibelio y el dba.*

<http://www.astrofiscayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html>. (Descargado en noviembre de 2014). Obtenido de Astrof3sica.

<http://www.electronicshub.org/wp-content/uploads/2013/10/Amplitude-Modulation.jpg>. (Descargado en febrero de 2015).

<http://www.giangrandi.ch/optics/lmcdcalc/lmcdcalc.shtml>. (Descargado en enero de 2015).
Electronics Web Site.

http://www.hho4free.com/pulse_width_modulator__pwm.htm. (Descargado en marzo de 2015).

- http://www.paulcbuff.com/images/graphics/sfe/inverse_square_law.png. (Descargado en marzo de 2015). *Professional Photo Lighting*.
- <http://www.proyectacolor.cl/wp-content/uploads/2008/10/aditiva.gif>. (Descargado en febrero de 2015). *Especificación del color*.
- <http://www.proyectacolor.cl/wp-content/uploads/2008/10/sustrac.gif>. (Descargado en febrero de 2015). *Especificación del color*.
- <http://www.smashlab.com/files/5113/4343/2526/2-illumivision-color-palette.jpg>. (Descargado en febrero de 2015).
- <https://lastresyuncuarto.files.wordpress.com/2011/07/foco.jpg>. (Descargado en febrero de 2015). *Foco Incandescente*.
- <https://solarbotics.com/product/LED-RGB-8CD5kCA/>. (Descargado en marzo de 2015). *RGB LED, 8mm clear body, Common ANODE*.
- <https://www.youtube.com/playlist?list=PLOn8Ea7EMujC2715riCwNNYkcjDUBG7CE>. (2015). *Prototipo VLC*.
- IEEE. (2008). Obtenido de Estándar 802.15.7: http://iee802.org/802_tutorials/2008-03/15-08-0114-02-0000-VLC_Tutorial_MCO_Samsung-VLCC-Oxford_2008-03-17.pdf
- IEEE. (2015). Obtenido de The LED's Dark Secret.: <http://spectrum.ieee.org/img/520290-1412782534145.jpg>
- ILCE. (2014). *Efecto Fotoeléctrico*. Obtenido de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/32/imgs/f37bp94.gif>
- Javeriana, P. U. (2015). Obtenido de Biografías: http://pioneros.puj.edu.co/biografias/edad_moderna/1750_1800/thomas_young.html
- Longitudes de onda*. (2015). Obtenido de Frecuencia de los colores: <http://edocs.org/docs/index-51530.html>
- López, Andrés. (2015). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO VLC*. Bogotá.

- luz, M. d. (2014). Exposición de luz artificial. San Ildefonso 43, Centro Histórico de la Ciudad de México.
- luz, M. d. (2014). Refracción de la luz. San Ildefonso 43, Centro Histórico de la Ciudad de México.
- Mesalles, Pol. (2013). *Short-Range Optical Wireless Communications*.
- Mochán, Luis. (2014). Exposición efecto Moirè. San Ildefonso 43, Centro Histórico de la Ciudad de México.
- NASA. (2015). Obtenido de Ley Cuadrática Inversa de Propagación: http://www.mdsc.nasa.gov/index.php?Section=Ley_Cuadratica_Inversa_de_Propagacion&Id=
- OSRAM. (2015). Obtenido de Fabricante en la industria de iluminación: <http://www.osram.de/media/resource/imageXL/336161/collage-cfl-dulux.jpg>
- OSRAM. (2015). *LED Lampen*. Obtenido de <http://osram.com/media/resource/imageXL/336161/collage-cfl-dulux.jpg>
- Palermo, U. d. (2015). Obtenido de Teorías de la luz: http://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/2456_26382.pdf
- París, A. P. (2015). *Universidad de Alcalá*. Obtenido de Introducción a la Optoelectrónica: <http://www2.uah.es/vivatacademia/anteriores/veintiuno/docencia.htm>
- Peña, L. d. (2004). *Cien años en la vida de la luz*. México.
- Plataforma educativa aragonesa*. (2015). Obtenido de DEMO E-DUCATIVA CATEDU: <http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//3000/3079/html/circuito10.jpg/>
- Serway, R. A. (1997). *Física*. México: McGraw Hill.
- SPIE. (2001). *Photodiodes see the light*. Obtenido de <http://spie.org/x26978.xml>
- Technology, P. S. (2015). Obtenido de Pulse Code Modulation: <http://psut.edu.jo/sites/alzoubi/project2/Puplications>

Telecommunications Communications Technologies. (2015). Obtenido de Pulse Modulation and Sampling: <https://www.labvolt.com>

thales, S. a. (2015). Obtenido de quimioluminiscencia: <http://thales.cica.es/cadiz2/ecoweb/ed0173/index.htm>

Thorlabs. (2007). *Specifications and Documentation*. Obtenido de LEDWE-10 Datasheet: <http://www.thorlabs.de/thorcat/16400/LEDWE-10-SpecSheet.pdf>

Thorlabs. (2015). Obtenido de LEDWE-10 Datasheet: <http://www.thorlabs.de/thorcat/16400/LEDWE-10-SpecSheet.pdf>

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación.

UNAD. (2015). *Diagrama de Bloques de un Sistema de Comunicación*. Obtenido de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208016/contLinea/leccin_cuatro___diagrama_de_bloques_de_un_sistema_de_comunicacin.html

Universidad de Alcalá. (2001). *Docencia e Investigación*. Obtenido de <http://www3.uah.es/vivatacademia/images/n21/tabla.jpg>

Universidad de Alcalá. (2001). *Docencia e Investigación*. Obtenido de <http://www3.uah.es/vivatacademia/images/n21/ojo.jpg>

University, G. S. (2015). Obtenido de HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/imgsou/lwav.gif>

University, S. H. (2002). Digital Pulse Interval Modulation for Optical Wireless Communications. *IEEE Explore*.

UPV. (2015). *El prisma de vidrio*. Obtenido de http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/_ondas/reflex_trans/prisma/prisma.html

Vasco, U. d. (2015). Obtenido de Efecto Fotoeléctrico: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>

ANEXOS

Anexo A. Fotografías del prototipo

Figura 63. Montaje utilizado para la recepción de la señal, utilizando el fotodiodo BPW21 y tarjeta Arduino.

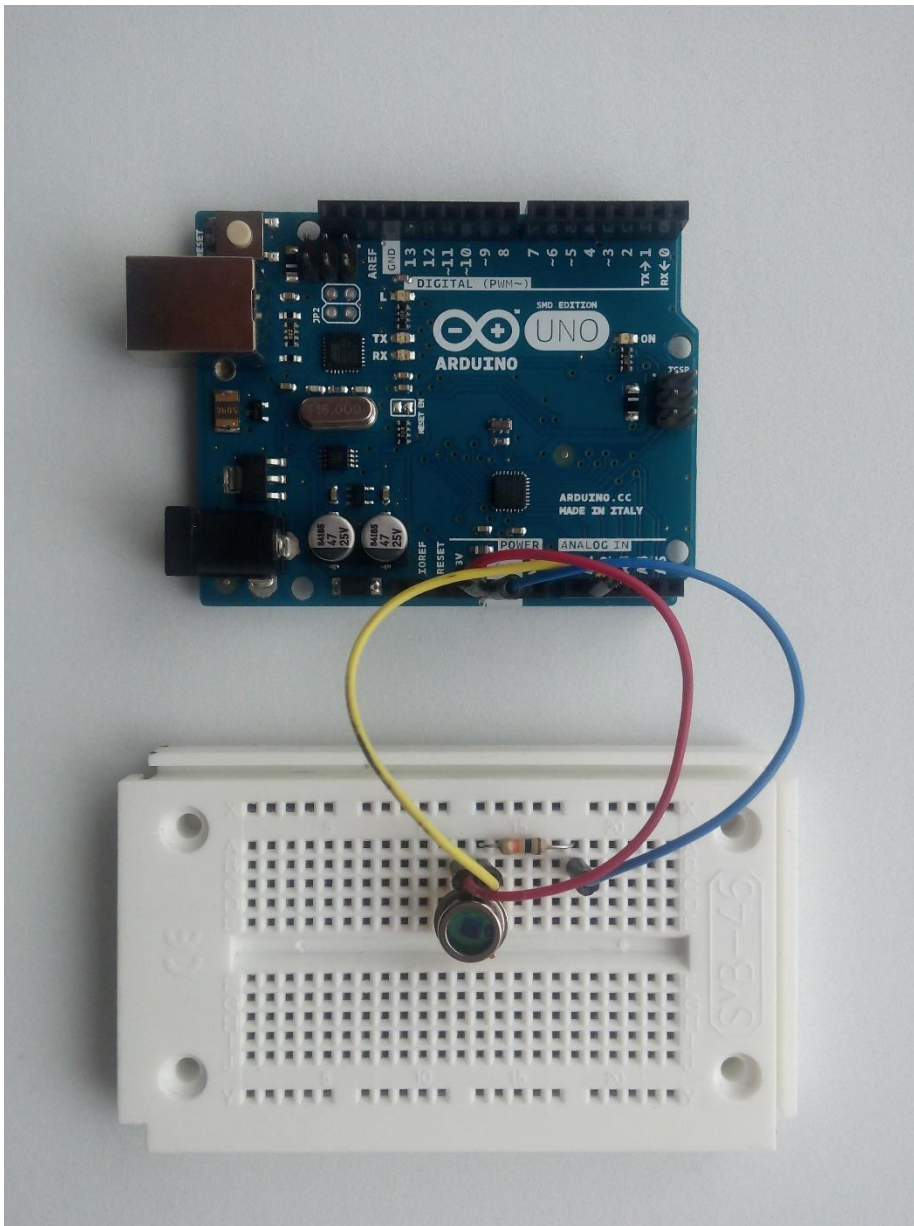


Figura 64. Montaje utilizado para la transmisión de la señal, utilizando una arreglo de tres leds RGB y tarjeta Arduino.

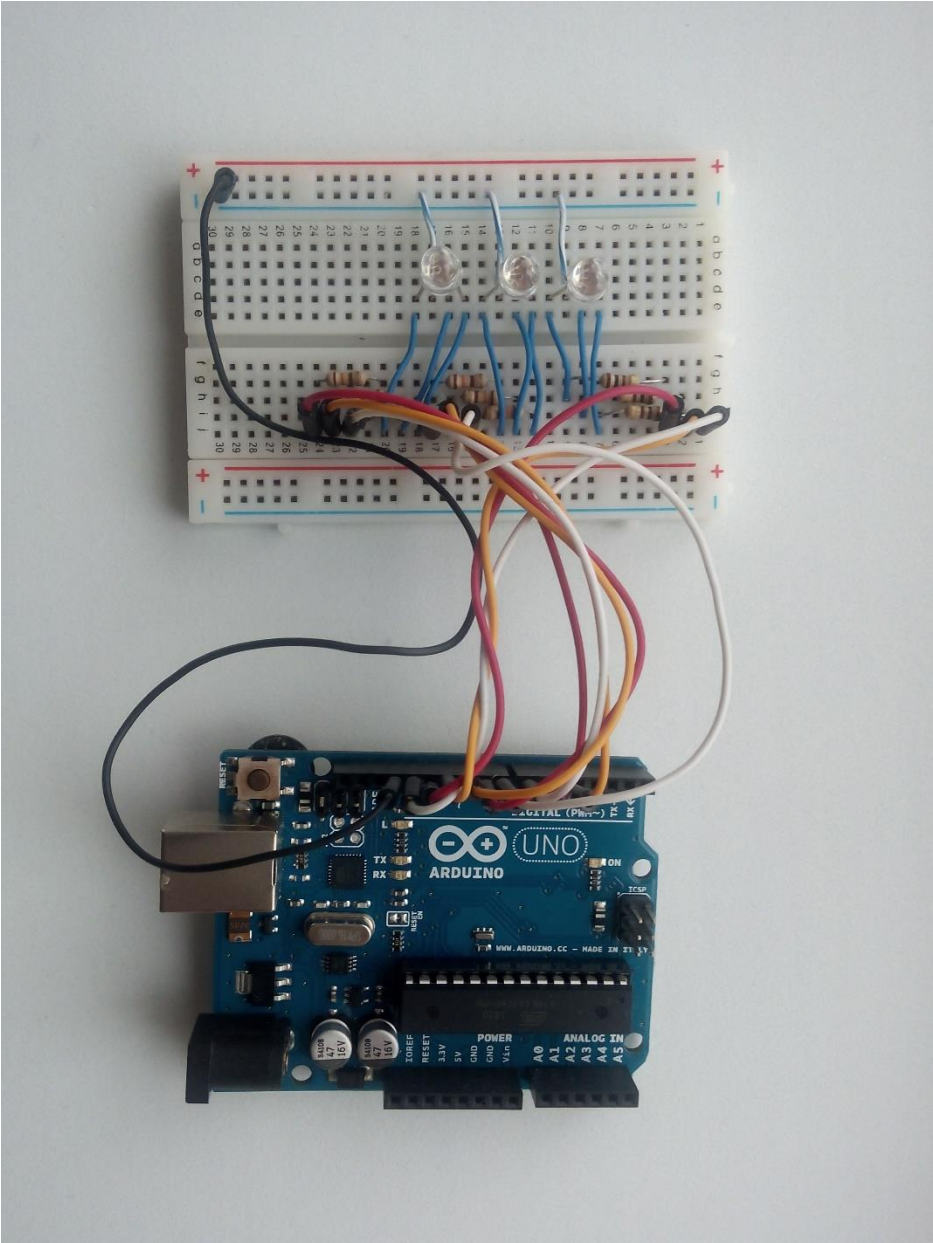


Figura 65. Receptor y transmisor separados a 3 cm aproximadamente, antes de comenzar la transmisión.

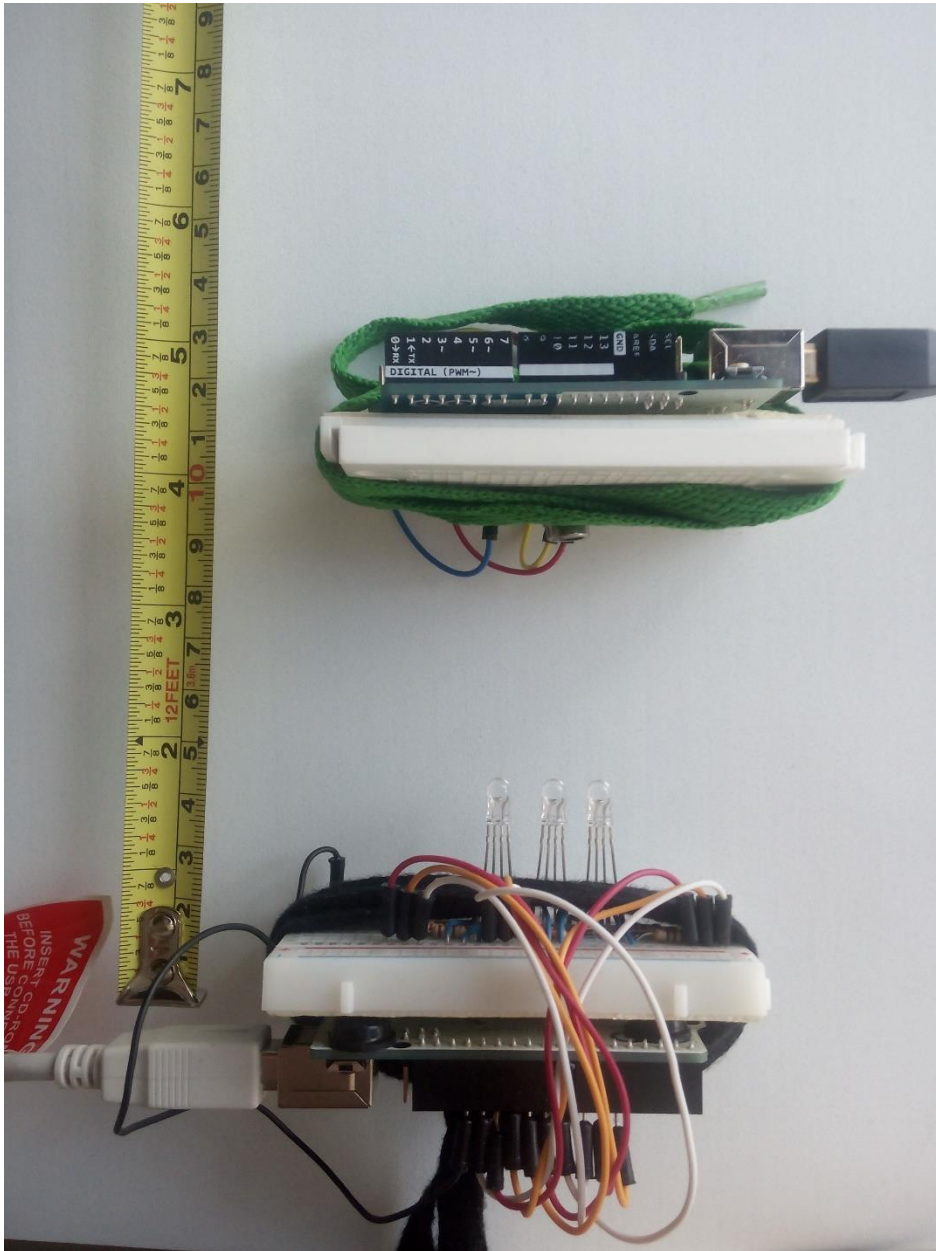
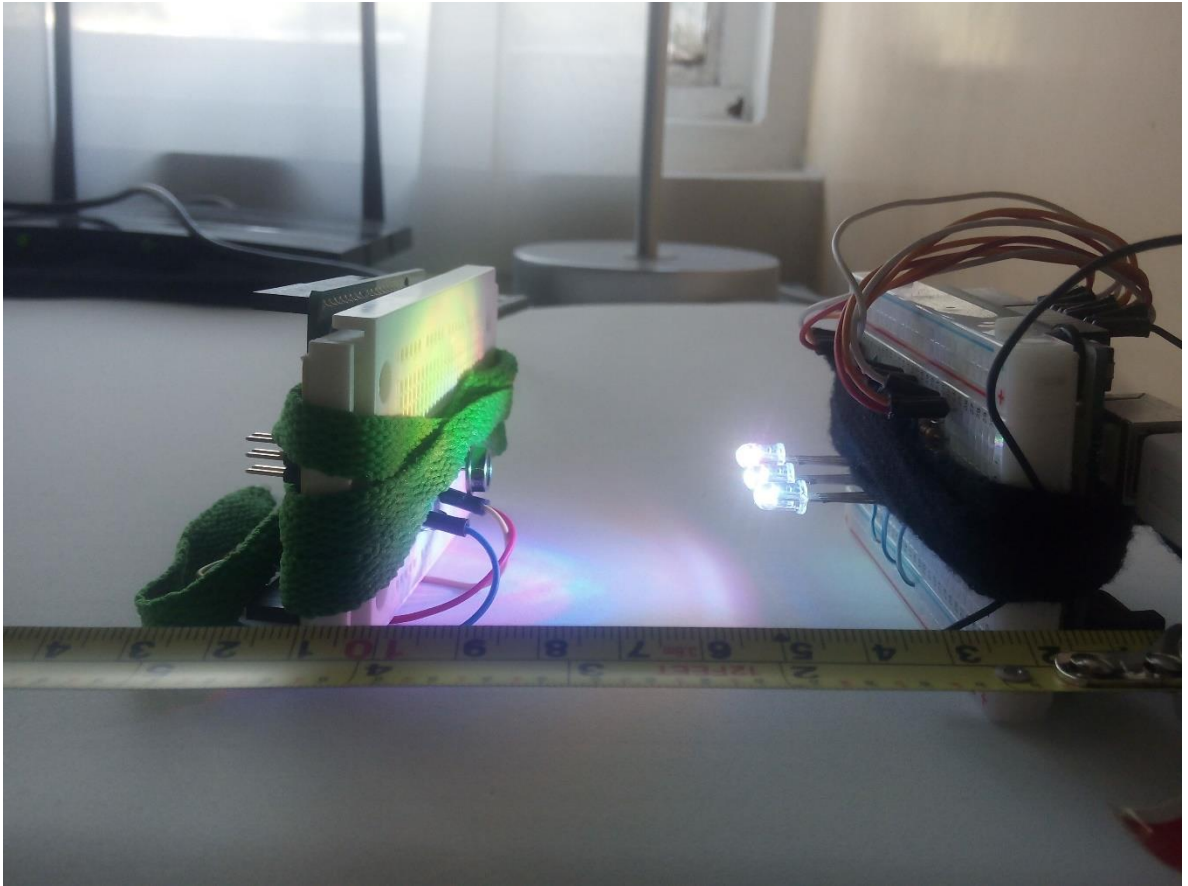


Figura 66. Foto panorámica del receptor y transmisor en funcionamiento.



Anexo B. Códigos de programación

Estos son los códigos de programación utilizados para los dispositivos receptor y transmisor, se utiliza un código modulador OOK el cual recibe datos por interfaz serial en formato ASCII. También se encuentra el código para lectura de datos del fotodiodo BPW21 el cual hace uso del ADC (analog to digital converter) incluido dentro de la tarjeta Arduino y finalmente se encuentra el código Matlab utilizado para realizar el proceso de demodulación y reconstrucción de señal a reloj.

Código modulador OOK de datos ASCII con protocolo de comunicación y señal a reloj.

```
//#####  
//## Código modulador OOK de datos ASCII con protocolo de comunicación  
//## y señal a reloj  
//## Arduino IDE  
//## Version 1.0  
//## @author Andrés Felipe López González  
//#####  
  
// PWM PINS 11, 10, 9, 6, 5, 3  
// DIGITAL PINS 13, 12, 8, 7, 4, 2  
  
int led1_r = 12;  
int led1_g = 11;  
int led1_b = 13;  
int led2_r = 9;  
int led2_g = 10;  
int led2_b = 8;  
int led3_r = 6;  
int led3_g = 5;  
int led3_b = 7;  
int led1_tx = led1_g;  
int led2_tx = led2_g;  
int led3_tx = led3_g;  
  
int start;  
char value;  
String values;  
int length;  
boolean shouldSend;  
  
void setup() {  
  pinMode(led1_r, OUTPUT);  
  pinMode(led1_g, OUTPUT);  
  pinMode(led1_b, OUTPUT);  
  pinMode(led2_r, OUTPUT);
```

```

pinMode(led2_g, OUTPUT);
pinMode(led2_b, OUTPUT);
pinMode(led3_r, OUTPUT);
pinMode(led3_g, OUTPUT);
pinMode(led3_b, OUTPUT);
Serial.begin(115200);
digitalWrite(led1_r, 255);
digitalWrite(led2_r, 255);
digitalWrite(led3_r, 255);
digitalWrite(led1_b, 255);
digitalWrite(led2_b, 255);
digitalWrite(led3_b, 255);
digitalWrite(led1_g, 255);
digitalWrite(led2_g, 255);
digitalWrite(led3_g, 255);
}

void loop () {
  while(Serial.available()) {
    value = Serial.read();
    values = values + String(value);
  }
  if (values != "") {
    length = values.length();
    shouldSend = true;
  }
  if (shouldSend) {
    startClock();
    ascii2bin(values);
    Serial.print('\n');
  }
  stoptx();
  values = "";
  shouldSend = false;
}

void ascii2bin(String values) {
  int length = values.length();
  for ( int i = 0; i < length; i++ ) {
    char c = values.charAt(i);
    for ( int x = 7; x >= 0; x-- ) {
      byte data = bitRead(c,x);
      tx(data);
      Serial.print(data);
    }
  }
}

void tx(byte data) {
  if ( data == 1 ) {
    digitalWrite(led1_tx, 255);
    digitalWrite(led2_tx, 255);
    digitalWrite(led3_tx, 255);
    delayMicroseconds(975);
  }
}

```

```

    }
    if ( data == 0 ) {
        digitalWrite(led1_tx, 0);
        digitalWrite(led2_tx, 0);
        digitalWrite(led3_tx, 0);
        delayMicroseconds(975);
    }
}

void stoptx() {
    digitalWrite(led1_tx, 255);
    digitalWrite(led2_tx, 255);
    digitalWrite(led3_tx, 255);
}

void startClock() {
    for ( int i = 0; i < 200; i++ ) {
        digitalWrite(led1_tx, 0);
        digitalWrite(led2_tx, 0);
        digitalWrite(led3_tx, 0);
        delayMicroseconds(975);
        digitalWrite(led1_tx, 255);
        digitalWrite(led2_tx, 255);
        digitalWrite(led3_tx, 255);
        delayMicroseconds(975);
    }
    for ( int i = 0; i < 200; i++ ) {
        digitalWrite(led1_tx, 0);
        digitalWrite(led2_tx, 0);
        digitalWrite(led3_tx, 0);
        delayMicroseconds(975);
    }
    for ( int i = 0; i < 2; i++ ) {
        digitalWrite(led1_tx, 0);
        digitalWrite(led2_tx, 0);
        digitalWrite(led3_tx, 0);
        delayMicroseconds(975);
        digitalWrite(led1_tx, 255);
        digitalWrite(led2_tx, 255);
        digitalWrite(led3_tx, 255);
        delayMicroseconds(975);
    }
}

```

Código para lectura de datos del fotodiodo BPW21

```
#####  
//## Código para lectura de datos del fotodiodo BPW21  
//## Arduino IDE  
//## Version 1.0  
//## Ayuda por parte del usuario 'jmknapp' del foro de arduino  
//## Foro de arduino: http://forum.arduino.cc/index.php?topic=6549.0  
//## @author Andrés Felipe López González  
#####  
  
#define FASTADC 1  
  
int start;  
  
// defines for setting and clearing register bits  
#ifndef cbi  
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))  
#endif  
#ifndef sbi  
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))  
#endif  
  
void setup() {  
  
#if FASTADC  
  // set prescale to 16  
  sbi(ADCSRA,ADPS2) ;  
  cbi(ADCSRA,ADPS1) ;  
  cbi(ADCSRA,ADPS0) ;  
#endif  
  
  Serial.begin(115200) ;  
  
}  
  
void loop() {  
  Serial.print(analogRead(1));  
  Serial.print('\n');  
  delayMicroseconds(866);  
}
```

Demodulación y reconstrucción de señal a reloj

```
#####  
### Demodulación y reconstrucción de señal a reloj  
### Matlab R2012b  
### Version 1.0  
### @author Andrés Felipe López González  
#####  
  
clear all;  
fclose('all');  
  
report_file = 'report_ook.txt';  
report_file_bits = 'report_ook_bits.txt';  
report_file_values = 'report_ook_values.txt';  
report_file_serial_error_values = 'report_ook_values_serial_error.txt';  
  
if exist(report_file, 'file') == 2  
    delete(report_file);  
end  
if exist(report_file_bits, 'file') == 2  
    delete(report_file_bits);  
end  
if exist(report_file_values, 'file') == 2  
    delete(report_file_values);  
end  
if exist(report_file_serial_error_values, 'file') == 2  
    delete(report_file_serial_error_values);  
end  
  
s = serial('COM15');  
set(s, 'BaudRate', 115200, 'Timeout', 2, 'InputBufferSize', 512);  
read = 0;  
readvalue = 0;  
delta = 0;  
digits_value = 0;  
buffer = zeros(1, 2);  
buffer_rx = zeros(1, 1000); % 1 Kbps bitrate  
bitrate = 1000;  
bit_one = 0;  
bit_zero = 0;  
counter = 1;  
counter_rx = 1;  
error = 20;  
error_treshold = 15;  
delta_treshold = 0;  
notx_treshold = 85;  
startrx = false;  
stoprx = true;  
samples = 0;  
fopen(s);  
fscanf(s, '%i');
```



```

while true
    if ( counter > 2 )
        counter = 1;
    end
    if ( counter_rx > bitrate )
        startrx = false;
        stoprx = true;
        writetofilenobreak(report_file_bits,buffer_rx);
        buffer_rx = zeros(1, 1000);
        counter_rx = 1;
        buffer = zeros(1, 2);
        counter = 1;
        break;
        samples = samples + 1;
    end
    if ( samples == 5 )
        break;
    end
    % Read Serial data
    read = fscanf(s,'%i');
    readvalue = num2str(read);
    digits_value = numel(readvalue);
    if ( digits_value > 3 )
        digits_value = 3;
    end
    value = str2num(readvalue(1:digits_value)); %#ok<ST2NM>
    writetofile(report_file,value);
    % -----
    if (stoprx)
        % read value with error detection
        if not (isinteger(uint32(value)))
            %value = buffer(end);
            value = 3;
            writetofile(report_file_serial_error_values,1);
        end
        if (size(value) == 1)
            buffer(counter) = value;
        else
            buffer(counter) = 3;
            %buffer(counter) = buffer(end);
            writetofile(report_file_serial_error_values,1);
        end
        % -----
        if ( counter == 2 )
            disp(buffer);
            if ( buffer(counter-1) > buffer(counter) )
                delta_treshold = (buffer(counter)*100)/(buffer(counter-
1));

                bit_one = buffer(counter-1);
                bit_zero = buffer(counter);
            else
                delta_treshold = (buffer(counter-
1)*100)/(buffer(counter));
                bit_one = buffer(counter);

```

```

        bit_zero = buffer(counter-1);
    end
    if ( delta_treshold > error_treshold && delta_treshold <
notx_treshold )
        startrx = true;
        stoprx = false;
        writetofile(report_file_values,bit_one);
        writetofile(report_file_values,bit_zero);
        disp('Signal Detected');
        disp(bit_one);
        disp(bit_zero);
        disp(delta_treshold);
    else
        counter = 0;
    end
end
counter = counter + 1;
%disp(buffer);
end
if (startrx)
    % read value with error detection
    if not (isinteger(uint32(value)))
        value = buffer_rx(end);
        writetofile(report_file_serial_error_values,1);
    end
    % -----
    if (size(value) == 1)
        if value <= bit_one + error
            buffer_rx(counter_rx) = 0;
        end
        if value >= bit_zero + error
            buffer_rx(counter_rx) = 1;
        end
    else
        buffer_rx(counter_rx) = buffer_rx(end);
        writetofile(report_file_serial_error_values,1);
    end
end
writetofile(report_file_values,value);
counter_rx = counter_rx + 1;
end
end

```

Anexo C. Guía de laboratorio



Pulse_Width_Modulation.pdf

Anexo D. Datasheets



LED-RGB.pdf



BPW21.pdf



Arduino_Uno_Rev3-schematic.pdf

Pulse Width Modulation (PWM)

Marco teórico

PWM es una técnica de modulación digital que modifica el ciclo de trabajo de una señal. Esta técnica de modulación es usada comúnmente para controlar la energía enviada en cada pulso de señal, lo que permite variar la intensidad de luz generada por un led en un tiempo determinado.

Objetivos

- Conocer la forma de cómo implementar PWM usando una tarjeta Arduino.
- Entender el uso de la función `analogWrite()`.
- Entender la estructura básica de un programa para Arduino.

Materiales

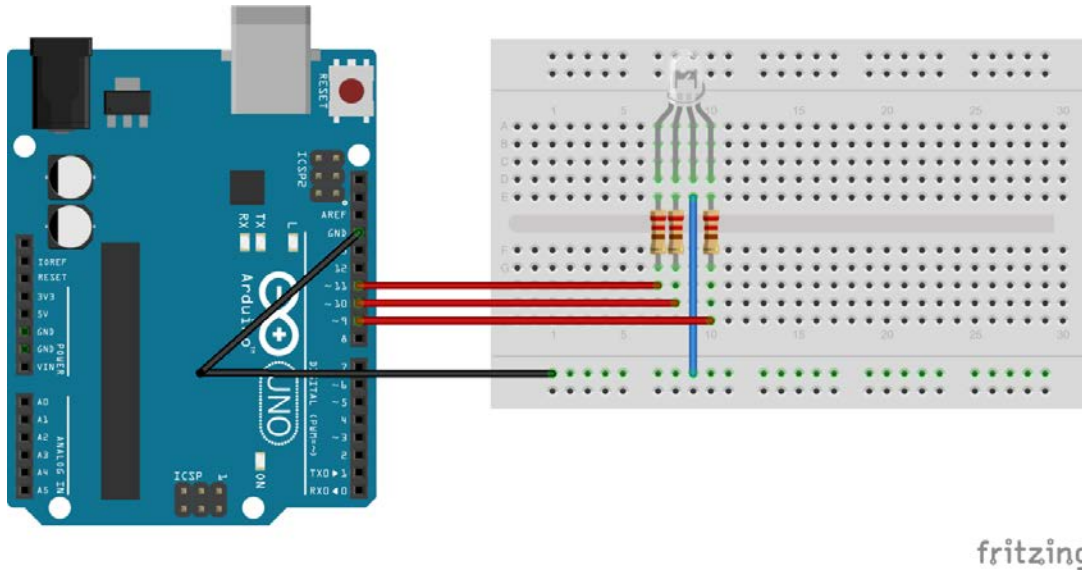
- Tarjeta Arduino
- Protoboard
- Cable
- Led RGB
- 3 resistencias 220 ohms c/u
- Software Arduino IDE
- Computador

Fuentes

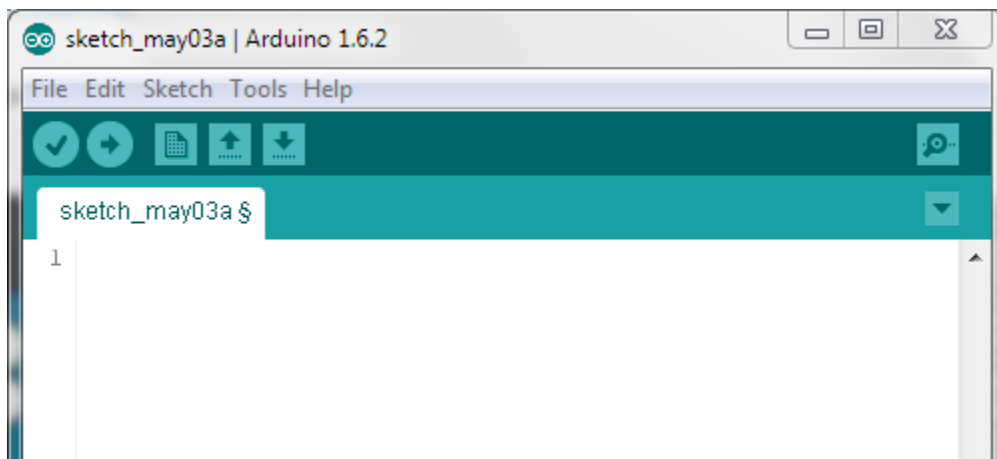
<https://learn.adafruit.com/adafruit-arduino-lesson-3-rgb-leds/arduino-sketch>

Procedimiento

1. Realizar el montaje del circuito de acuerdo a la siguiente figura:



2. Abrir el software Arduino IDE y conectar la tarjeta Arduino.



3. Declarar las variables que tendrán los valores de cada PIN (11, 10 y 9):

```
int redPin = 11;  
int greenPin = 10;  
int bluePin = 9;
```

4. Declarar la función setup():

```
void setup()
{
  pinMode(redPin, OUTPUT);
  pinMode(greenPin, OUTPUT);
  pinMode(bluePin, OUTPUT);
}
```

5. Declarar la función loop():

```
void loop()
{
  setColor(255, 0, 0); // red
  delay(1000);
  setColor(0, 255, 0); // green
  delay(1000);
  setColor(0, 0, 255); // blue
  delay(1000);
}
```

6. Declarar la función setColor():

```
void setColor(int red, int green, int blue)
{
  analogWrite(redPin, red);
  analogWrite(greenPin, green);
  analogWrite(bluePin, blue);
}
```

7. Subir el programa a la tarjeta Arduino en la opción **File** - > **Upload**. Después de esto el led RGB comenzará a iluminar cada uno de los colores: rojo, verde y azul.

Análisis

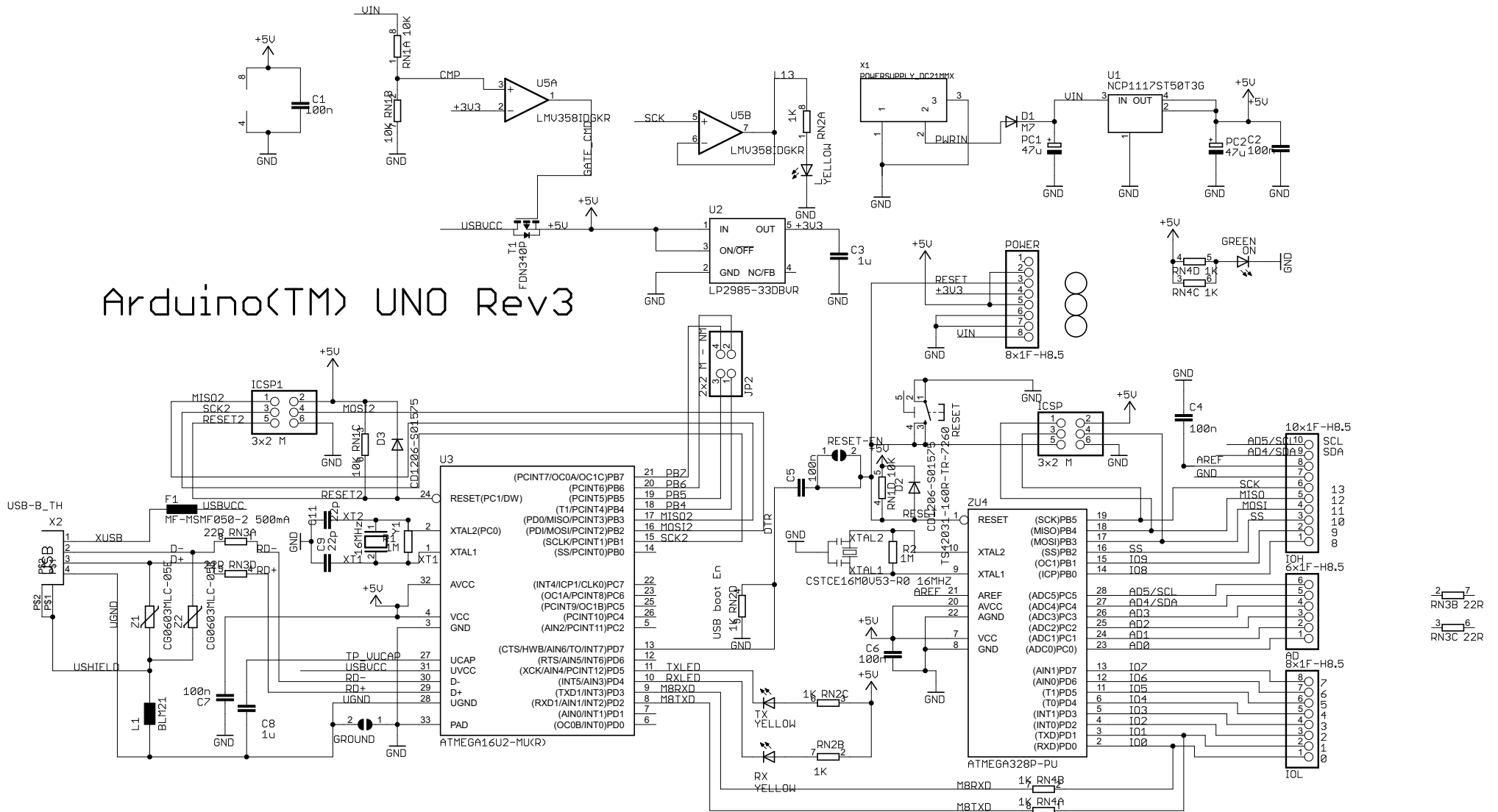
- La tarjeta Arduino al tener un DAC (Digital to Analog Converter) de 8 bits de resolución soporta una escala de valores entre 0 – 255 que podrán ser convertidos a valores de voltaje, los cuales alimentarán el ánodo de cada diodo led.
- La función analogWrite() imprime el valor de voltaje en cada una de las salidas de la tarjeta Arduino, declaradas inicialmente.
- Un programa para Arduino siempre estará compuesto mínimo por tres partes:
 - Declaración de variables con dirección de puertos.
 - Función setup() la cual se encarga de inicializar las variables, cargar librerías, inicializar puertos de entrada y salida.
 - Función loop() se encargará de ejecutar las instrucciones requeridas de forma indefinida.

Experimento

1. Se pueden variar los valores de la función setColor() con el fin de generar luz de diferentes colores, combinando las componentes RGB, por ejemplo:

```
setColor(80, 0, 80); // purple
delay(1000);
setColor(255, 255, 0); // yellow
delay(1000);
setColor(0, 255, 255); // aqua
delay(1000);
```

2. Se puede disminuir el valor delay(1000) por delay(500) lo cual activaría el cambio de color cada 0.5 s.
3. Se podría enviar un dato por interfaz serial, y de acuerdo al valor, cambiar el color del led.
4. Se podría cambiar el color del led y detectarlo con un receptor (fotodiodo).



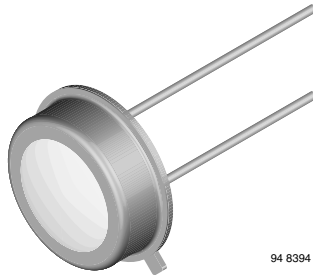
Arduino(TM) UNO Rev3

Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information.

ARDUINO is a registered trademark.

Use of the ARDUINO name must be compliant with <http://www.arduino.cc/en/Main/Policy>

Silicon Photodiode, RoHS Compliant



DESCRIPTION

BPW21R is a planar Silicon PN photodiode in a hermetically sealed short TO-5 case, especially designed for high precision linear applications.

Due to its extremely high dark resistance, the short circuit photocurrent is linear over seven decades of illumination level.

On the other hand, there is a strictly logarithmic correlation between open circuit voltage and illumination over the same range.

The device is equipped with a flat glass window with built in color correction filter, giving an approximation to the spectral response of the human eye.

FEATURES

- Package type: leaded
- Package form: TO-5
- Dimensions (in mm): Ø 8.13
- Radiant sensitive area (in mm²): 7.5
- High photo sensitivity
- Adapted to human eye responsivity
- Angle of half sensitivity: $\varphi = \pm 50^\circ$
- Hermetically sealed package
- Cathode connected to package
- Flat glass window
- Low dark current
- High shunt resistance
- High linearity
- Lead (Pb)-free component in accordance with RoHS 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC



RoHS
COMPLIANT

APPLICATIONS

- Sensor in exposure and color measuring purposes

PRODUCT SUMMARY			
COMPONENT	I_{ra} (mA)	φ (deg)	$\lambda_{0.5}$ (nm)
BPW21R	9	± 50	420 to 675

Note

Test condition see table "Basic Characteristics"

ORDERING INFORMATION			
ORDERING CODE	PACKAGING	REMARKS	PACKAGE FORM
BPW21R	Bulk	MOQ: 500 pcs, 500 pcs/bulk	TO-5

Note

MOQ: minimum order quantity

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage		V_R	10	V
Power dissipation	$T_{amb} \leq 50^\circ C$	P_V	300	mW
Junction temperature		T_j	125	$^\circ C$
Operating temperature range		T_{amb}	- 40 to + 125	$^\circ C$
Storage temperature range		T_{stg}	- 40 to + 125	$^\circ C$
Soldering temperature	$t \leq 5$ s	T_{sd}	260	$^\circ C$
Thermal resistance junction/ambient	Connected with Cu wire, 0.14 mm ²	R_{thJA}	250	K/W

Note

$T_{amb} = 25^\circ C$, unless otherwise specified

BASIC CHARACTERISTICS						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Forward voltage	$I_F = 50 \text{ mA}$	V_F		1.0	1.3	V
Breakdown voltage	$I_R = 20 \text{ }\mu\text{A}, E = 0$	$V_{(BR)}$	10			V
Reverse dark current	$V_R = 5 \text{ V}, E = 0$	I_{ro}		2	30	nA
Diode capacitance	$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}, E = 0$	C_D		1.2		nF
	$V_R = 5 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}, E = 0$	C_D		400		pF
Dark resistance	$V_R = 10 \text{ mV}$	R_D		38		$G\Omega$
Open circuit voltage	$E_A = 1 \text{ klx}$	V_o	280	450		mV
Temperature coefficient of V_o	$E_A = 1 \text{ klx}$	TK_{V_o}		- 2		mV/K
Short circuit current	$E_A = 1 \text{ klx}$	I_k	4.5	9		μA
Temperature coefficient of I_k	$E_A = 1 \text{ klx}$	TK_{I_k}		- 0.05		%/K
Reverse light current	$E_A = 1 \text{ klx}, V_R = 5 \text{ V}$	I_{ra}	4.5	9		μA
Sensitivity	$V_R = 5 \text{ V}, E_A = 10^{-2} \text{ to } 10^5 \text{ lx}$	S		9		nA/lx
Angle of half sensitivity		φ		± 50		deg
Wavelength of peak sensitivity		λ_p		565		nm
Range of spectral bandwidth		$\lambda_{0.5}$		420 to 675		nm
Rise time	$V_R = 0 \text{ V}, R_L = 1 \text{ k}\Omega, \lambda = 660 \text{ nm}$	t_r		3.1		μs
Fall time	$V_R = 0 \text{ V}, R_L = 1 \text{ k}\Omega, \lambda = 660 \text{ nm}$	t_f		3.0		μs

Note

$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

BASIC CHARACTERISTICS

$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

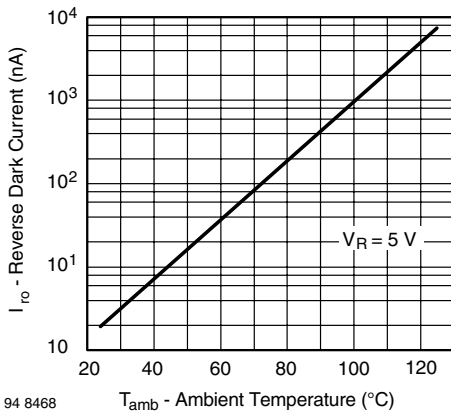


Fig. 1 - Reverse Dark Current vs. Ambient Temperature

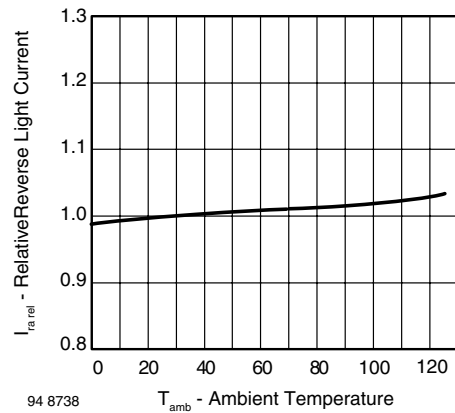


Fig. 2 - Relative Reverse Light Current vs. Ambient Temperature

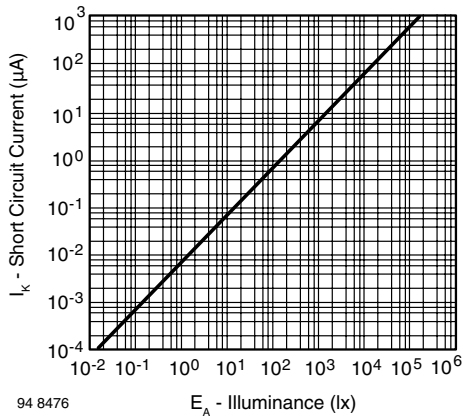


Fig. 3 - Short Circuit Current vs. Illuminance

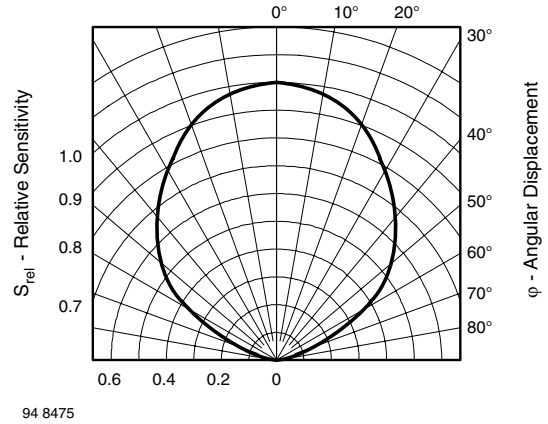


Fig. 6 - Relative Radiant Sensitivity vs. Angular Displacement

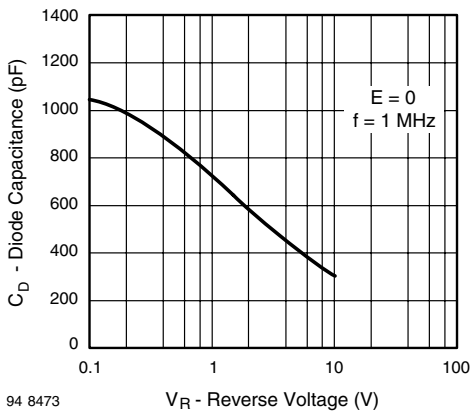


Fig. 4 - Diode Capacitance vs. Reverse Voltage

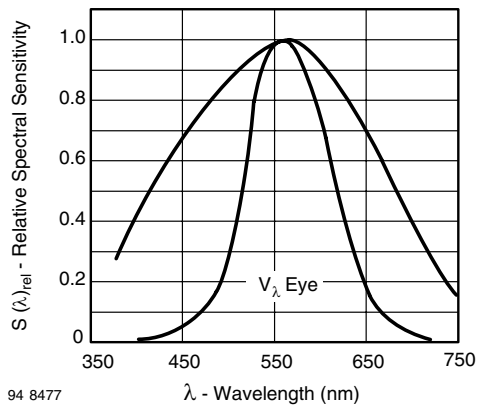
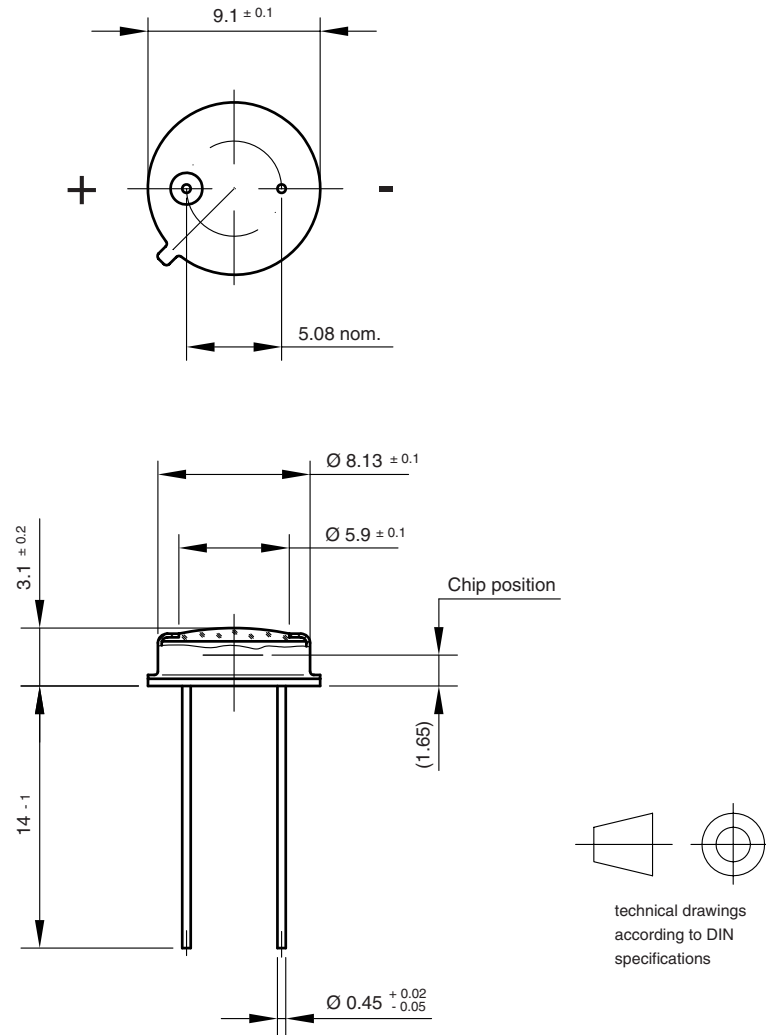


Fig. 5 - Relative Spectral Sensitivity vs. Wavelength

PACKAGE DIMENSIONS in millimeters



Drawing-No.: 6.511-5002.01-4
Issue:1; 01.07.96
96 12181



Disclaimer

All product specifications and data are subject to change without notice.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained herein or in any other disclosure relating to any product.

Vishay disclaims any and all liability arising out of the use or application of any product described herein or of any information provided herein to the maximum extent permitted by law. The product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein, which apply to these products.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay.

The products shown herein are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications unless otherwise expressly indicated. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so entirely at their own risk and agree to fully indemnify Vishay for any damages arising or resulting from such use or sale. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.



SHEN ZHEN HANHUA OPTO CO.,LTD

Adress: YiShida-BaoYicheng technology park ,Guanlan Street , Baoan district , Shenzhen of China

Tel :0086-755-33693901 Website : www.hanhualed.com.cn Fax: 0086- 755-33693906

MSN: hanhualed@hotmail.com Email: admin@hanhualed.com.cn Mobile:86-13510694247

SPECIFICATION FOR APPROVAL

承 认 书

CUSTOMER'S CODE

客户代码: _____

DESCRIPTION

品 名: _____ 发光二极管

SPECIFICATION

规 格: _____ $\Phi 5$ 雾状四脚三色共阳

DATE

送样日期: _____

PART NO.

本厂型号: _____ HH-500CRGBC503W-共阳 (Diffused)

REFERENCE No.

档案号: _____

NUMBER OF SAMPLE

送样数量 _____

COPY OF ACKNOWLEDGEMENT

承认书份数 _____

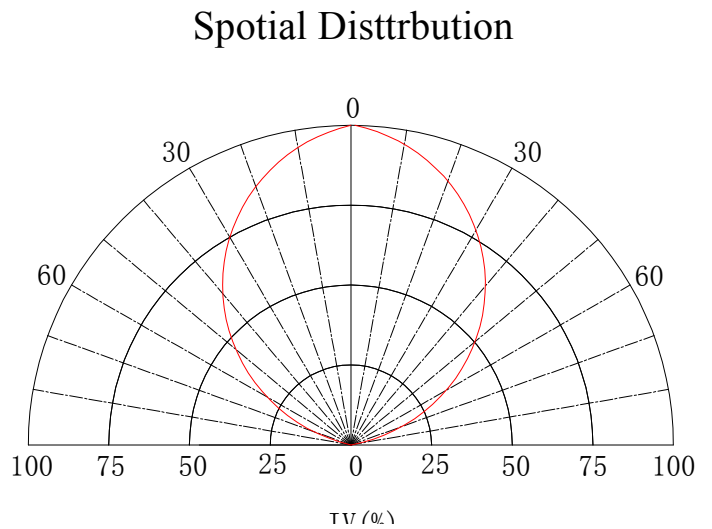
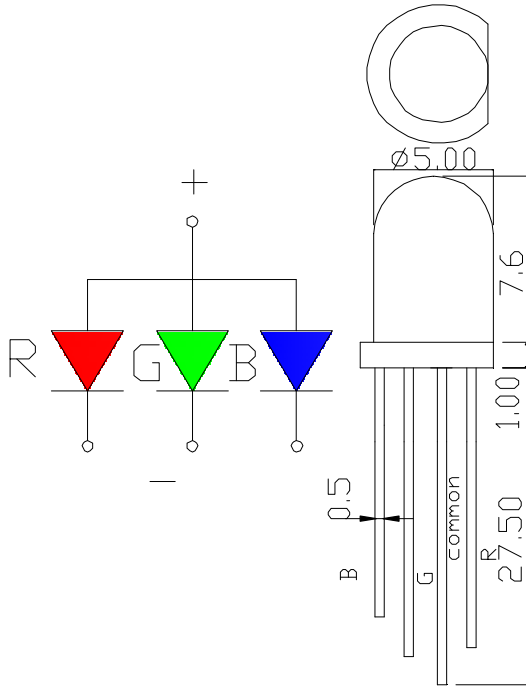
Approved By Customer 客 户 承 认	Qualified By 核 准	Form Designer 制 作

Address: YiShida-BaoYicheng technology park ,Guanlan Street , Baoan district , Shenzhen of China

Tel :0086-755-33693901 Website : www.hanhualed.com.cn Fax: 0086- 755-33693906

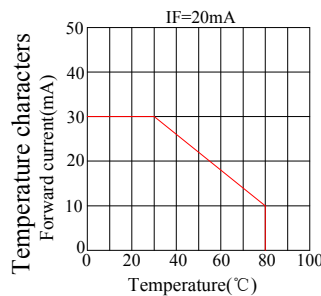
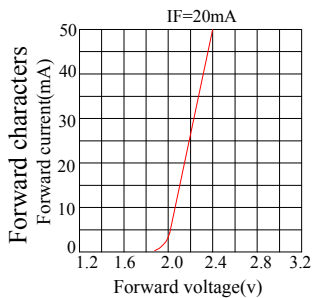
MSN: hanhualed@hotmail.com Email: admin@hanhualed.com.cn Mobile:86-13510694247

Emitter 外型图:



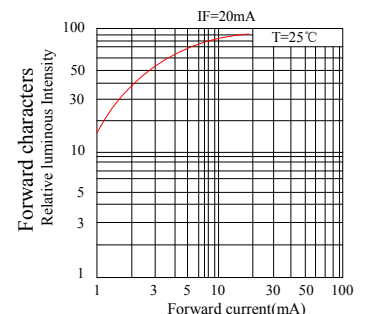
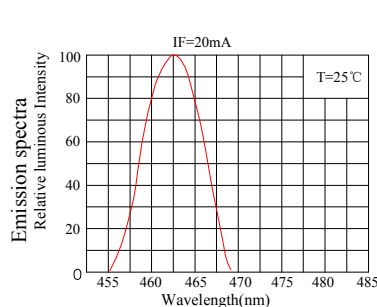
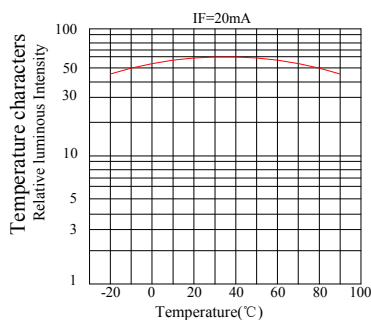
Lens: Diffused

Typical electrical-optical Characteristics curves



Notes:

The data are an typical presentation of the product,Contact customer service for details of technical information and warranty.
The product is sensitive to static antistatic operation environment is recommended
Products are shipped in either bulk bag package or taping.



Address: YiShida-BaoYicheng technology park ,Guanlan Street , Baoan district , Shenzhen of China

Tel :0086-755-33693901 Website : www.hanhualed.com.cn Fax: 0086- 755-33693906

MSN: hanhualed@hotmail.com Email: admin@hanhualed.com.cn Mobile:86-13510694247

■ Absolute Maximum Rating 极限工作参数

Item 项目	Symbol 代号	Absolute Maximum Rating 极限工作参数	Unit 单位
Forward Current 正向电流	IF	20	mA
Peak Forward Current 瞬间脉冲电流	IFP	50	mA
Reverse Voltage 反向电压	VR	5	V
Power Dissipation 消耗功率	PD	100	mw
Electrostatic discharge 静电释放	ESD	1000	V
Operation Temperature 工作温度范围	TOPR	-25~+80	°C
Storage Temperature 存放温度范围	TSTG	-40~+80	°C
Lead Soldering Temperature 最高焊接温度	TSOL	330 °C for 3sec Max.	

*Ifp Conditions: Pulse Wide ≤ 10msec ≤ 1/10 瞬间脉冲电流

*Tsol Conditions: 3mm from the base of epoxy bulb 最高焊接温度 距胶体 3mm

■ Typical Optical/Electrical Characteristics 光电特性参数

Item 项目	Symbol 代号	Condition 测试条件	Min 最小值	Typ 典型值	Max 最大值	Unit 单位	
Forward Voltage 正向电压	VF	IF=20mA	R	1.9	2.0	2.1	V
			G	3.1	3.2	3.3	
			B	3.0	3.1	3.2	
Light intensity 光强度	IV	IF=20mA	R	800	900	1200	mcd
			G	1000	1500	2000	
			B	600	700	800	
Wavelength 波长	WD	IF=20mA	R	620	623	625	nm
			G	519	520	522	
			B	467	468	470	
Reverse current 逆向电流	IR	IF=20mA	0	/	5	uA	
Viewing Angle 半光全角	2 θ 1/2	IF=20mA		65		deg	
Recommend Forward Current 持续正向电流	IF(rec)	IF=20mA			20	mA	

Notes:

1. Work absolute ratings Ta=25°C 工作常规值 温度=25°C

2. Tolerance of measurement of forward voltage ± 0.1V 正向电压误差范围 ± 0.1V

LED LAMP RELIABILITY

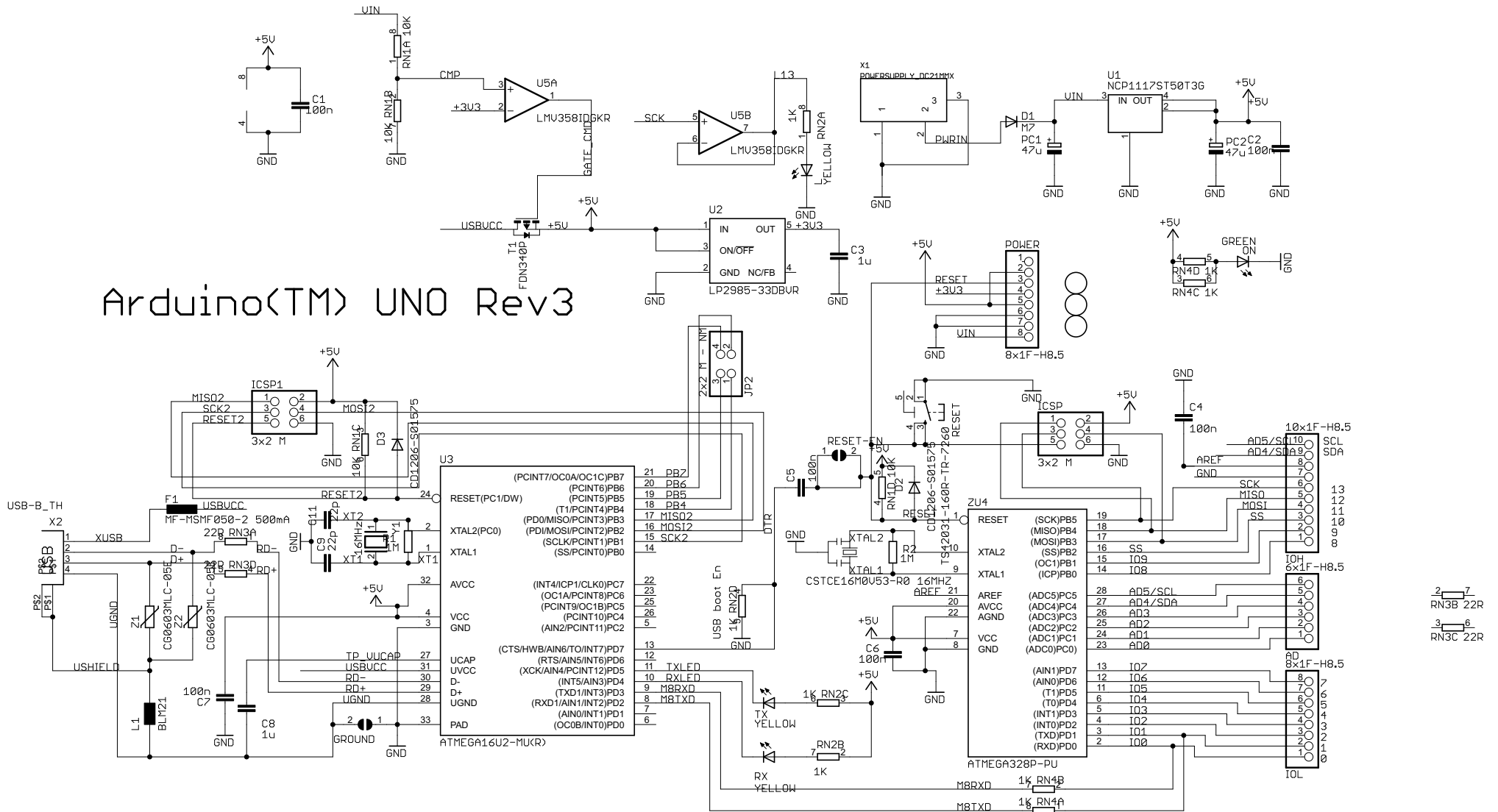
● Test Items And Results

Type	Test Item	REF. Standard	Test Condition	Note	Number of Damaged
Environmental Sequence	Temperature Cycle	JIS C 7021 (1997) A-4	-20°C → 25°C → 80°C → 25°C 30mins,5mins,30mins,5mins	100 cycles	0/100
	High Humidity Heat Cycle	JIS C 7021 (1997) A-5	30°C → 65°C 90%RH 24hrs/1cycle	10 cycles	0/100
	High Temperature Storage	JIS C 7021 (1997) B-10	Ta=80°C	1000hrs	0/100
	Humidity Heat Storage	JIS C 7021 (1997) B-11	Ta=60°C RH=90%	1000hrs	0/100
	Low Temperature Storage	JIS C 7021 (1997) B-12	Ta= -30°C	1000hrs	0/100
Operation Sequence	Life Test	JIS C 7035 (1985)	Ta=25°C I _F =20mA	1000hrs	0/100
	High Humidity Heat Life Test	*	60°C RH=90% I _F =20mA	500hrs	0/100
	Low Temperature Life Test	*	Ta= -20°C I _F =20mA	1000hrs	0/100
Destructive Sequence	Resistance to Soldering Heat	JIS C 7021 (1997) A-11	Tsol=260 ± 5°C,10sec (3mm from the base of the epoxy bulb)	1 time	0/20
	Solderability	JIS C 7021 (1997) A-2	Tsol=235 ± 5°C,5sec (Using flux)	1 time (over 95%)	0/20
	Lead Pull/Bend Test	JIS C 7021 (1997)A-11	Load 2.5N (0.25kgf) 0° → 90° → 0° Bending 3 times	No noticeable damage	0/20

* Refer to reliability test standard specification for in this line.

● Criteria for Judging The Damage

Item	Symbol	Test Condition	Criteria for Judgment	
			Min.	Max.
Forward Voltage	V _F	I _F = 20mA	---	Initial data x 1.1
Reverse Current	I _R	V _R = 5V	---	Initial data x 2.0
Luminous Intensity	I _v	I _F = 20mA	Initial data x 0.7	---

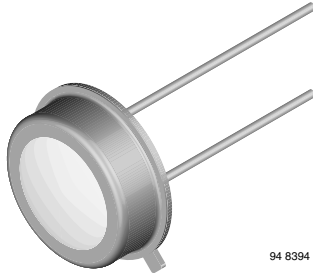


Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information.

ARDUINO is a registered trademark.

Use of the ARDUINO name must be compliant with <http://www.arduino.cc/en/Main/Policy>

Silicon Photodiode, RoHS Compliant



DESCRIPTION

BPW21R is a planar Silicon PN photodiode in a hermetically sealed short TO-5 case, especially designed for high precision linear applications.

Due to its extremely high dark resistance, the short circuit photocurrent is linear over seven decades of illumination level.

On the other hand, there is a strictly logarithmic correlation between open circuit voltage and illumination over the same range.

The device is equipped with a flat glass window with built in color correction filter, giving an approximation to the spectral response of the human eye.

FEATURES

- Package type: leaded
- Package form: TO-5
- Dimensions (in mm): Ø 8.13
- Radiant sensitive area (in mm²): 7.5
- High photo sensitivity
- Adapted to human eye responsivity
- Angle of half sensitivity: $\varphi = \pm 50^\circ$
- Hermetically sealed package
- Cathode connected to package
- Flat glass window
- Low dark current
- High shunt resistance
- High linearity
- Lead (Pb)-free component in accordance with RoHS 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC



RoHS
COMPLIANT

APPLICATIONS

- Sensor in exposure and color measuring purposes

PRODUCT SUMMARY			
COMPONENT	I_{ra} (mA)	φ (deg)	$\lambda_{0.5}$ (nm)
BPW21R	9	± 50	420 to 675

Note

Test condition see table "Basic Characteristics"

ORDERING INFORMATION			
ORDERING CODE	PACKAGING	REMARKS	PACKAGE FORM
BPW21R	Bulk	MOQ: 500 pcs, 500 pcs/bulk	TO-5

Note

MOQ: minimum order quantity

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage		V_R	10	V
Power dissipation	$T_{amb} \leq 50^\circ C$	P_V	300	mW
Junction temperature		T_j	125	$^\circ C$
Operating temperature range		T_{amb}	- 40 to + 125	$^\circ C$
Storage temperature range		T_{stg}	- 40 to + 125	$^\circ C$
Soldering temperature	$t \leq 5$ s	T_{sd}	260	$^\circ C$
Thermal resistance junction/ambient	Connected with Cu wire, 0.14 mm ²	R_{thJA}	250	K/W

Note

$T_{amb} = 25^\circ C$, unless otherwise specified

BASIC CHARACTERISTICS						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Forward voltage	$I_F = 50 \text{ mA}$	V_F		1.0	1.3	V
Breakdown voltage	$I_R = 20 \text{ }\mu\text{A}, E = 0$	$V_{(BR)}$	10			V
Reverse dark current	$V_R = 5 \text{ V}, E = 0$	I_{ro}		2	30	nA
Diode capacitance	$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}, E = 0$	C_D		1.2		nF
	$V_R = 5 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}, E = 0$	C_D		400		pF
Dark resistance	$V_R = 10 \text{ mV}$	R_D		38		$G\Omega$
Open circuit voltage	$E_A = 1 \text{ klx}$	V_o	280	450		mV
Temperature coefficient of V_o	$E_A = 1 \text{ klx}$	TK_{V_o}		- 2		mV/K
Short circuit current	$E_A = 1 \text{ klx}$	I_k	4.5	9		μA
Temperature coefficient of I_k	$E_A = 1 \text{ klx}$	TK_{I_k}		- 0.05		%/K
Reverse light current	$E_A = 1 \text{ klx}, V_R = 5 \text{ V}$	I_{ra}	4.5	9		μA
Sensitivity	$V_R = 5 \text{ V}, E_A = 10^{-2} \text{ to } 10^5 \text{ lx}$	S		9		nA/lx
Angle of half sensitivity		φ		± 50		deg
Wavelength of peak sensitivity		λ_p		565		nm
Range of spectral bandwidth		$\lambda_{0.5}$		420 to 675		nm
Rise time	$V_R = 0 \text{ V}, R_L = 1 \text{ k}\Omega, \lambda = 660 \text{ nm}$	t_r		3.1		μs
Fall time	$V_R = 0 \text{ V}, R_L = 1 \text{ k}\Omega, \lambda = 660 \text{ nm}$	t_f		3.0		μs

Note

$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

BASIC CHARACTERISTICS

$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

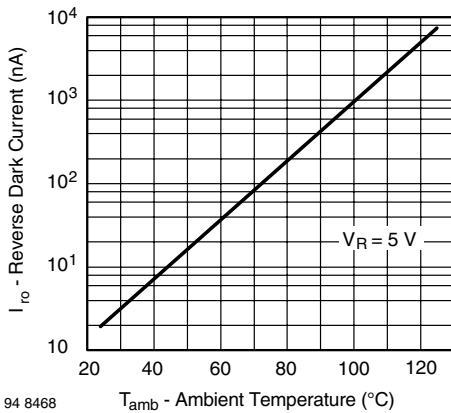


Fig. 1 - Reverse Dark Current vs. Ambient Temperature

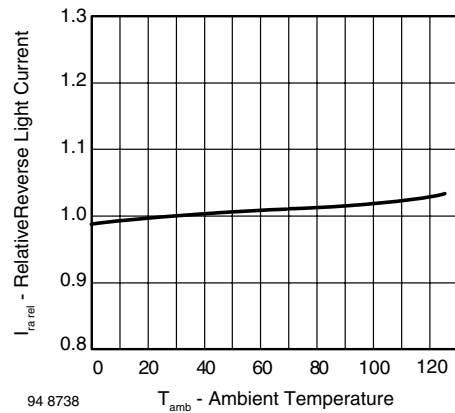


Fig. 2 - Relative Reverse Light Current vs. Ambient Temperature

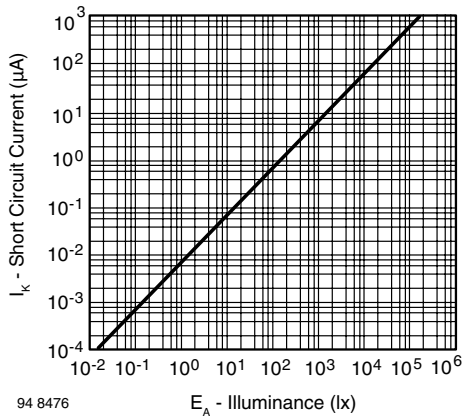


Fig. 3 - Short Circuit Current vs. Illuminance

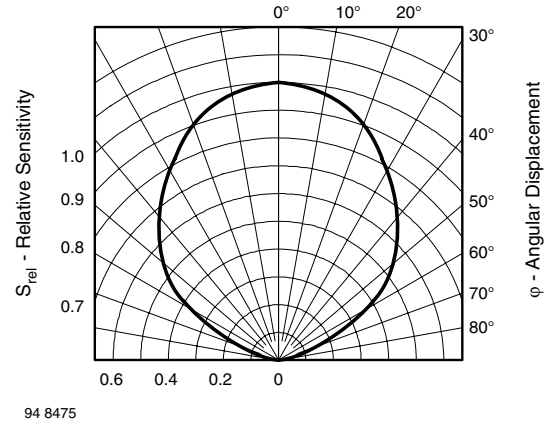


Fig. 6 - Relative Radiant Sensitivity vs. Angular Displacement

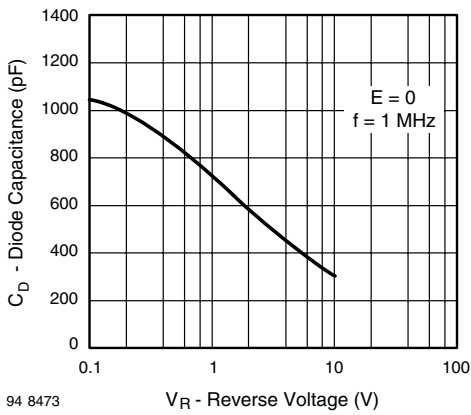


Fig. 4 - Diode Capacitance vs. Reverse Voltage

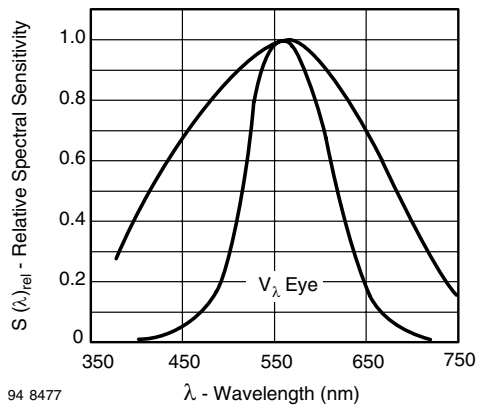
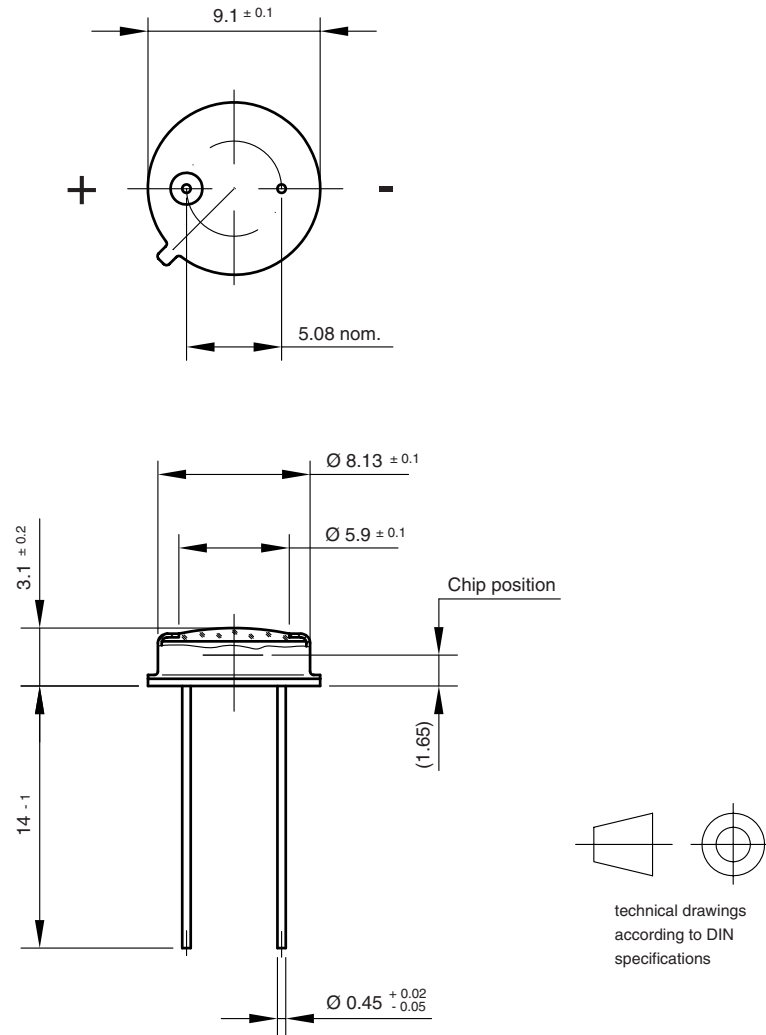


Fig. 5 - Relative Spectral Sensitivity vs. Wavelength

PACKAGE DIMENSIONS in millimeters



Drawing-No.: 6.511-5002.01-4
Issue:1; 01.07.96
96 12181



Disclaimer

All product specifications and data are subject to change without notice.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained herein or in any other disclosure relating to any product.

Vishay disclaims any and all liability arising out of the use or application of any product described herein or of any information provided herein to the maximum extent permitted by law. The product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein, which apply to these products.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay.

The products shown herein are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications unless otherwise expressly indicated. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so entirely at their own risk and agree to fully indemnify Vishay for any damages arising or resulting from such use or sale. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.



SHEN ZHEN HANHUA OPTO CO.,LTD

Adress: YiShida-BaoYicheng technology park ,Guanlan Street , Baoan district , Shenzhen of China

Tel :0086-755-33693901 Website : www.hanhualed.com.cn Fax: 0086- 755-33693906

MSN: hanhualed@hotmail.com Email: admin@hanhualed.com.cn Mobile:86-13510694247

SPECIFICATION FOR APPROVAL

承 认 书

CUSTOMER'S CODE

客户代码: _____

DESCRIPTION

品 名: _____ 发光二极管

SPECIFICATION

规 格: _____ $\Phi 5$ 雾状四脚三色共阳

DATE

送样日期: _____

PART NO.

本厂型号: _____ HH-500CRGBC503W-共阳 (Diffused)

REFERENCE No.

档案号: _____

NUMBER OF SAMPLE

送样数量 _____

COPY OF ACKNOWLEDGEMENT

承认书份数 _____

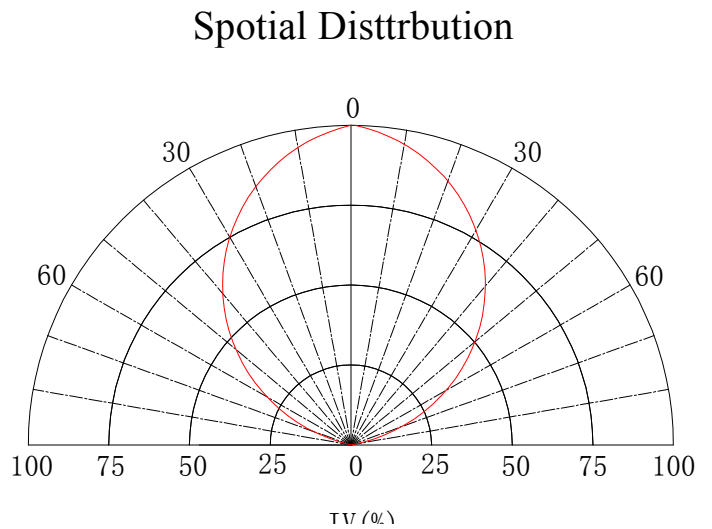
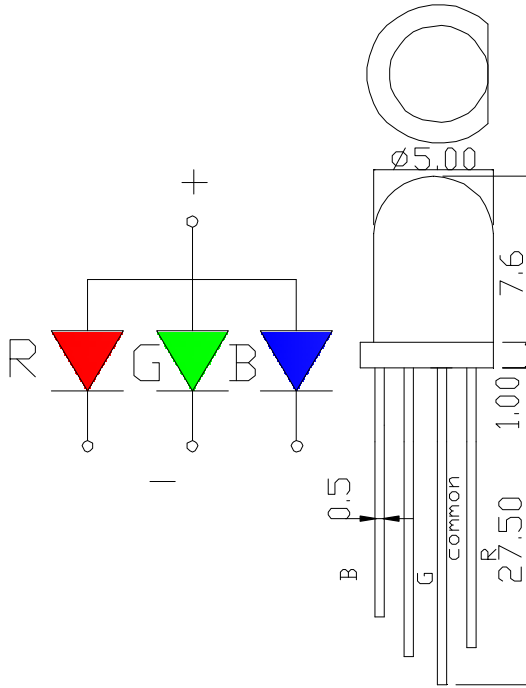
Approved By Customer 客 户 承 认	Qualified By 核 准	Form Designer 制 作

Address: YiShida-BaoYicheng technology park ,Guanlan Street , Baoan district , Shenzhen of China

Tel :0086-755-33693901 Website : www.hanhualed.com.cn Fax: 0086- 755-33693906

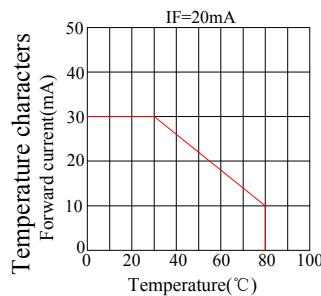
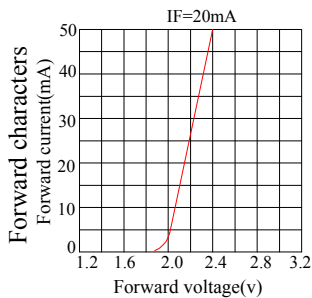
MSN: hanhualed@hotmail.com Email: admin@hanhualed.com.cn Mobile:86-13510694247

Emitter 外型图:



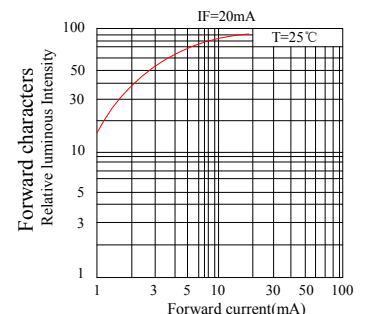
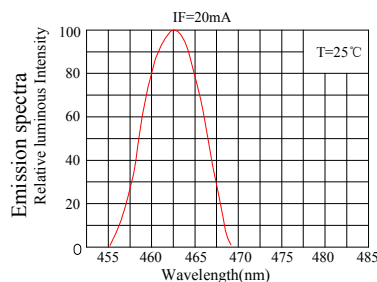
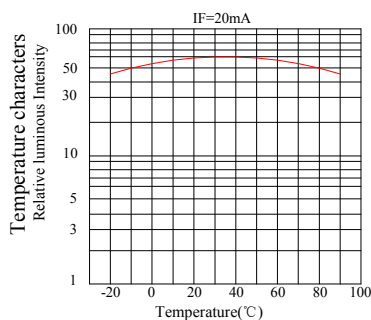
Lens: Diffused

Typical electrical-optical Characteristics curves



Notes:

The data are an typical presentation of the product,Contact customer service for details of technical information and warranty.
The product is sensitive to static antistatic operation environment is recommended
Products are shipped in either bulk bag package or taping.



Address: YiShida-BaoYicheng technology park ,Guanlan Street , Baoan district , Shenzhen of China

Tel :0086-755-33693901 Website : www.hanhualed.com.cn Fax: 0086- 755-33693906

MSN: hanhualed@hotmail.com Email: admin@hanhualed.com.cn Mobile:86-13510694247

■ Absolute Maximum Rating 极限工作参数

Item 项目	Symbol 代号	Absolute Maximum Rating 极限工作参数	Unit 单位
Forward Current 正向电流	IF	20	mA
Peak Forward Current 瞬间脉冲电流	IFP	50	mA
Reverse Voltage 反向电压	VR	5	V
Power Dissipation 消耗功率	PD	100	mw
Electrostatic discharge 静电释放	ESD	1000	V
Operation Temperature 工作温度范围	TOPR	-25~+80	°C
Storage Temperature 存放温度范围	TSTG	-40~+80	°C
Lead Soldering Temperature 最高焊接温度	TSOL	330 °C for 3sec Max.	

*Ifp Conditions: Pulse Wide ≤ 10msec ≤ 1/10 瞬间脉冲电流

*Tsol Conditions: 3mm from the base of epoxy bulb 最高焊接温度 距胶体 3mm

■ Typical Optical/Electrical Characteristics 光电特性参数

Item 项目	Symbol 代号	Condition 测试条件	Min 最小值	Typ 典型值	Max 最大值	Unit 单位	
Forward Voltage 正向电压	VF	IF=20mA	R	1.9	2.0	2.1	V
			G	3.1	3.2	3.3	
			B	3.0	3.1	3.2	
Light intensity 光强度	IV	IF=20mA	R	800	900	1200	mcd
			G	1000	1500	2000	
			B	600	700	800	
Wavelength 波长	WD	IF=20mA	R	620	623	625	nm
			G	519	520	522	
			B	467	468	470	
Reverse current 逆向电流	IR	IF=20mA	0	/	5	uA	
Viewing Angle 半光全角	2 θ 1/2	IF=20mA		65		deg	
Recommend Forward Current 持续正向电流	IF(rec)	IF=20mA			20	mA	

Notes:

1. Work absolute ratings Ta=25°C 工作常规值 温度=25°C

2. Tolerance of measurement of forward voltage ± 0.1V 正向电压误差范围 ± 0.1V

LED LAMP RELIABILITY

● Test Items And Results

Type	Test Item	REF. Standard	Test Condition	Note	Number of Damaged
Environmental Sequence	Temperature Cycle	JIS C 7021 (1997) A-4	-20°C → 25°C → 80°C → 25°C 30mins,5mins,30mins,5mins	100 cycles	0/100
	High Humidity Heat Cycle	JIS C 7021 (1997) A-5	30°C → 65°C 90%RH 24hrs/1cycle	10 cycles	0/100
	High Temperature Storage	JIS C 7021 (1997) B-10	Ta=80°C	1000hrs	0/100
	Humidity Heat Storage	JIS C 7021 (1997) B-11	Ta=60°C RH=90%	1000hrs	0/100
	Low Temperature Storage	JIS C 7021 (1997) B-12	Ta= -30°C	1000hrs	0/100
Operation Sequence	Life Test	JIS C 7035 (1985)	Ta=25°C I _F =20mA	1000hrs	0/100
	High Humidity Heat Life Test	*	60°C RH=90% I _F =20mA	500hrs	0/100
	Low Temperature Life Test	*	Ta= -20°C I _F =20mA	1000hrs	0/100
Destructive Sequence	Resistance to Soldering Heat	JIS C 7021 (1997) A-11	Tsol=260 ± 5°C,10sec (3mm from the base of the epoxy bulb)	1 time	0/20
	Solderability	JIS C 7021 (1997) A-2	Tsol=235 ± 5°C,5sec (Using flux)	1 time (over 95%)	0/20
	Lead Pull/Bend Test	JIS C 7021 (1997)A-11	Load 2.5N (0.25kgf) 0° → 90° → 0° Bending 3 times	No noticeable damage	0/20

* Refer to reliability test standard specification for in this line.

● Criteria for Judging The Damage

Item	Symbol	Test Condition	Criteria for Judgment	
			Min.	Max.
Forward Voltage	V _F	I _F = 20mA	---	Initial data x 1.1
Reverse Current	I _R	V _R = 5V	---	Initial data x 2.0
Luminous Intensity	I _v	I _F = 20mA	Initial data x 0.7	---

Pulse Width Modulation (PWM)

Marco teórico

PWM es una técnica de modulación digital que modifica el ciclo de trabajo de una señal. Esta técnica de modulación es usada comúnmente para controlar la energía enviada en cada pulso de señal, lo que permite variar la intensidad de luz generada por un led en un tiempo determinado.

Objetivos

- Conocer la forma de cómo implementar PWM usando una tarjeta Arduino.
- Entender el uso de la función `analogWrite()`.
- Entender la estructura básica de un programa para Arduino.

Materiales

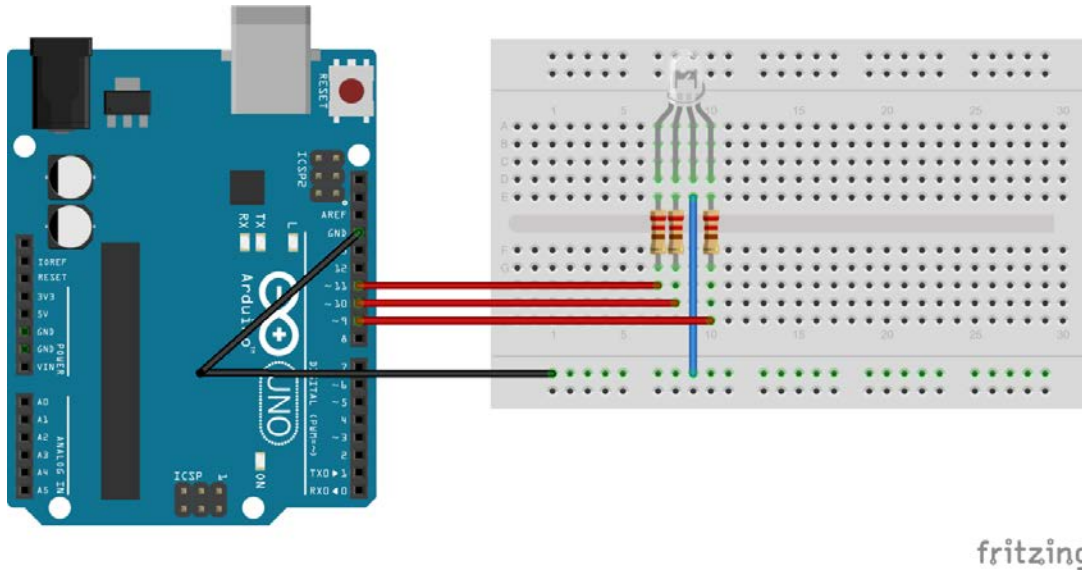
- Tarjeta Arduino
- Protoboard
- Cable
- Led RGB
- 3 resistencias 220 ohms c/u
- Software Arduino IDE
- Computador

Fuentes

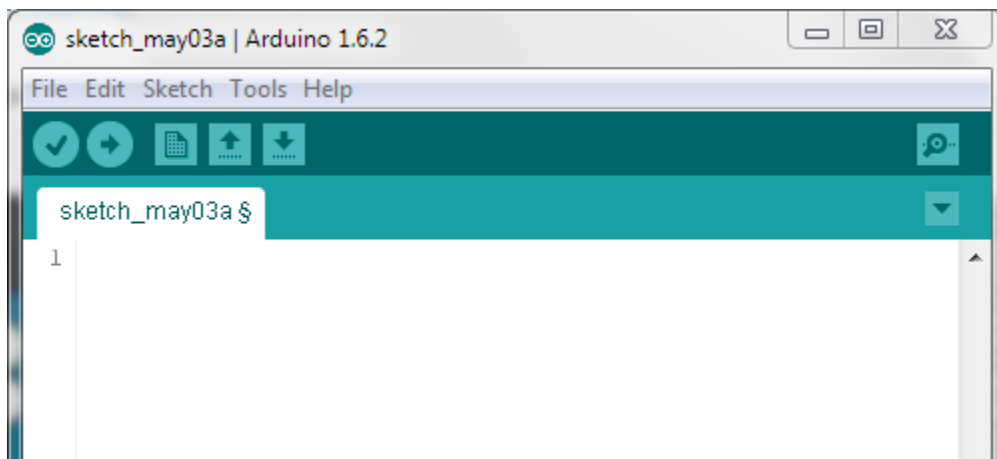
<https://learn.adafruit.com/adafruit-arduino-lesson-3-rgb-leds/arduino-sketch>

Procedimiento

1. Realizar el montaje del circuito de acuerdo a la siguiente figura:



2. Abrir el software Arduino IDE y conectar la tarjeta Arduino.



3. Declarar las variables que tendrán los valores de cada PIN (11, 10 y 9):

```
int redPin = 11;  
int greenPin = 10;  
int bluePin = 9;
```

4. Declarar la función setup():

```
void setup()
{
  pinMode(redPin, OUTPUT);
  pinMode(greenPin, OUTPUT);
  pinMode(bluePin, OUTPUT);
}
```

5. Declarar la función loop():

```
void loop()
{
  setColor(255, 0, 0); // red
  delay(1000);
  setColor(0, 255, 0); // green
  delay(1000);
  setColor(0, 0, 255); // blue
  delay(1000);
}
```

6. Declarar la función setColor():

```
void setColor(int red, int green, int blue)
{
  analogWrite(redPin, red);
  analogWrite(greenPin, green);
  analogWrite(bluePin, blue);
}
```

7. Subir el programa a la tarjeta Arduino en la opción **File** - > **Upload**. Después de esto el led RGB comenzará a iluminar cada uno de los colores: rojo, verde y azul.

Análisis

- La tarjeta Arduino al tener un DAC (Digital to Analog Converter) de 8 bits de resolución soporta una escala de valores entre 0 – 255 que podrán ser convertidos a valores de voltaje, los cuales alimentarán el ánodo de cada diodo led.
- La función analogWrite() imprime el valor de voltaje en cada una de las salidas de la tarjeta Arduino, declaradas inicialmente.
- Un programa para Arduino siempre estará compuesto mínimo por tres partes:
 - Declaración de variables con dirección de puertos.
 - Función setup() la cual se encarga de inicializar las variables, cargar librerías, inicializar puertos de entrada y salida.
 - Función loop() se encargará de ejecutar las instrucciones requeridas de forma indefinida.

Experimento

1. Se pueden variar los valores de la función setColor() con el fin de generar luz de diferentes colores, combinando las componentes RGB, por ejemplo:

```
setColor(80, 0, 80); // purple
delay(1000);
setColor(255, 255, 0); // yellow
delay(1000);
setColor(0, 255, 255); // aqua
delay(1000);
```

2. Se puede disminuir el valor delay(1000) por delay(500) lo cual activaría el cambio de color cada 0.5 s.
3. Se podría enviar un dato por interfaz serial, y de acuerdo al valor, cambiar el color del led.
4. Se podría cambiar el color del led y detectarlo con un receptor (fotodiodo).