

M. EN L. J. ANTONIO ALTAREZ JAIME  
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES  
PRESENTE.

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno (a) Miguel Ángel Flores Olmeda del Programa de Licenciatura en Ing. en Comunicaciones y Electrónica cuyo número de NUA es: 413744 del cual soy director. El título de la tesis es: Sistema de Posicionamiento Local basado en la Tecnología Li-Fi

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los dos sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE

  
Mario Alberto Obregon Hernandez

NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS  
SECRETARIO

\_\_\_\_\_  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS

  
José A. Andrade Lucio

NOMBRE Y FIRMA  
PRESIDENTE

  
José Ruiz Pinales

NOMBRE Y FIRMA  
VOCAL



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

---

---

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA,  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*Sistema de Posicionamiento Local basado en la tecnología  
Li-Fi*

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

*Miguel Ángel Flores Olmedo*

DIRECTOR:

*Dr. Mario Alberto Ibarra Manzano*

SALAMANCA, GTO.

Noviembre 2016

# Agradecimientos

A mis padres que siempre creyeron en mí a pesar de que nunca los ponía al tanto de mi situación académica ni de mis avances en la tesis. Ellos simplemente me proyectaban en el futuro simplemente con ver mi aprovechamiento y la manera en que enfrentaba los problemas.

A mis asesores que siempre me aclararon todas mis dudas de la forma más clara posible y me plantearon diferentes opciones para que no me aferrara a una sola metodología.

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.1.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS) . . . . .	1
1.1.2. Sistema de Posicionamiento en Interiores (IPS) . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	5
1.3. Justificación . . . . .	5
1.4. Planteamiento . . . . .	5
<b>2. Marco teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Comunicaciones inalámbricas . . . . .	7
2.1.1. Comunicaciones infrarrojas . . . . .	7
2.1.2. Comunicaciones basadas en luz . . . . .	8
2.2. Comunicación VLC . . . . .	8
2.2.1. Modulación OOK . . . . .	9
2.3. Lámpara de LEDS downlight . . . . .	9
2.3.1. Características . . . . .	9
2.3.2. Ventajas . . . . .	11
2.4. Microcontroladores . . . . .	11
2.4.1. PIC18F4550 . . . . .	11
2.4.2. Plataforma Pingüino . . . . .	14
2.4.3. Compilador CSS . . . . .	17
2.5. Manejo del luxómetro . . . . .	17
2.6. Fotorreceptores . . . . .	19
2.6.1. Definición . . . . .	19
2.6.2. Fotodiodos . . . . .	19
2.6.3. Fototransistores . . . . .	19
2.6.4. Fotorresistencias . . . . .	19
2.7. Fotorreceptor con preamplificación . . . . .	21
2.7.1. Fotodiodo S4349 de Hamamatsu . . . . .	21

---

<b>3. Diseño e Implementación</b>	<b>22</b>
3.1. Transmisión . . . . .	22
3.1.1. Principio . . . . .	22
3.1.2. Código del transmisor . . . . .	22
3.1.3. Diseño del transmisor . . . . .	24
3.1.4. Impresión de la PCB . . . . .	24
3.2. Caracterización . . . . .	24
3.2.1. Objetivo . . . . .	24
3.2.2. Resultados . . . . .	27
3.2.3. Conclusiones . . . . .	27
3.3. Diseño del receptor . . . . .	29
3.3.1. Etapa de fotorrecepción . . . . .	29
3.3.2. Etapa de filtrado . . . . .	31
3.3.3. Etapa de amplificación . . . . .	31
3.3.4. Etapa de digitalización . . . . .	33
<b>4. Pruebas y Resultados</b>	<b>39</b>
4.1. Prueba con una lámpara . . . . .	39
4.2. Prueba con tres lámparas . . . . .	40
4.2.1. Recepción en distintos puntos . . . . .	41
4.2.2. Recepción en distintos ángulos . . . . .	43
4.3. Determinación de la posición . . . . .	44
4.3.1. Planteamiento de la solución . . . . .	45
4.3.2. Diagrama de flujo . . . . .	45
4.4. Impresión de la PCB . . . . .	45
4.5. Resultados . . . . .	48
4.6. Conclusiones . . . . .	48
4.7. Trabajos a futuro . . . . .	48
<b>Bibliografía</b>	<b>50</b>

# Índice de figuras

1.1. Órbitas de varios satélites Navstar (Navigation System with Time And Ranging), superpuestas a una proyección Mercator del mundo. Como allí se ve, los satélites describen una espiral en torno a la Tierra . . . . .	2
1.2. Esquema del IPS basado en luz visible. . . . .	6
2.1. Espectro de la luz visible. . . . .	8
2.2. Vista esquemática del proceso completo de transmisión y recepción de datos. . . . .	9
2.3. Vista lateral de la lámpara LED. . . . .	10
2.4. Encapsulado del PIC18F4550. . . . .	13
2.5. Placa Pinguino comercial. . . . .	14
2.6. Entorno de desarrollo de Pinguino. . . . .	15
2.7. Numeración de terminales de la tarjeta Pinguino. . . . .	16
2.8. Luxómetro. . . . .	18
2.9. Fototransistor a) Símbolo b) Circuito Equivalente. . . . .	20
3.1. Contador desglosado en sus 8 bits, se observan las señales en fase y en múltiplos del bit B0. . . . .	23
3.2. Código del transmisor. . . . .	23
3.3. Diagrama del transmisor. . . . .	25
3.4. Diseño del circuito. . . . .	26
3.5. Prototipo terminado. . . . .	26
3.6. Comportamiento de la intensidad de la luz a 3m de distancia. . . . .	27
3.7. Comportamiento de la intensidad de la luz a 1.5m de distancia. . . . .	28
3.8. Conexión del fotorreceptor. . . . .	30
3.9. Filtro Pasa-Altas. . . . .	31
3.10. Diagrama interno del INA128P. . . . .	32
3.11. Conexión del INA128P. . . . .	33
3.12. Simbolismo del comparador de voltaje y curva de la salida. . . . .	34
3.13. Detector de umbral. . . . .	35
3.14. Comparador como detector de cruce por cero. . . . .	35

---

3.15. Primera etapa del receptor. . . . .	36
3.16. Diseño de la PCB. . . . .	37
3.17. Prototipo Impreso. . . . .	38
4.1. Señal proveniente de la lámpara. . . . .	40
4.2. Deformación de la señal al alejar el receptor 1.10 m del centro del halo. . . . .	40
4.3. Triangulación de la luz. . . . .	41
4.4. Señal capturada en el punto B. . . . .	42
4.5. Señal capturada en el punto E. . . . .	42
4.6. Señal capturada en el punto M. . . . .	43
4.7. Punto M a un ángulo de $90^\circ$ . . . . .	43
4.8. Punto M a un ángulo de $180^\circ$ . . . . .	44
4.9. Punto M a un ángulo de $270^\circ$ . . . . .	44
4.10. Diagrama de flujo de la solución. . . . .	46
4.11. Diseño en Ares-Proteus. . . . .	47
4.12. Prototipo Impreso. . . . .	47

# Índice de Tablas

2.1. Propiedades de la lámpara LED que fue utilizada. . . . .	10
2.2. Descripción del PIC18F4550. . . . .	12
3.1. Características eléctricas IRF510. . . . .	24
3.2. Mediciones de intensidad. . . . .	29



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

**RESUMEN:** En la presente sección se muestran algunos de los antecedentes del Sistema de Posicionamiento Global en ambientes de interiores, así como las distintas maneras en que se pueden construir estos sistemas utilizando diferentes métodos. Se presentan también los objetivos del proyecto, su justificación y su planteamiento.

### 1.1. Antecedentes

#### 1.1.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

La manera clásica para determinar la posición de un objeto en cualquier lugar de la Tierra es mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

El GPS es una constelación de satélites que orbitan aproximadamente a 11000 millas sobre la tierra y transmiten ondas de radio a los receptores alrededor del planeta. Determinando el tiempo que toma una señal GPS de un satélite hasta el receptor, se puede calcular la distancia al satélite y averiguar la posición exacta en la Tierra.

Las señales de radio del satélite viajan a 186000 millas por segundo. Para encontrar la distancia de un satélite a un receptor, se usa la siguiente ecuación:  $(186,000 \text{ mi/sec}) \times (\text{tiempo de viaje de la señal en segundos}) = \text{Distancia del satélite al receptor en millas}$ .

Calculando simultáneamente la distancia del receptor GPS a 4 satélites es posible determinar su posición general con respecto a la latitud, longitud y elevación.

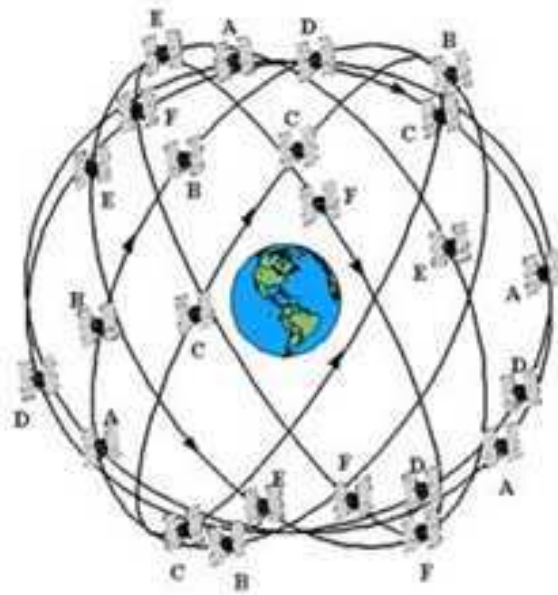


Figura 1.1: Órbitas de varios satélites Navstar (Navigation System with Time And Ranging), superpuestas a una proyección Mercator del mundo. Como allí se ve, los satélites describen una espiral en torno a la Tierra .

### 1.1.2. Sistema de Posicionamiento en Interiores (IPS)

Cubrimos todo acerca del arte, ciencia e historia de construir mapas y cómo, junto con la localización inteligente, están impactando el mundo a nuestro alrededor en nuestros teléfonos inteligentes, en nuestros carros y en el trabajo.

Imaginen los beneficios de conocer su ubicación precisa en los interiores. Podrían llegar a un aeropuerto y consultar una aplicación en el Smartphone que muestre cómo llegar a la puerta de despegue y cuánto tiempo tomaría llegar ahí. La aplicación podría incluso tener en cuentas las colas de seguridad, porque sabe cuánta gente está esperando en la línea.

Los hospitales son edificios idóneos para utilizar este tipo de sistemas de localización y navegación, debido a su tamaño y a sus grandes dimensiones. Entre las ventajas que supondría un IPS de interiores en hospital se encuentran:

**Mejor ubicación.** No tendríamos que preguntar a dónde tenemos que ir, el teléfono se convertiría en nuestra guía.

**Agilidad en la recepción.** No tendríamos que buscar ningún mostrador

para avisar de que llegamos, el propio sistema registra nuestra presencia en el edificio.

**Mayor información.** Obtendríamos todo tipo de información sobre salud, desde videos promocionales hasta consejos, además de opciones de ocio para amenizar nuestra espera.

**Agilizar las visitas.** Al ir de visita podríamos dirigirnos directamente a la habitación de nuestro amigo o familiar.

Estas son sólo algunas de muchas aplicaciones potenciales de la tecnología de localización interior. Pero a diferencia del exterior, donde el teléfono determina la localización a partir de la red de satélites que conforman el GPS, adentro, no hay solución especialmente diseñada. Los sistemas capaces de señalar nuestra ubicación con error de unos cuantos centímetros están en desarrollo, por ahora los servicios de localización requieren un buen aprovechamiento de la tecnología existente.

Un enfoque consiste en imitar la manera en que trabaja el GPS, determinando la posición relativa a las estaciones base de WiFi que se encuentran en los aeropuertos, centros comerciales y salas de conciertos. Si el teléfono puede encontrar tres estaciones base, es posible encontrar nuestra posición usando técnicas de triangulación matemática midiendo la distancia a cada una. No obstante, las estaciones base no fueron construidas para tal aplicación, a diferencia de la red de satélites que conforman el GPS que transmiten señales precisas llamadas códigos de tiempo. En lugar de eso, la triangulación resuelve dónde estamos por la intensidad de las señales WiFi en esa posición.

El inconveniente es que el WiFi usa ondas de radio. En interiores, estas ondas son reflejadas por obstáculos y refractadas alrededor de las esquinas. Las señales WiFi incluso se fugan de edificios circundantes y son afectadas por la gente. Esto significa que la intensidad de la señal cambia constantemente conforme las puertas se abren y cierran y la gente se mueve de un lugar a otro, esa es la razón por la que el WiFi por sí mismo sólo es capaz de determinar nuestra posición 10m a la redonda.

Un método para mejorar la exactitud se llama *huellas dactilares por WiFi*, el cual consiste en usar una aplicación en el teléfono celular para mapear la intensidad de la señal. Al visitar cada habitación de un edificio con el celular, éste registra la intensidad de la señal en esa posición. El mapa de intensidades de la señal es almacenado en el teléfono o en internet y es comparado posteriormente con las señales capturadas en otro momento.

La precisión del método *Huellas dactilares por WiFi* fue mejorada todavía más por WiFiSLAM, una compañía adquirida por Apple en 2013. Usa técnicas matemáticas para calcular las probabilidades de que diferentes intensidades de WiFi ocurran, esto reduce drásticamente los errores debido a fluctuaciones en la señal.

A pesar de lo prometedor de estas tecnologías, otras podrían encontrar más a su favor. Por ejemplo, lámparas de LED montadas en el techo podrían ser programadas para parpadear miles de veces por segundo. Eso es demasiado rápido para el ojo humano pero fácilmente detectable para la cámara de un Smartphone. Si las lámparas de un hotel, sala de conferencias o museo fueran programadas para parpadear a diferentes velocidades, el software en el celular podría saber dónde está parada la persona por la frecuencia de conmutación. Entre más lámparas, mayor es la precisión que se obtiene, típicamente de 1m o menos. Esta forma de enviar información a través de la conmutación a diferentes frecuencias de lámparas se le conoce como comunicación por luz visible o VLC.

Un sistema basado en VLC (Comunicación por Luz Visible) está siendo desarrollado por ByteLight en asociación con GE. Una desventaja para los lugares es que necesitarían instalar el ByteLight equipado con bombillas GE para que el sistema funcione. Un beneficio es que las bombillas incorporan un transmisor Bluetooth inteligente, con el cual las tiendas podrían alertar sobre ofertas especiales incluso si el celular se encuentra en el bolsillo.

ByteLight está lejos de ser la única compañía que trae transmisores Bluetooth inteligentes al posicionamiento en interiores. Apple ha equipado todas sus tiendas minoristas en E.U. con su propia tecnología llamada iBeacons, y ha incorporado el software iBeacons en iOS 7. Los pequeños comerciantes pueden usarlo para enviar noticias, información de productos o cupones a los clientes que los elijan. Los estadios de la liga mayor de Baseball también han instalado transmisores Bluetooth inteligentes para permitir a los fanáticos registrarse cuando llegan al juego para recibir mapas y videos.

## 1.2. Objetivos

En el presente proyecto se pretende localizar dispositivos utilizando la tecnología LiFi en ambientes de interiores ofreciendo una mejor exactitud y precisión en la posición que los sistemas actuales de posicionamiento global.

## 1.3. Justificación

EL GPS ha sido una revolución en la tecnología con diversas aplicaciones en campos como la navegación, el posicionamiento, diseminación de la hora, cartografía, sistemas de guía, topografía, seguridad pública, aviación y muchas otras aplicaciones de investigación. La precisión de un GPS oscila entre los 2 y los 5 metros; sin embargo, a pesar de que no es significativa si se compara con las dimensiones de la Tierra, ésta toma relevancia cuando se trata de ubicar la posición del receptor en un interior ya que las ondas de radio se atenúan demasiado al toparse con barreras como el techo y los muros; además, la posición se vuelve ambigua ya que un error de precisión de 2 metros puede cambiar la habitación o el piso en el que se encuentra el receptor. Dado el problema anterior, este trabajo propone desarrollar un sistema basado en la comunicación con luz visible para obtener dicha posición de forma más exacta por medio de la emisión constante de luz de lámparas monocromáticas LED instaladas en los techos de los interiores.

## 1.4. Planteamiento

En este proyecto se pretende aplicar algoritmos de localización para determinar con una exactitud mayor a los GPS convencionales la posición de un objeto en el interior de una habitación, utilizando para ello un arreglo de tres lámparas colocadas en forma de triángulo sobre el techo de la habitación. Se pretende además que se puedan adatar dispositivos como robots que requieran saber su posición mientras se dirigen de un punto a otro dentro de la habitación.

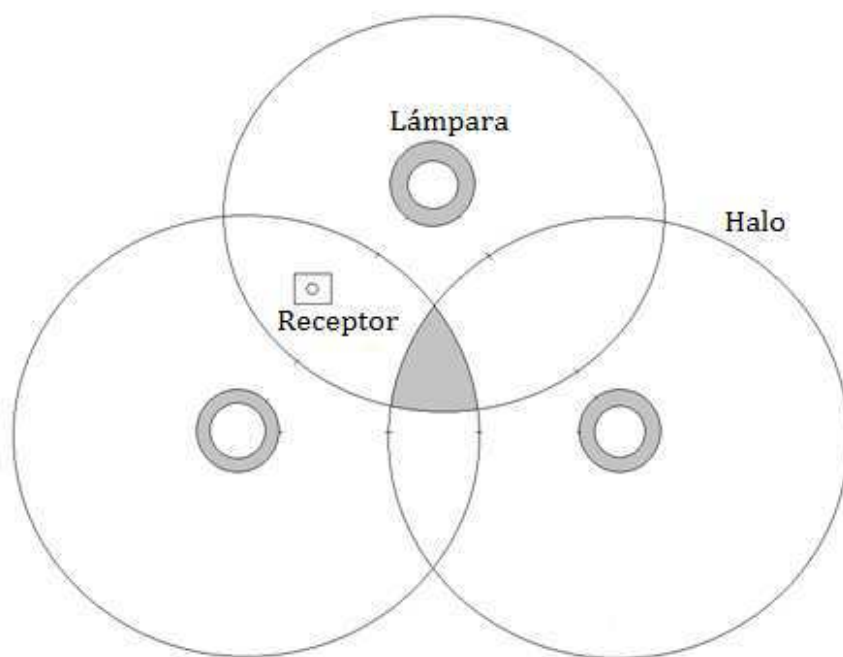


Figura 1.2: Esquema del IPS basado en luz visible.

# Capítulo 2

## Marco teórico

**RESUMEN:** Este apartado ofrece una explicación teórica y detallada de los elementos que serán utilizados a lo largo del proyecto tales como: dispositivos electrónicos, software, aparatos de medición y esquemas de comunicación utilizando luz visible.

### 2.1. Comunicaciones inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas son aquellas que utilizan ondas electromagnéticas para transmitir la información del emisor al receptor. Sus campos de aplicación son muy vastos y abarcan áreas como las telefonías, las redes de área local, los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas de telemetría así como la comunicación con luz visible, entre otras.

#### 2.1.1. Comunicaciones infrarrojas

Estas son basadas en radiación infrarroja (espectro no visible), estas son favorecidas para aplicaciones de corto alcance en las cuales la tasa de bits por enlace y la capacidad total del sistema deben ser maximizadas. Los costos deben ser minimizados, la compatibilidad internacional es requerida, o la complejidad del receptor de señal debe ser minimizada.

La comunicación infrarroja ofrece varias ventajas significantes sobre la radio, por ejemplo:

1. Los emisores y detectores de infrarrojos de alta velocidad tienen un costo reducido.
2. La región espectral infrarroja ofrece un ancho de banda virtualmente ilimitado que no es regulado en todo el mundo.

3. Las comunicaciones infrarrojas están confinadas al cuarto en el cual se originan, lo cual favorece las transmisiones seguras contra casuales espías y previene la interferencia entre enlaces operando en diferentes cuartos.
4. LANs inalámbricas e infrarrojas pueden alcanzar una muy alta capacidad; además, las transmisiones en diferentes cuartos no necesitan coordinarse.

### 2.1.2. Comunicaciones basadas en luz

Las comunicaciones con luz visible son una nueva forma de comunicación que utiliza LEDs para transmitir la información aprovechando la alta velocidad de conmutación de estos dispositivos, así como su bajo precio y consumo de potencia. El principio de funcionamiento de este sistema consiste en definir un 1 lógico cuando el LED está encendido y un 0 lógico cuando está apagado. Sus ventajas incluyen una velocidad de transmisión de varios Mb/s en interiores cuando no hay presencia de barreras físicas.

## 2.2. Comunicación VLC

La comunicación por luz visible se refiere a la comunicación inalámbrica de corto alcance usando luz visible en el espectro de 380 a 780 nm.

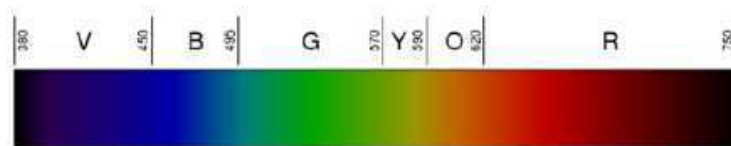


Figura 2.1: Espectro de la luz visible.

En 2011, el profesor Harald Haas de la Universidad de Edimburgo mostró el primer dispositivo que usaba una nueva tecnología denominada Li-Fi, enviando una señal de video a 10 Mbps con una sola bombilla LED.

El IEEE 802.15.7 standard ofrece tres tipos distintos (PHY) para VLC. PHY I opera de 11.67 a 266.6 kb/s, PHY II opera de 1.25 a 96 Mb/s y PHY III opera entre 12 y 96 Mb/s. PHY I y PHY II están definidos para una única fuente de luz y usan la modulación digital de amplitud o manipulación de encendido-apagado o OOK (por sus siglas en inglés, On-Off Keying) y la modulación por posición de pulso variable o VPPM (por sus siglas en inglés, Variable Pulse Position Modulation), PHY III usa múltiples fuentes ópticas



con diferentes frecuencias (colores) y un formato de modulación particular llamado modulación por cambio de color o CSK (Color Shift Keying).

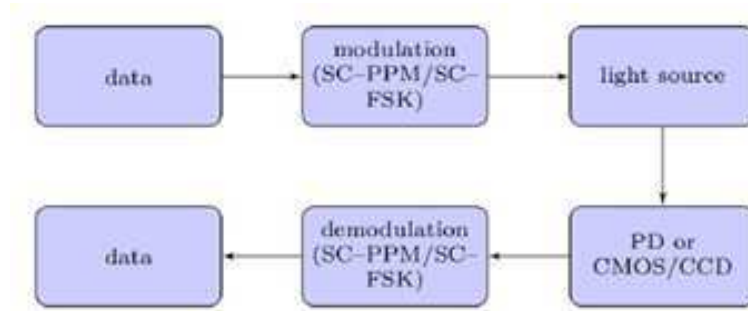


Figura 2.2: Vista esquemática del proceso completo de transmisión y recepción de datos.

### 2.2.1. Modulación OOK

La modulación OOK es el esquema de modulación más simple para VLC, donde los LEDs están encendidos o apagados dependiendo si los bits de datos son 1 o 0. Aunque la modulación es lógicamente de encendido-apagado, el estado de apagado no necesariamente significa que la luz está completamente apagada; más bien, la intensidad de la luz puede simplemente ser reducida tanto como uno pueda distinguir claramente entre los niveles on y off.

## 2.3. Lámpara de LEDS downlight

### 2.3.1. Características

Un downlight led es una lámpara que ilumina desde el techo y proyecta un punto de luz concentrado consiguiendo aislar la luminosidad y evitando que se propague por la habitación y por supuesto que cuente con la tecnología led ya que normalmente este tipo de bombillas utilizan tecnología halógena.

En la implementación del proyecto se usó una lámpara downlight, algunas de las características de este tipo de lámpara son: carcasa de aluminio, voltaje AC110-265 V para interior y con colores que van desde el blanco frío hasta el blanco cálido, LEDs instalados detrás de una cubierta escarchada para lograr una luz sin reflejos, etc. Una lista más detallada de sus características se muestra en la tabla [2-1].

Nombre	ECO LED PANEL ROUND
Color	Blanco
Material	Aluminio/Acrílico
Grosor	3.00 cm
Diámetro	18.00 cm
Máxima Potencia	10 W
Tipo de lámpara	SMD LED
Temperatura de la lámpara	3000 K
Salida de lúmenes	590 lm
Rendimiento de color	80
Clase de eficiencia energética	A

Tabla 2.1: Propiedades de la lámpara LED que fue utilizada.



Figura 2.3: Vista lateral de la lámpara LED.

### 2.3.2. Ventajas

Las bombillas LED cubren con creces las necesidades de cualquier hogar proporcionando ventajas en el ahorro de energía ya que pueden reducir hasta en un 80 % el consumo energético.

La iluminación de una bombilla LED se caracteriza porque dura mucho y consume muy poco. De hecho, se estima que tiene una duración aproximada de 73.000 horas, por lo que pueden llegar a durar hasta 25 años. Además las lámparas LED no contienen ningún elemento tóxico y su funcionamiento conlleva una reducción de calor muy elevada debido a que los LEDs transforman hasta el 98 % de su energía en luz y sólo 2 % en calor.

Otra ventaja que fue de gran utilidad para el proyecto es su rápido tiempo de respuesta a altas frecuencias, lo cual permite utilizar la modulación OOK, sin alterar su intensidad, a una frecuencia de hasta 10 kHz.

## 2.4. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarjeta determinada, como el control de un microondas, un teclado de un ordenador, una impresora, un sistema de alarma, etc. Para esto, el microcontrolador precisa de muy pocos componentes asociados. Un sistema con microcontrolador debe disponer de una memoria donde se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo, de tal manera que una vez programado y configurado sólo sirve para realizar la tarea asignada. La utilización de un microcontrolador en un circuito reduce notablemente el tamaño y el número de componentes y, en consecuencia, disminuye el número de averías, el volumen, el peso y el precio de los equipos, entre otras ventajas.

### 2.4.1. PIC18F4550

Para el presente proyecto se decidió trabajar con el PIC18F4550 debido a la experiencia que se tiene trabajando con él ya que siempre se han obtenido resultados satisfactorios. Este dispositivo cumple con todos los requisitos necesarios para el proyecto tales como: módulo de convertidor analógico digital (ADC) con una resolución de hasta 10 bits, temporizadores configurables como generadores de retardo o contadores de pulsos externos, puertos de E/S de hasta 8 bits analógicos o digitales que permiten comunicarse con dispositivos o señales externas, gran capacidad de almacenamiento de código y memoria RAM suficiente para almacenar las variables.

El PIC18F4550 tiene encapsulado DIP de 40 pines, la figura [2-4] muestra la distribución de sus terminales mientras que la tabla [2-2] explica las terminales que se usaron.

<b>Terminal</b>	<b>Descripción</b>
MCLR/Vpp/RE3	Reset del circuito
RA0/AN0	Entrada, tomar muestras de la señal
RA4/T0CKI/C1OUT/RCV	Entrada, calcular la frecuencia
RE0/AN5/CK1SPP	Salida, Habilitar la LCD
RE1/AN6/CK2SPP	Salida, Modo de la LCD
RE2/AN7/OESPP	Salida, Habilitar escritura en la LCD
VDD	Alimentación a 5V
VSS	Conexión a tierra
RD4/SPP4	Salida, datos a la LCD bit0
RD5/SPP5/P1B	Salida, datos a la LCD bit1
RD6/SPP6/P1C	Salida, datos a la LCD bit2
RD7/SPP7/P1D	Salida, datos a la LCD bit3

RB2/AN8/INT2/VMO	E/S Digital/entrada analógica interrupción externa
RB3/AN9/CCP2/VPO	E/S Digital/entrada analógica módulo PWM/
RB4/AN11/KBI0	E/S Digital/entrada analógica interrupción en cambio de pin
RB5/KBI1/PGM	E/S Digital/interrupción en cambio de pin programación
RB6/KBI2/PGC	E/S Digital/interrupción en cambio de pin programación
RB7/KBI3/PGD	E/S Digital/interrupción en cambio de pin programación

Tabla 2.2: Descripción del PIC18F4550.

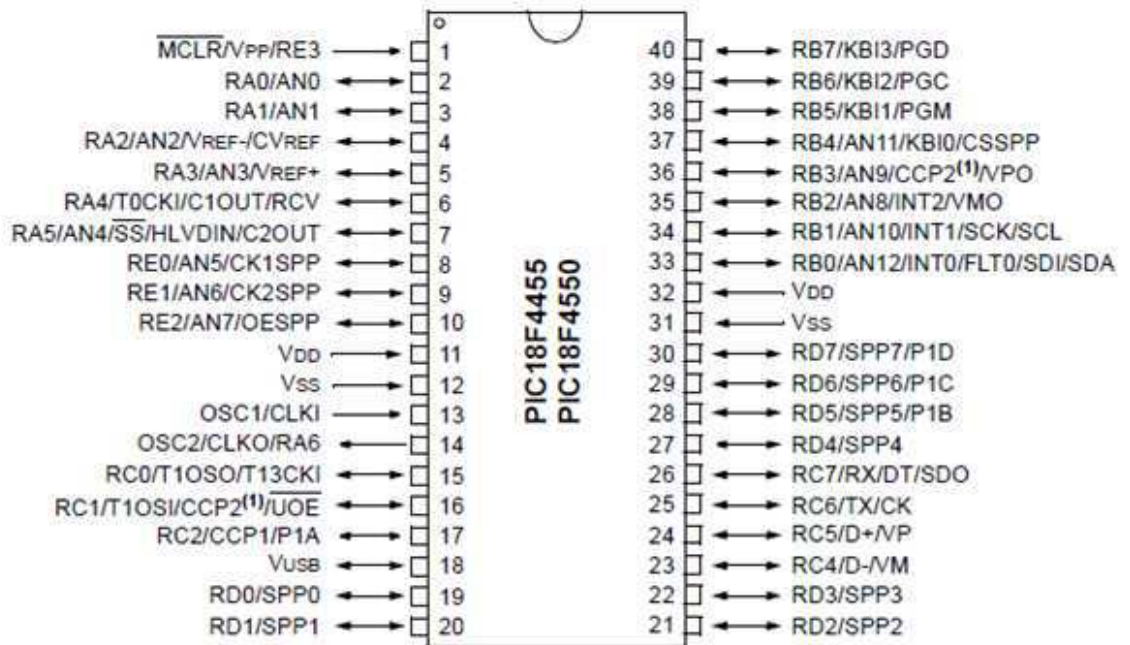


Figura 2.4: Encapsulado del PIC18F4550.

## 2.4.2. Plataforma Pingüino

### 2.4.2.1. Antecedentes

Pingüino es una plataforma de hardware y software de código libre para la experimentación con microcontroladores, similar a arduino pero basada en un microcontrolador PIC18F2550. Esta plataforma cuenta con su propio Entorno de Desarrollo Integrado IDE (por sus siglas en inglés, Integrated Development Enviroment), y la apariencia de este entorno es similar al de Arduino.

El circuito básico del Pingüino es muy simple y sólo se precisan unos pocos componentes; todo el software necesario está disponible para bajarse de internet gratuitamente. Actualmente el software para Pingüino sólo está soportado oficialmente para los sistemas operativos Linux, Windows XP, Windows 7 y MACOSX.

Debido a que el entorno de desarrollo integrado de Pingüino, el cual permite escribir, compilar y grabar los programas, está escrito en Python, es necesario instalar componentes Python para su funcionamiento.

En la figura [2-5] se ilustra una placa Pingüino comercial que utiliza el PIC18F4550.

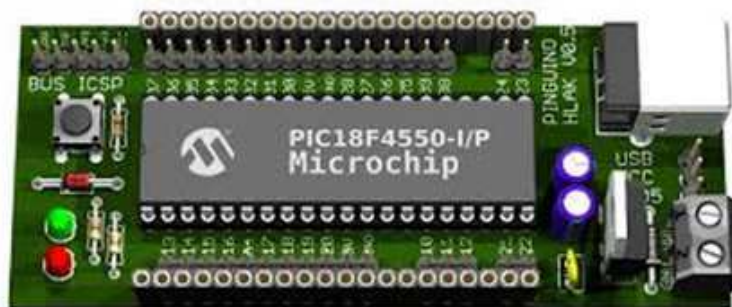


Figura 2.5: Placa Pinguino comercial.

### 2.4.2.2. Ventajas

A diferencia de la placa Arduino, el Pingüino no necesita una Interfaz UART a USB adicional para comunicarse con la PC, debido a que el microcontrolador PIC18F4550 tiene un módulo USB integrado, lo cual le permite comunicarse directamente con la PC y reduce el costo del hardware, dejando además libre el puerto UART del microcontrolador para las aplicaciones.

A pesar de estar todavía en desarrollo, la plataforma promete mucho en cuanto a costo de entrada pues es muy económico, los componentes de la placa son mínimos y relativamente más fáciles de conseguir en Latinoamérica

en comparación con el Arduino.

### 2.4.2.3. Ejemplo de uso

La plataforma Pinguino cuenta con muchas librerías y ejemplos de código que pueden ser utilizados directamente por el usuario. Los códigos de ejemplo son muy ilustrativos y permiten comprender de una mejor manera la programación en esta plataforma. Las instrucciones y la sintaxis que se manejan en esta plataforma son muy simples y están disponibles en los códigos de ejemplo o bien en algunos enlaces de ayuda tales como <http://wiki.pinguino.cc/index.php/Mainpage>.

El entorno de desarrollo utilizado para Pinguino se ilustra en la figura [2-6]. En la misma figura se muestra un ejemplo de código precargado en la carpeta de instalación del compilador; su función es muy sencilla, simplemente apaga y enciende un LED conectado a la terminal número 12 de la tarjeta. Cabe mencionar que la tarjeta en cuestión utiliza el PIC18F4550 y que sus terminales no coinciden con las del microcontrolador, en la figura [2-7] se muestra la numeración de las terminales de la tarjeta.

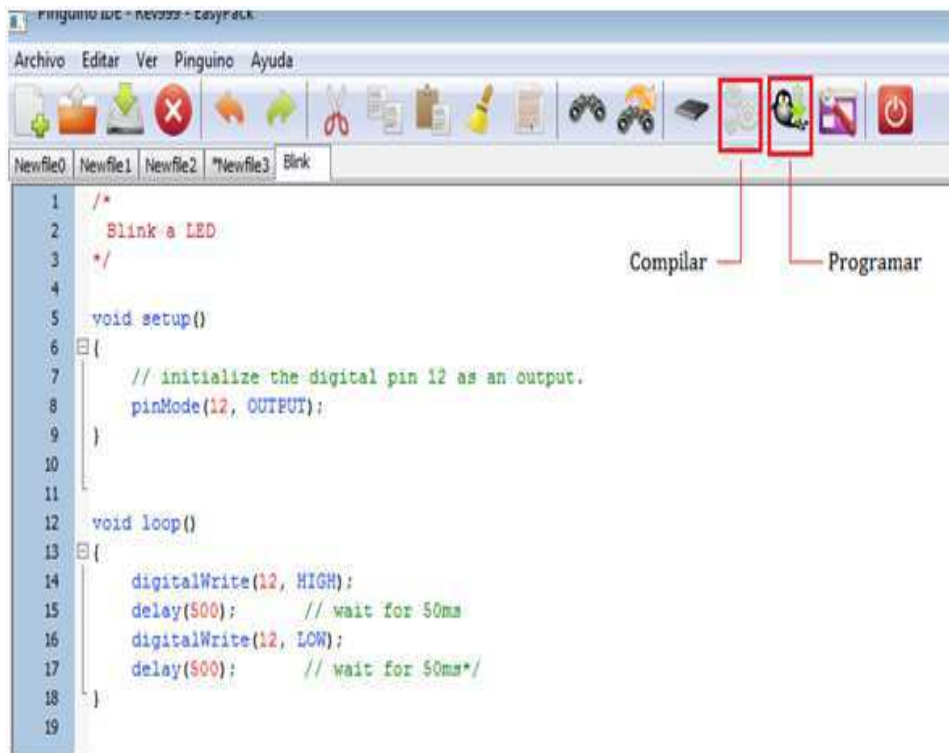


Figura 2.6: Entorno de desarrollo de Pinguino.

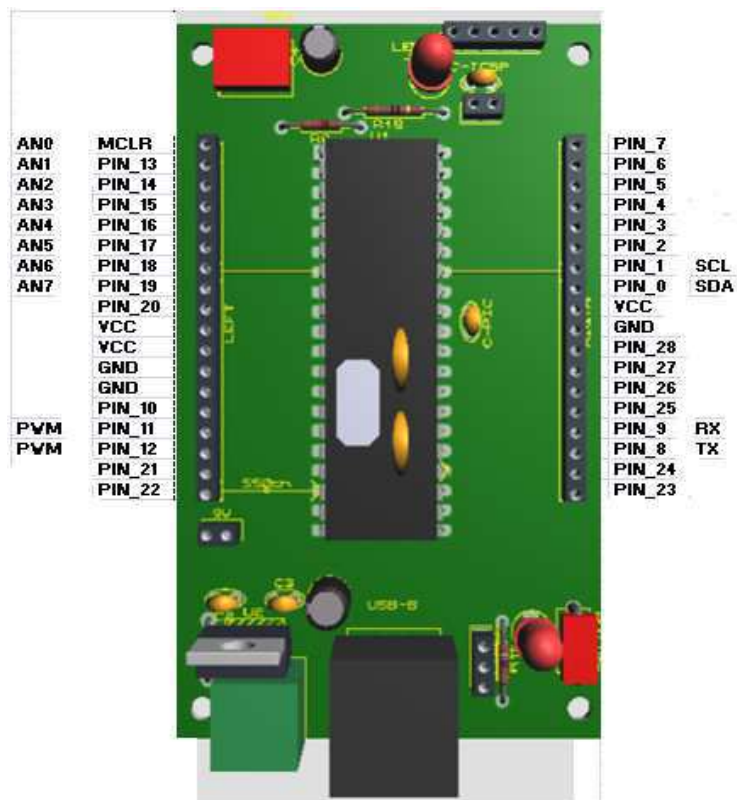


Figura 2.7: Numeración de terminales de la tarjeta Pinguino.



### 2.4.3. Compilador CSS

PIC C Compiler es un inteligente y muy optimizado compilador que contiene operadores estándar del lenguaje C y funciones incorporadas en bibliotecas que son específicas a los registros del PIC, proporcionando a los desarrolladores una herramienta poderosa para el acceso al hardware de las funciones del dispositivo desde el nivel de lenguaje C.

El compilador CCS contiene más de 307 funciones integradas que simplifican el acceso al hardware. Algunas de las características clave del compilador son:

- Fácil migración entre todos los dispositivos PIC de Microchip.
- Minimiza el tiempo de desarrollo con: controladores periféricos construcción C estándar.
- Estilo C++ en la transmisión de Entrada/Salida con formato completo para algunos dispositivos o para cadenas.
- Funciones convenientes como `# bit` y `# byte` permiten a las variables en C ser colocadas en direcciones absolutas.
- El tipo integral de un bit (Short Int) permite al compilador generar código orientado a bits muy eficiente.
- Define, configura y maneja interrupciones fácilmente.

## 2.5. Manejo del luxómetro

El luxómetro es un medidor de precisión para medir lux y FootCandle. El luxómetro sirve para la medición de luz en la industria, la agricultura y la investigación. También se utiliza el luxómetro para determinar la iluminación en puestos de trabajo, decoraciones de escaparates y por parte de diseñadores. El manejo es muy sencillo, lo que permite que el luxómetro sea usado también por personal no-instruido. Sin embargo, siempre es conveniente a la hora de medir la luz tener en cuenta las condiciones previas. Así, se debería fijar la distancia y el ángulo entre el luxómetro y el objeto a medir para obtener resultados con una reproducibilidad alta.

Para la caracterización de la lámpara de LEDs en el cuarto oscuro se utilizó el luxómetro Lutron LX-107 cuyas características se mencionan a continuación.

- Display a LCD con ajuste de contraste.
- Rango: 2000, 20000, 100000 lux.

- Función de valores máximos y mínimos.
- Indicador de sobre rango.
- Temperatura de operación: 0 a 50°C
- Humedad: máx. 80
- Botón de ajuste a cero.
- Función de congelamiento de datos.
- Apagado automático.
- Indicador de batería baja.
- Alimentación: Batería de 9 VDC.
- Panel resistente al agua.



Figura 2.8: Luxómetro.

## 2.6. Fotorreceptores

### 2.6.1. Definición

Un fotorreceptor es un dispositivo que convierte una señal de luz a una señal eléctrica de voltaje o corriente. En muchos fotorreceptores tales como fotodiodos y fotoconductores esta conversión es típicamente lograda por la creación de pares electrón-hueco debida a la absorción de fotones, esto es, la creación de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia.

### 2.6.2. Fotodiodos

El principio de operación del fotodiodo es muy simple, ya que el diodo se polariza inversamente generando una pequeña corriente de oscuridad, la cual fluirá a través del dispositivo.

Existen diferentes tipos de fotodiodos cuyas características varían de acuerdo a sus regiones de dopaje; entre los que se encuentran el fotodiodo de unión pn, el cual es el más común entre los fotodiodos pero a su vez genera corrientes demasiado pequeñas; el fotodiodo pin, el cual es más sensible que el anterior debido a su región de agotamiento más grande; y el fotodiodo de avalancha, éste es el más sensible de los fotorreceptores de estado sólido disponibles, sin embargo presenta desventajas tales como su elevado costo y la necesidad de una complicada circuitería.

### 2.6.3. Fototransistores

Los fototransistores combinan en un mismo dispositivo la detección de luz y la ganancia. Su construcción es similar a la de los transistores convencionales, excepto que la superficie superior se expone a la luz a través de una ventana o lente.

En la figura [2-9] se muestra el símbolo del fototransistor así como su circuito equivalente.

### 2.6.4. Fotorresistencias

Un fotorresistor es un componente que usa un fotoconductor entre dos contactos, de manera que cuando ésta es expuesta a la luz un cambio en la resistencia aparece.

Tomando en cuenta que los diferentes tipos de material usados para resistencias dependientes de la luz son semiconductores, cuando son usados como fotorresistencias, funcionan sólo como elementos resistivos y no hay uniones PN. En conclusión el dispositivo es puramente pasivo.

Hay dos tipos de fotorresistores:



## 2.7. Fotorreceptor con preamplificación

Los fotorreceptores con preamplificación constan comúnmente de un fotodiodo acoplado a una pequeña etapa de amplificación para elevar el rango de voltajes que pueden entregar. Su principal ventaja es que dependiendo de la intensidad de luz que incide sobre ellos es posible eliminar la etapa de amplificación a la que generalmente se conectan antes de digitalizar la señal recibida. Para el presente proyecto se trabajó con un fotorreceptor de este tipo debido a que la distancia entre la lámpara y el receptor es considerable y los fotodiodos comunes no permiten alejar la lámpara más de 20 cm.

### 2.7.1. Fotodiodo S4349 de Hamamatsu

Los fotodiodos *hamamatsu* tienen un amplio rango espectral que cubre desde el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta e incluso regiones de alta energía. Se caracterizan por su rápida respuesta, alta sensibilidad y bajo ruido. Estos fotodiodos son utilizados en un amplio rango de aplicaciones que incluyen campos médicos y analíticos, mediciones científicas, comunicaciones ópticas y productos electrónicos en general. Su rango espectral varía y su empaquetamiento puede presentarse en diferentes versiones como: metálico, cerámico, plástico, así como de montaje superficial.

## Capítulo 3

# Diseño e Implementación

**RESUMEN:** A continuación se muestran los principios de funcionamiento del sistema transmisor y receptor, los diagramas de conexión de los mismos y el funcionamiento de las distintas etapas que los componen. Se ofrece también una explicación acerca de la caracterización de la lámpara, sus objetivos y resultados.

### 3.1. Transmisión

#### 3.1.1. Principio

La transmisión se hará por medio de la tarjeta Pingüino y su principio es el siguiente.

Dado que el elemento transmisor del sistema va encender y apagar tres lámparas simultáneamente a tres frecuencias distintas, es necesario que el código genere tres señales cuadradas cada una por una terminal distinta de la tarjeta.

La manera más sencilla de generarlas es utilizando un contador infinito de 8 bits y tomando los 3 bits menos significativos ya que son los de más alta frecuencia. Este método es también muy práctico ya que las frecuencias generadas están en fase y son múltiplos de la frecuencia más pequeña.

Una ilustración de este método se muestra en la figura [3-1].

#### 3.1.2. Código del transmisor

En la figura [3-2] se observa una captura de pantalla del código mostrando la simplicidad que caracteriza tanto al entorno Pingüino como al código en sí.

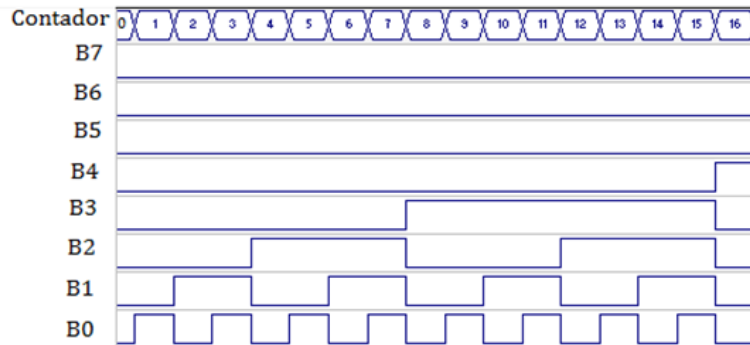


Figura 3.1: Contador desglosado en sus 8 bits, se observan las señales en fase y en múltiplos del bit B0.

```

1
2 char count=0;           //contador
3 void setup()           //configuración
4 {
5     pinMode(12, OUTPUT); //pin 10,11 y 12 como salidas
6     pinMode(11,OUTPUT);
7     pinMode(10,OUTPUT);
8     TRISB=0x00;         //puerto B como salidas
9 }
10 /*implementar un contador,
11 tomar los últimos 3 bits y
12 sacar cada uno por una terminal diferente*/
13 void loop()             //ciclo infinito
14 {
15     count++;            //incremento del contador
16     PORTB=count;        //salida por el puerto B
17     delayMicroseconds(68); //retardo
18 }

```

Figura 3.2: Código del transmisor.

### 3.1.3. Diseño del transmisor

El transmisor necesita tres transistores para poder acoplar las señales digitales provenientes de la tarjeta Pingüino con las lámparas de LEDs, que manejan un voltaje nominal de 24 V y necesitan aproximadamente 360 mA para funcionar correctamente.

El transistor que se utilizó es el IRF510, el cual es un transistor MOSFET cuyas características eléctricas son idóneas para la aplicación ya que tiene voltajes de ruptura muy altos, alta impedancia de entrada, baja capacitancia de entrada y altas velocidades de conmutación.

Una lista más detallada de sus características se muestra en la tabla [3-1].

Parámetro	Min	Max	Typ	Unit
Voltaje de ruptura Drenaje-Fuente	100			V
Capacitancia de entrada		150		pF
Retardo de encendido		20		ns
Tiempo de subida		25		ns
Retardo de apagado		25		ns
Tiempo de bajada		20		ns

Tabla 3.1: Características eléctricas IRF510.

### 3.1.4. Impresión de la PCB

En la figura [3-3] se muestra la forma en que se conectan los transistores a las lámparas, como se puede observar la conexión es muy sencilla y no requiere dispositivos adicionales, lo que le permite minimizar el tamaño de la PCB de manera considerable.

Para el diseño del circuito impreso se utilizó el Software Ares-Proteus. El circuito diseñado se muestra en la figura [3-4] y el prototipo impreso en la figura [3-5].

En el prototipo terminado se observan dos tiras de pines colocadas en lados opuestos del circuito, éstas sirven para conectar el transmisor a la tarjeta Pingüino a manera de *Shield de Arduino*.

## 3.2. Caracterización

### 3.2.1. Objetivo

El objetivo de caracterizar la lámpara de LEDs es observar la variación en las mediciones que son capturadas con el luxómetro a medida que se modifican algunas variables tales como la iluminación de la habitación, la distancia



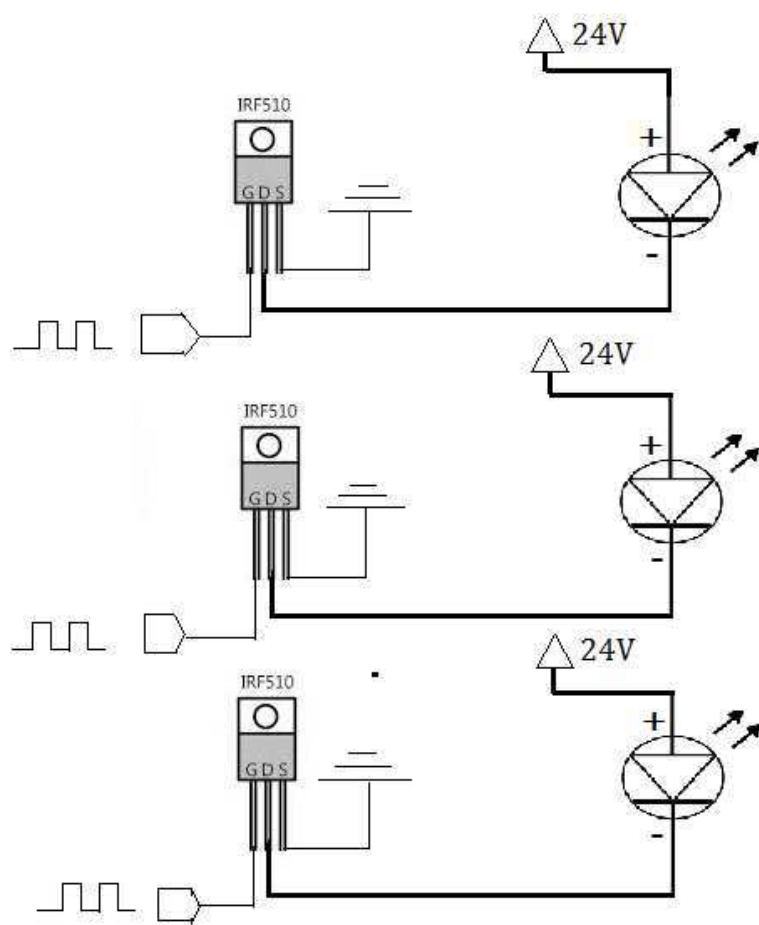


Figura 3.3: Diagrama del transmisor.

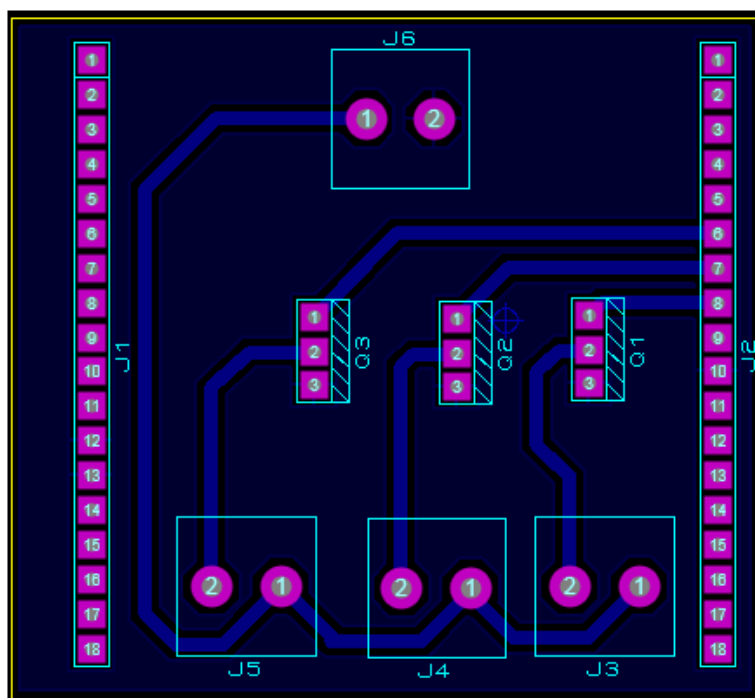


Figura 3.4: Diseño del circuito.

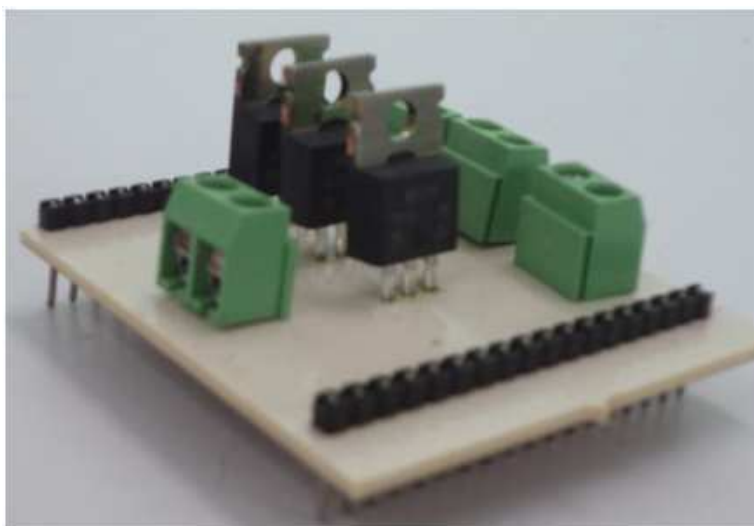


Figura 3.5: Prototipo terminado.

entre el luxómetro y la lámpara, así como la frecuencia de conmutación de la lámpara que va desde 1 kHz hasta 15 kHz.

### 3.2.2. Resultados

En la tabla 3-2 se muestran algunas mediciones hechas cuando el luxómetro se colocó a 3 m de distancia de la lámpara, la cual se instaló previamente en el techo de la habitación. La lámpara se enciende y se apaga a una frecuencia que va desde 3000 Hz hasta 10 kHz. Se observa que hay una dependencia entre la frecuencia de conmutación con respecto a la luz que se recibe. En un principio, cuando la frecuencia comienza a incrementarse, sólo se observan fluctuaciones en los Luxes que se reciben; pero cuando la frecuencia llega a su valor máximo de 10 kHz, se puede apreciar que la intensidad de la luz disminuye considerablemente. En las figuras [3-6] y [3-7] se muestra una gráfica con el comportamiento de ambas mediciones; el cual, tiene su fundamento en el tiempo de respuesta de los LEDS que constituyen la lámpara.

### 3.2.3. Conclusiones

De acuerdo con las observaciones anteriores, se concluye que para el proyecto del sistema de posicionamiento en interiores utilizando modulación OOK se deben utilizar frecuencias menores a 10 kHz para que las lámparas no pierdan su principal funcionalidad que es iluminar.

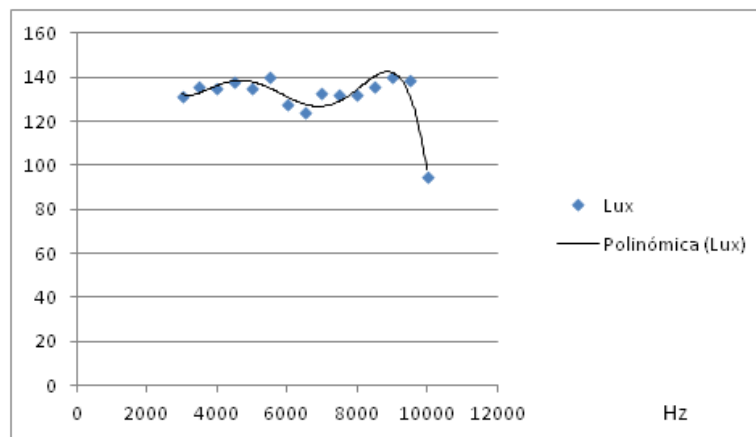


Figura 3.6: Comportamiento de la intensidad de la luz a 3m de distancia.

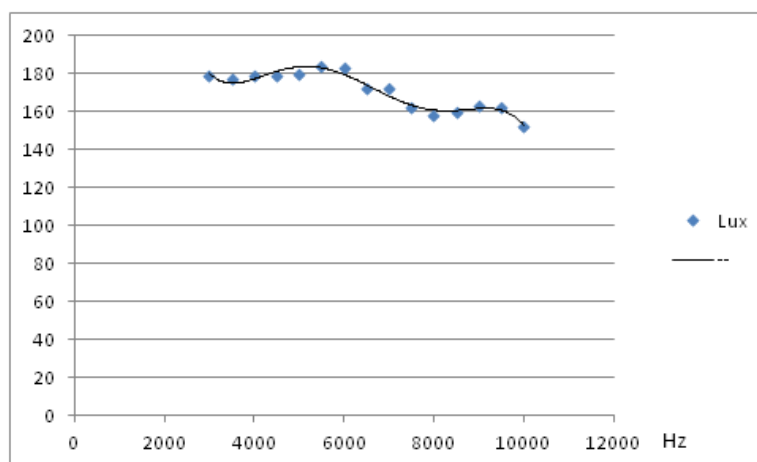


Figura 3.7: Comportamiento de la intensidad de la luz a 1.5m de distancia.

Frecuencia(Hz)	Intensidad a 3m(Lux)	Intensidad a 1.5m(Lux)
3000	131	179
3500	136	177
4000	135	179
4500	138	179
5000	135	180
5500	140	184
6000	128	183
6500	124	172
7000	133	172
7500	132	162
8000	132	158
8500	136	160
9000	140	163
9500	139	162
10000	95	152

Tabla 3.2: Mediciones de intensidad.

### 3.3. Diseño del receptor

El circuito receptor consta de varias etapas: Fotorrecepción, Filtrado, Amplificación y Digitalización. Cada una de ellas será explicada detalladamente en las secciones subsecuentes.

#### 3.3.1. Etapa de fotorrecepción

Esta es la etapa más importante del circuito ya que el fotorreceptor debe alcanzar a recibir la luz de las lámparas de LEDs colocadas a tres metros de altura y bajo la influencia de otras fuentes de luz externas.

El fotorreceptor con preamplificación por sí solo no puede hacer esto ya que la luz se dispersa demasiado conforme aumenta la distancia entre el receptor y las lámparas, para corregirlo se usa el fotorreceptor con lente acoplada de manera que la luz se concentra y se puede detectar a mayores distancias. La conexión del fotorreceptor es muy simple, tan sólo se polariza en forma inversa y se conecta en serie con una resistencia para obtener un voltaje de salida.

En la figura [3-7] se muestra esta conexión.

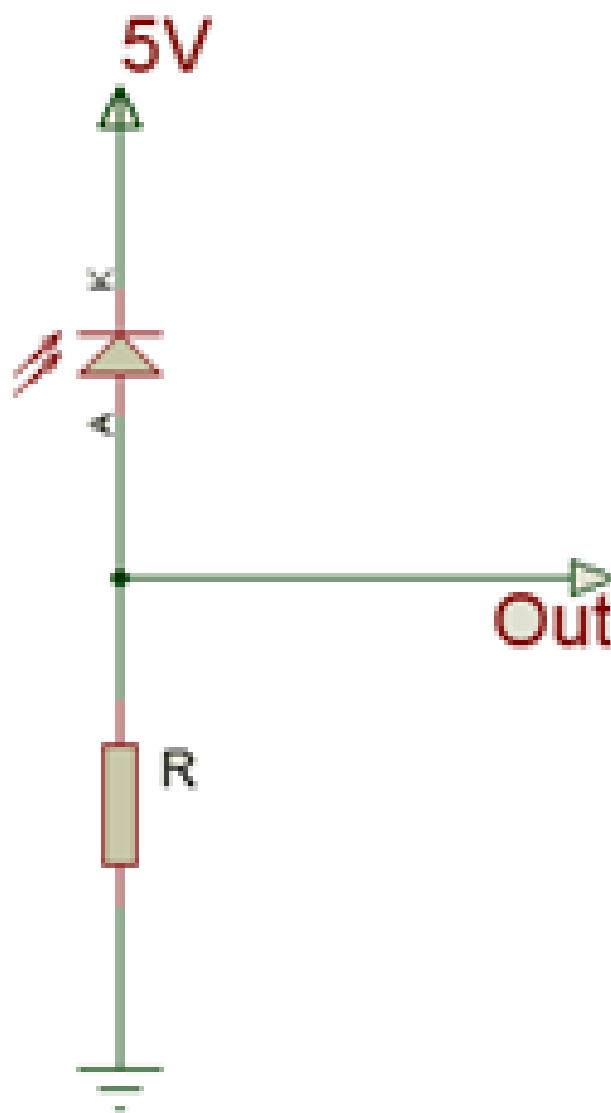


Figura 3.8: Conexión del fotorreceptor.

### 3.3.2. Etapa de filtrado

Dado que las lámparas de LEDs no son la única fuente de luz en la habitación es necesaria una etapa de filtrado para eliminar el ruido que inducen las lámparas fluorescentes colocadas en otros puntos del cuarto. La iluminación del sol es otra variable que es necesario eliminar ya que cambia constantemente a lo largo del día dependiendo de la hora y de las condiciones meteorológicas.

El filtro que se implementa es un filtro analógico pasivo del tipo Pasa-Altas. Las lámparas fluorescentes oscilan a 120 Hz, es decir, el doble de la frecuencia de la terminal eléctrica, por lo que la frecuencia de corte del filtro debe ser mayor a ese valor para que se garantice una correcta supresión de la frecuencia. La luz solar en cambio sólo agrega un voltaje de offset a la salida del fotorreceptor; por lo tanto, no es necesario agregar más filtros ya que el mismo filtro Pasa-Altas elimina las frecuencias de 0 Hz o de voltaje continuo. En la figura [3-8] se muestra el diagrama del filtro Pasa-Altas.

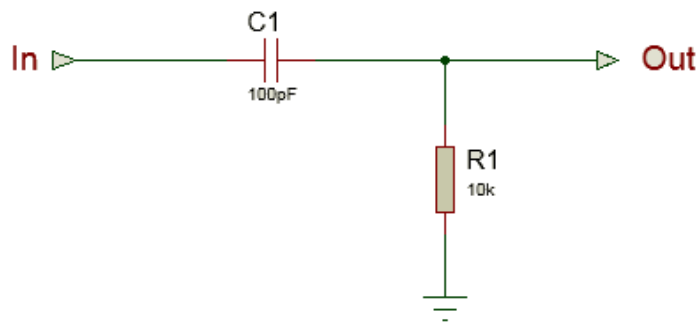


Figura 3.9: Filtro Pasa-Altas.

En el diagrama se observa que se eligió un capacitor de 100 pF y una resistencia de 10K. En la ecuación 1 se obtiene el valor de la frecuencia de corte para estos parámetros.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(10000\Omega)(100 \times 10^{-9}F)} = 159,15Hz \quad (3.1)$$

Como se puede observar la frecuencia de corte es suficientemente mayor a la frecuencia indeseada, por lo tanto el filtro está bien diseñado.

### 3.3.3. Etapa de amplificación

En esta etapa se amplifican los voltajes que entrega el fotorreceptor generalmente en el orden de los miliVolts para obtener valores en el orden de

Volts.

Dado que se tienen que amplificar voltajes pequeños es necesario utilizar un amplificador de instrumentación debido a su excelente exactitud, alto Rechazo en Modo Común (CMR) y bajo voltaje de offset.

Para este propósito se decidió utilizar el INA128P, el cual tiene un diseño de 3 OPAMP y cuenta con dos terminales para conectar una resistencia externa y controlar la ganancia. Su diagrama interno así como la ecuación de su ganancia se muestra en la figura [3-9].

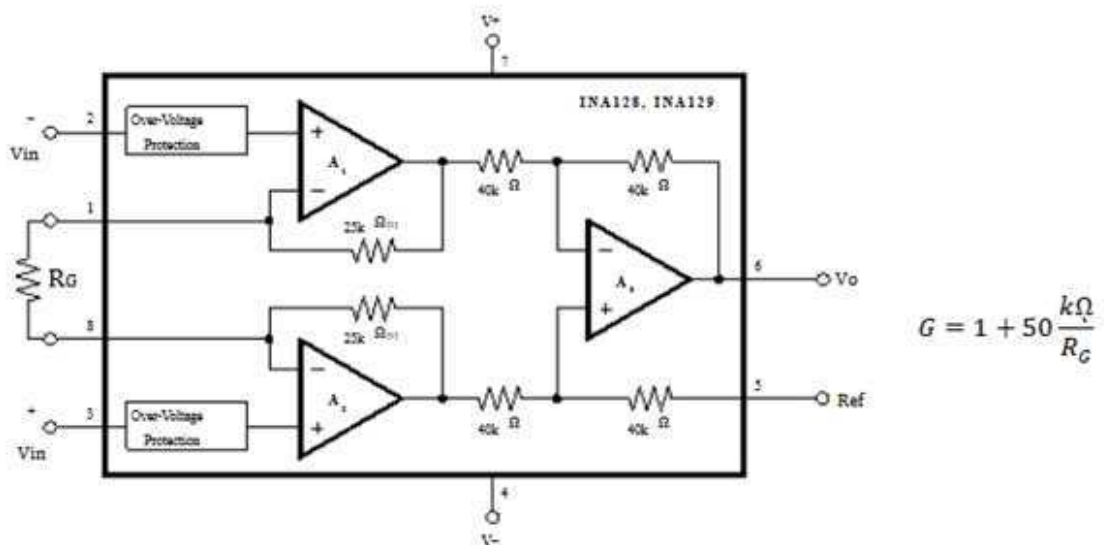


Figura 3.10: Diagrama interno del INA128P.

### 3.3.3.1. Amplificación

El voltaje que se va amplificar se conecta a la terminal 3 o Vin+ del INA128P, mientras que la terminal Vin- puede conectarse a tierra o algún divisor de voltaje para regular la diferencia de potencial que se amplifica. La terminal de referencia se conecta siempre a tierra y, por último, el voltaje de salida se obtiene directamente de la terminal 6, la cual se suele aterrizar con una resistencia en caso de que no haya más etapas posteriores.

### 3.3.3.2. Control de offset

En algunas ocasiones la intensidad luminosa de algunas fuentes externas puede ser de tal magnitud que el amplificador de instrumentación puede llegar saturarse perdiendo su funcionalidad e inutilizando todo el sistema, para evitar esto es necesario conectar un divisor de tensión a través de un



potenciómetro a la entrada negativa del amplificador, de manera que en condiciones de alta luminosidad es posible aumentar el voltaje de la terminal negativa disminuyendo la diferencia de potencial que se amplifica y, en consecuencia, evitando la saturación.

En la figura [3-11] se muestra la conexión del amplificador con el divisor de tensión.

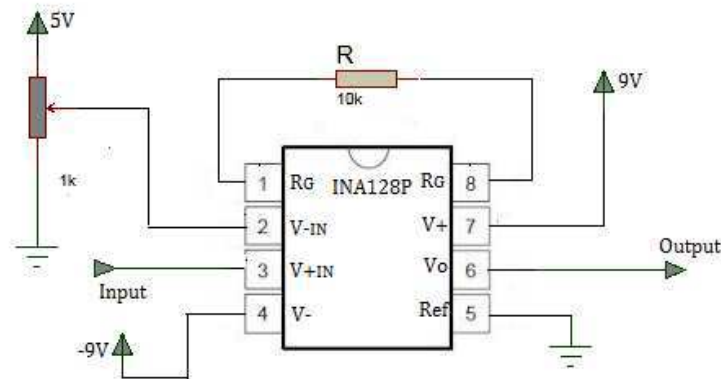


Figura 3.11: Conexión del INA128P.

### 3.3.4. Etapa de digitalización

Una vez que la señal proveniente de las lámparas tiene un voltaje pico de unos cuantos volts variando entre tensiones positivas y negativas, es necesario convertirla en una señal TTL que pueda ser leída por un dispositivo electrónico digital como el microcontrolador.

Este proceso se conoce como digitalización y consiste en obtener una señal cuadrada a partir de la señal recibida. Debido a que la señal original no contiene offset tiene tensiones tanto positivas como negativas, de tal manera que las tensiones mayores a 0V representan un **1** lógico y las tensiones menores a 0V representan un **0** lógico.

Antes de proseguir con la digitalización se explicará un poco acerca de los comparadores ya que son el corazón de esta etapa.

La función de un comparador de voltaje consiste en comparar el voltaje  $V_p$  en una de sus entradas con el voltaje  $V_N$  de la otra entrada, y obtener como salida ya sea un voltaje bajo  $V_{OL}$  o un voltaje alto  $V_{OH}$  de acuerdo con

$$V_O = V_{OL} \quad \text{para} \quad V_p < V_N \quad (3.2)$$

$$V_O = V_{OH} \quad \text{para} \quad V_P > V_N \quad (3.3)$$

La figura [3-12] ilustra las ecuaciones anteriores.

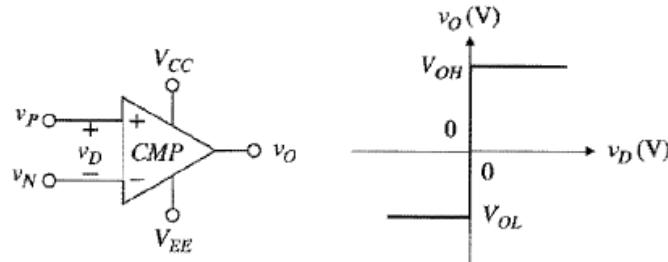


Figura 3.12: Simbolismo del comparador de voltaje y curva de la salida.

Se observa que mientras  $V_P$  y  $V_N$  son variables analógicas debido a que pueden asumir un conjunto continuo de valores,  $V_O$  es una variable binaria debido a que únicamente puede asumir uno de dos valores,  $V_{OL}$  o  $V_{OH}$ . Fuera del origen, la señal de salida consiste en dos líneas horizontales ubicadas en  $V_O = V_{OL}$  y  $V_O = V_{OH}$ . Estos niveles no deben, necesariamente, ser simétricos; no obstante, la simetría es deseable en ciertas aplicaciones. Lo más importante es que los niveles estén lo suficientemente separados para hacer posible su distinción. Por ejemplo, las aplicaciones digitales requieren que  $V_{OL} = 0V$  y que  $V_{OH} = 5V$ . Cuando la velocidad no es crítica, un amplificador operacional se puede convertir en un excelente comparador, en especial en vista de las ganancias extremadamente altas y de los bajos desvíos de entrada disponibles en muchos tipos comunes de amplificadores operacionales. El circuito de la figura [3-13] utiliza un amp op para comparar  $V_{in}$  con algún umbral de voltaje,  $V_T$ . Cuando  $V_{in} < V_T$  el circuito proporciona  $V_O = -V_{sat}$ , y cuando  $V_{in} > V_T$  proporciona  $V_O = +V_{sat}$ . Es importante señalar que cuando el amplificador operacional se usa como un comparador, éste no tiene control sobre  $V_N$  debido a la ausencia de retroalimentación. El amplificador ahora opera en modo de lazo abierto y, en virtud de su ganancia extremadamente alta, pasa la mayor parte de su tiempo en saturación.

Una vez que se ha explicado el funcionamiento del comparador se procede con su utilización para digitalizar la señal recibida. Para obtener una señal TTL, la alimentación positiva del amplificador debe conectarse a 5V y la alimentación negativa a 0V de manera que la salida se alterna entre esos dos valores. Dado que la señal de entrada debe compararse con 0V, la referencia correspondiente a la terminal inversora (V-) se conecta a tierra. En la figura [3-14] se muestra la conexión.

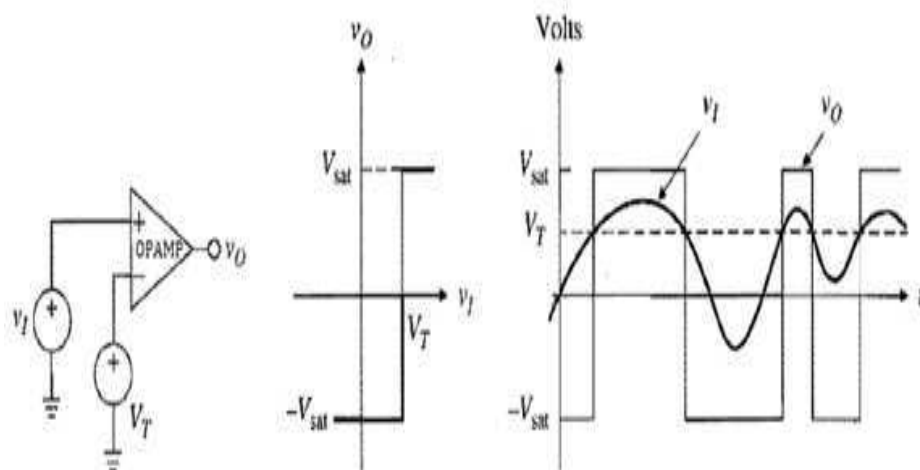


Figura 3.13: Detector de umbral.

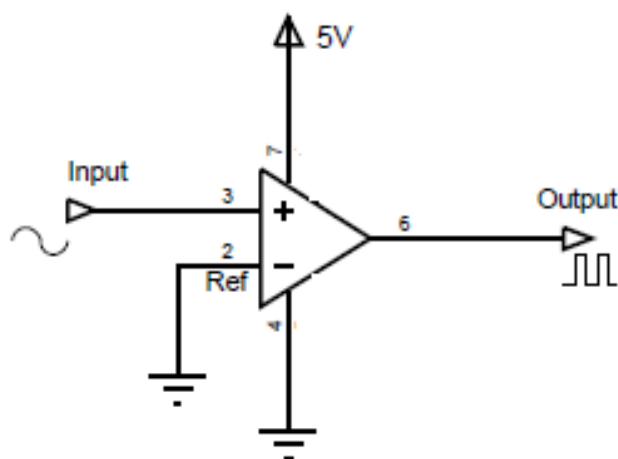


Figura 3.14: Comparador como detector de cruce por cero.

### 3.3.4.1. Primera etapa del receptor en PCB

La primera etapa del circuito impreso para el receptor consiste en unir todas las etapas anteriores con el objetivo de captar las señales provenientes de las lámparas y observarlas en el osciloscopio, esto permitirá observar su comportamiento en distintos puntos y a diferentes ángulos para plantear la solución final que consiste en determinar la ubicación del receptor. La conexión de todas las etapas se muestra en la figura [3-15].

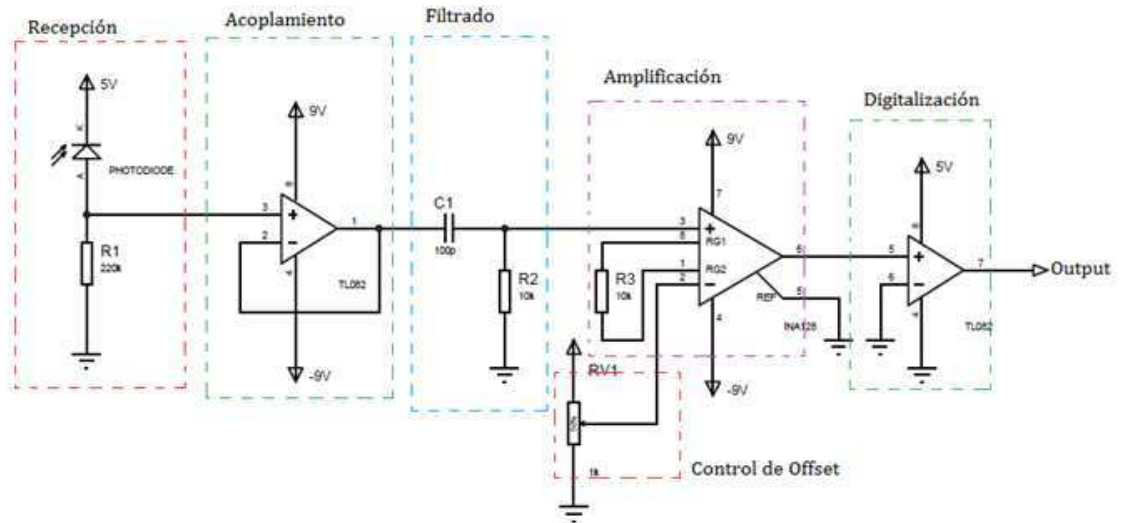


Figura 3.15: Primera etapa del receptor.

La única etapa que no se expuso fue la de acoplamiento debido a su simplicidad, ésta tiene como finalidad acoplar la etapa de recepción y la de filtrado para evitar caídas de voltaje y pérdida de la señal. Se observa el uso del circuito integrado TL082 en dos etapas del receptor, esto debido a que es un circuito que mantiene un equilibrio entre calidad y costo, sus aplicaciones como amplificador y comparador arrojan resultados satisfactorios.

Para el diseño en PCB del circuito se dispuso del Software de diseño y simulación Ares-Proteus debido a la facilidad que ofrece para simular circuitos, la disponibilidad de gran cantidad de librerías y el entorno de desarrollo muy intuitivo y práctico que maneja.

En la figura [3-16] se muestra el diseño del circuito impreso, mientras que en la figura [3-17] se muestra el prototipo terminado.

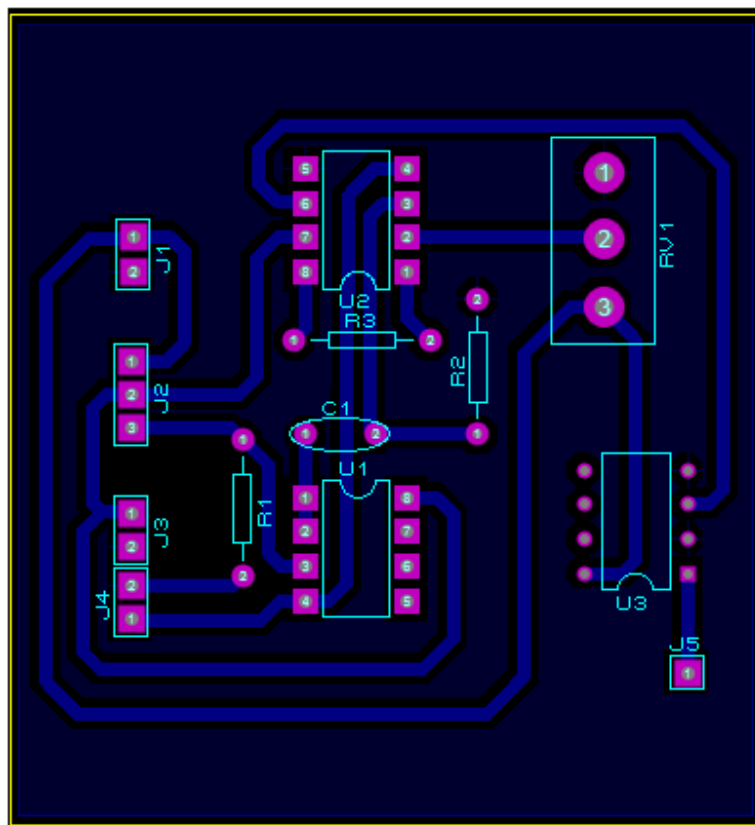


Figura 3.16: Diseño de la PCB.

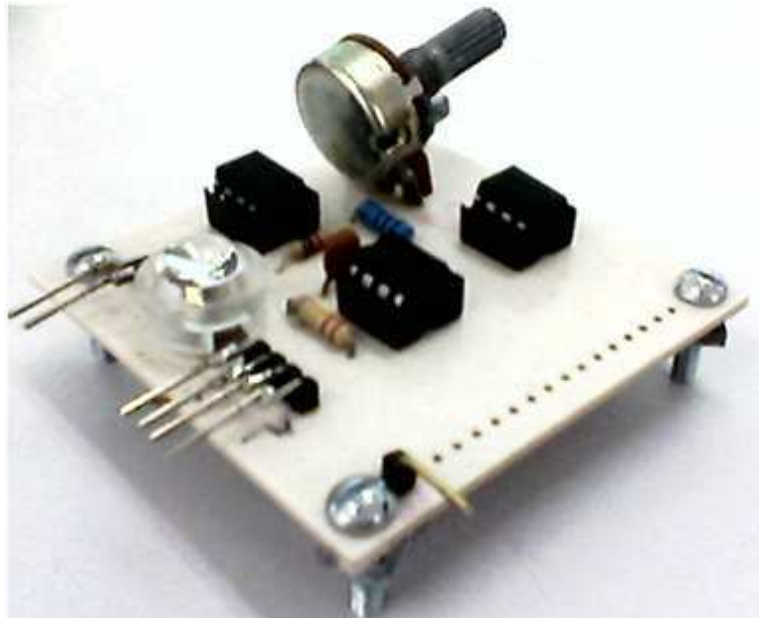


Figura 3.17: Prototipo Impreso.

## Capítulo 4

# Pruebas y Resultados

**RESUMEN:** En este capítulo se exponen los resultados obtenidos al hacer pruebas de fotorrecepción con varias lámparas. Se muestran las señales obtenidas en puntos de interferencia de los halos y se plantea la solución para determinar la posición con base en las características de las señales.

### 4.1. Prueba con una lámpara

Una vez que se tienen los prototipos impresos tanto del transmisor como del receptor se puede iniciar con las pruebas de recepción para evaluar sobre todo la efectividad del fotorreceptor ya que se trabajará en un ambiente no controlado y propenso de variaciones en la iluminación debida a la luz solar.

La lámpara se coloca en uno de los plafones de la habitación y el receptor se coloca en el suelo de tal modo que se tiene la máxima distancia entre ambos, aproximadamente 3 m.

A través de una extensión eléctrica la lámpara se conecta al transmisor, el cual se encuentra en otro punto de la habitación donde puede ser fácilmente programado.

A través de la modulación OOK (on-off keying) la lámpara se enciende y apaga a una frecuencia entre 1 y 10 kHz de manera que esas transiciones resultan imperceptibles para el ojo humano.

En la figura [4-1] se muestra la forma de onda recibida cuando el receptor se coloca debajo de la lámpara.

Se observa que la frecuencia a la que parpadea la lámpara es de aproximadamente 4 kHz y que la señal a la salida del receptor oscila entre 0 y 5.79V. El voltaje pico a pico es muy próximo al de una señal TTL pura por lo tanto no habrá conflicto al momento de hacer la adquisición con el microcontrolador.

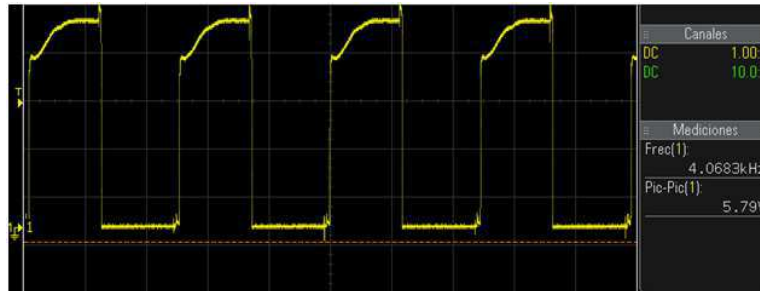


Figura 4.1: Señal proveniente de la lámpara.

Otro punto importante es que el ciclo de trabajo de la señal es del 50 %; sin embargo, esta cualidad solo se cumple en áreas cercanas al eje de iluminación. Experimentalmente se comprobó que aproximadamente a una distancia 1.10 m del centro del halo de la lámpara la señal se empieza a deformar de tal manera que deja de coincidir con la señal que se envía a través del transmisor. Este efecto se puede apreciar en la figura [4-2].

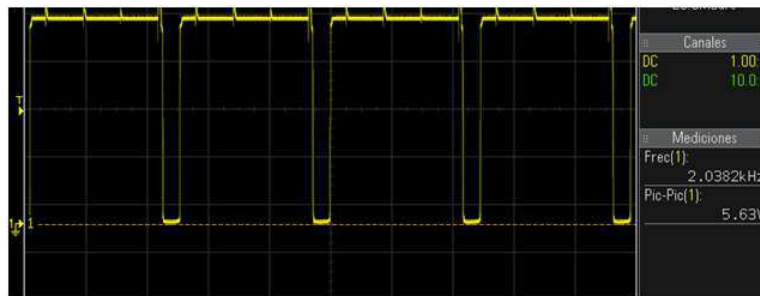


Figura 4.2: Deformación de la señal al alejar el receptor 1.10 m del centro del halo.

Como se puede observar en la figura, la frecuencia se ha reducido a la mitad y el ciclo de trabajo que era del 50 % ahora es del 90 %. Con lo anterior se puede concluir que la señal transmitida se recibe correctamente siempre y cuando el receptor se encuentre dentro del halo de la lámpara, es decir, a no más de 1.10 m de distancia del centro.

## 4.2. Prueba con tres lámparas

Ahora que ya se sabe el radio funcional del halo de una lámpara se procede a colocar las tres en el techo y formando un triángulo entre sí con el objetivo de definir una cierta área sobre la que habrá interferencia entre los halos, ya sea entre sólo dos lámparas o entre las tres.



Este tipo de interferencias es lo que va permitir determinar la posición del receptor ya que dependiendo de su ubicación el patrón de interferencia va cambiar.

En la figura [4-3] se muestra una vista superior de este acomodo así como las longitudes de los lados del triángulo que se forma.

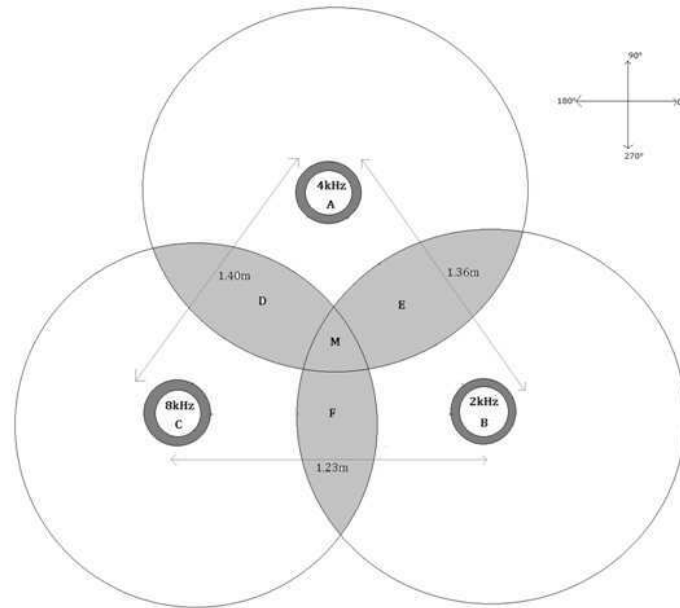


Figura 4.3: Triangulación de la luz.

Se observa que cada lámpara parpadea a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia más pequeña.

Para identificar diferentes puntos dentro del triángulo se les han asignado letras a distintas posiciones dentro del área tales como el centro de cada lámpara (A B C), las intersecciones entre pares de halos (D E F) y la intersección de los tres halos correspondiente al punto M.

La sección del área alrededor de las lámparas donde no hay intersecciones no permite detectar cambios en la posición ya que la frecuencia recibida es siempre la misma y, al no haber interacción con otros halos, la forma de onda se mantiene siempre constante. Lo anterior significa un error bastante grande en comparación con la longitud del triángulo, pero razonable en comparación a los GPS convencionales ya que hablamos de un error de menos de 1 metro.

#### 4.2.1. Recepción en distintos puntos

Si se coloca el receptor en cada uno de los puntos marcados en la figura [4-4] se obtienen distintas formas de onda que dependen de los elementos que

intervienen. Por ejemplo, al colocar el receptor en los puntos A B y C se obtienen formas de onda con un ciclo de trabajo del 50 % ya que se ubica justo debajo de cada lámpara; en cambio, cuando el receptor se coloca en cualquiera de los puntos D, E, F o M se presenta un patrón de interferencia que genera una señal ya sea con un ciclo de trabajo distinto, o bien, compuesta por una serie de pulsos con diferente ancho de pulso.

Las figuras [4-4], [4-5] y [4-6] muestran tres formas de onda correspondientes a tres ubicaciones distintas.

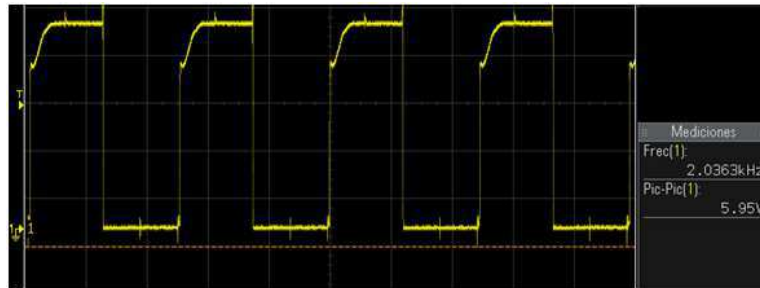


Figura 4.4: Señal capturada en el punto B.

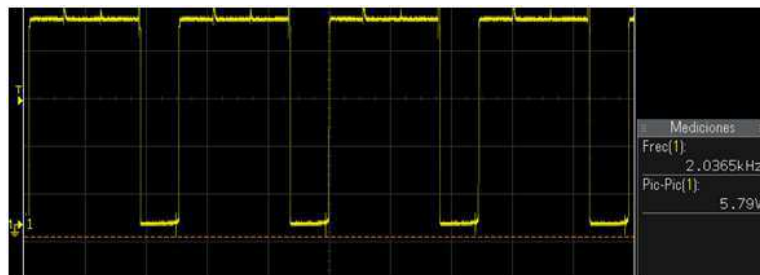


Figura 4.5: Señal capturada en el punto E.

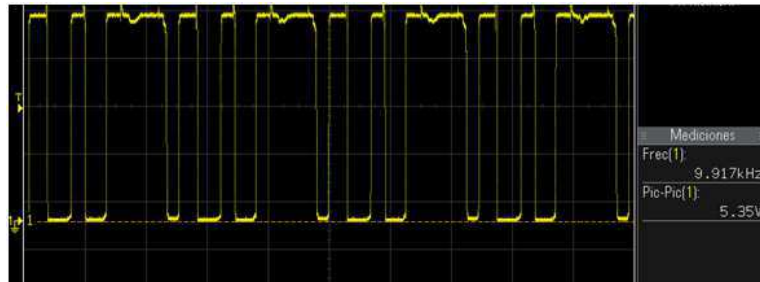


Figura 4.6: Señal capturada en el punto M.

#### 4.2.2. Recepción en distintos ángulos

A pesar de que la ubicación del receptor dentro del área de las tres lámparas determina la forma de onda de la señal recibida, ésta no es la única que interviene ya que debido a la gran sensibilidad que tiene la lente del fotorreceptor así como a las irregularidades de las superficies como el suelo y el techo, la señal recibida se ve modificada al rotar el receptor. Sin embargo, esto sólo sucede en zonas de interferencia, si el receptor se coloca en los puntos A,B y C, justo debajo de cada lámpara, la señal recibida no cambia aunque el receptor se rote, esto debido a que está recibiendo casi toda la luz de una sola lámpara y la colaboración de las demás es despreciable.

En las figuras [4-7], [4-8] y [4-9] se muestran tres formas de onda capturadas en el punto M pero con distintos ángulos. Se eligió el punto M debido a que es la zona de mayor interferencia.

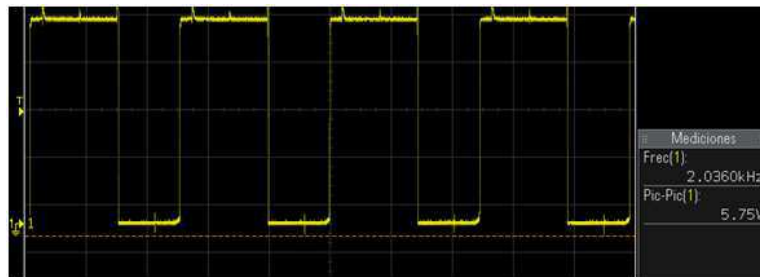
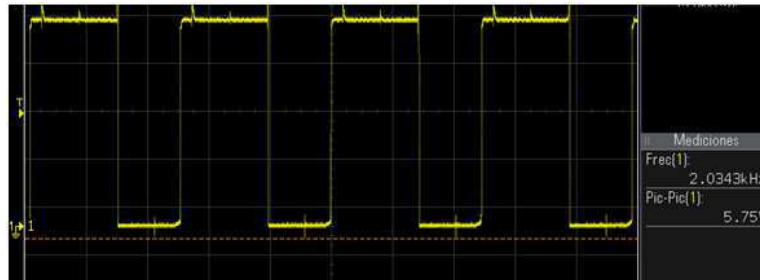
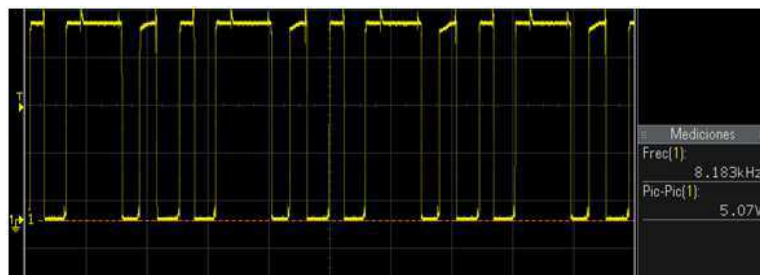


Figura 4.7: Punto M a un ángulo de 90°.

Figura 4.8: Punto M a un ángulo de  $180^\circ$ .Figura 4.9: Punto M a un ángulo de  $270^\circ$ .

En las figuras anteriores se observa que a pesar de que se trata del mismo punto tanto la frecuencia como la forma de onda cambian al modificar la rotación del receptor.

Este fenómeno puede ser una ventaja o una desventaja dependiendo de la perspectiva. Si sólo se desea saber la posición es mejor tener una señal única por cada punto para evitar posibles errores debido a traslapes con otros puntos; en cambio, si además de saber la posición se desea saber también la orientación entonces puede resultar ventajoso con la problemática de que pueden existir dos direcciones distintas con la misma forma de onda.

### 4.3. Determinación de la posición

Ya se caracterizaron las formas de onda en distintos puntos dentro del área de las lámparas e incluso se hicieron mediciones a distintos ángulos. Ahora se va proceder con la parte más importante de este proyecto: *la determinación de la posición*.

### 4.3.1. Planteamiento de la solución

Una primera alternativa que se tenía para la determinación de la posición era adquirir las señales del receptor a través de una tarjeta de adquisición de datos *Elvis* de National Instruments para hacer un algoritmo de reconocimiento que permitiera comparar las señales capturadas con otras señales previamente almacenadas y correspondientes a los puntos dentro del triángulo de lámparas. Este método no resultó eficiente debido a que las señales capturadas variaban dependiendo del instante en que eran capturadas y, por lo tanto, las probabilidades de que coincidieran con las señales previamente almacenadas eran casi nulas. Además, el tamaño de los equipos que se necesitaban hacía al sistema muy poco práctico ya que debía estar conectado a la red eléctrica y tenía muy poca libertad de movimiento.

Finalmente, se optó por una segunda alternativa que consiste en utilizar un microcontrolador para tomar muestras de la señal a una tasa de 25 kHz, esta frecuencia cumple con la ley de Nyquist ya que la mayor frecuencia muestreada es de 8kHz. Cada vez que el microcontrolador toma una muestra aumenta un contador dependiendo si capturó un voltaje de 5V, si el voltaje capturado es de 0V el contador mantiene su valor. En adición al muestreo, el microcontrolador también mide la frecuencia de la señal para tener otro punto de comparación.

Al cabo de 500 ms el microcontrolador entra a una interrupción para desplegar el valor de la frecuencia y del contador en una LCD.

Para poder determinar la ubicación usando estos valores es necesario hacer una caracterización de los puntos principales dentro del triángulo de las lámparas. La frecuencia y las cuentas de cada punto se ingresan al código usando los condicionales `if()`? `else()` de tal manera que permiten discernir la posición del receptor dependiendo de la condición que se cumpla.

### 4.3.2. Diagrama de flujo

El código correspondiente a la determinación de la solución fue escrito en lenguaje C con el compilador CCS. Sin embargo, se considera más ilustrativo explicar el procedimiento de manera gráfica a través de diagramas de flujo. En la figura [4-10] se muestra un gráfico que explica de forma más detallada el procedimiento y la solución del problema.

## 4.4. Impresión de la PCB

Esta etapa del proyecto consiste en unir en una sola placa el receptor, el microcontrolador y la LCD para hacer un circuito más práctico y funcional.

El nuevo diseño utiliza dos baterías de 9V para generar las tensiones duales que utiliza el amplificador de instrumentación y el seguidor de tensión.

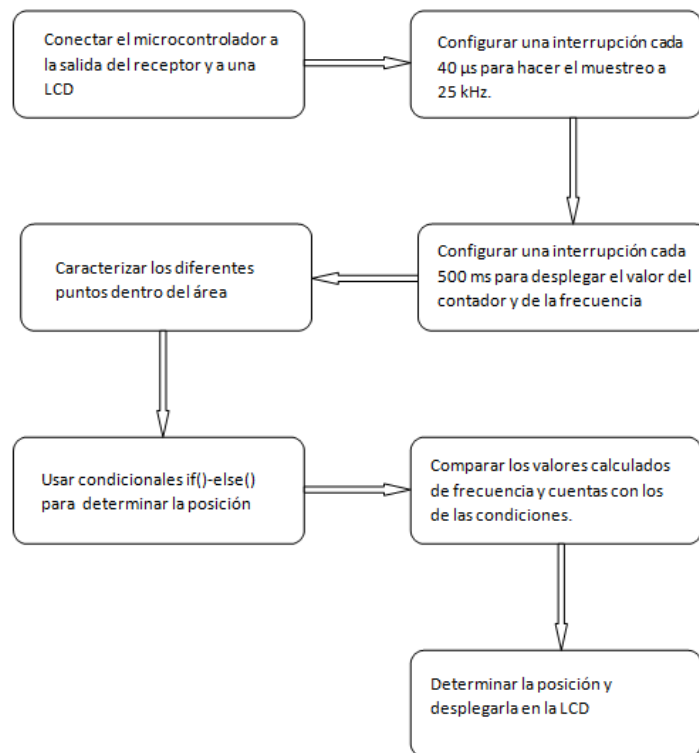


Figura 4.10: Diagrama de flujo de la solución.

Para alimentar los elementos que trabajan con 5V como el potenciómetro, el fotorreceptor, el comparador, el microcontrolador y la LCD se utiliza el regulador de voltaje LM7805, el cual entrega una salida de 5V siempre y cuando la tensión de entrada sea mayor a ese valor.

En la figura [4-11] se presenta el diseño en Ares-Proteus y en la figura [4-12] el prototipo terminado.

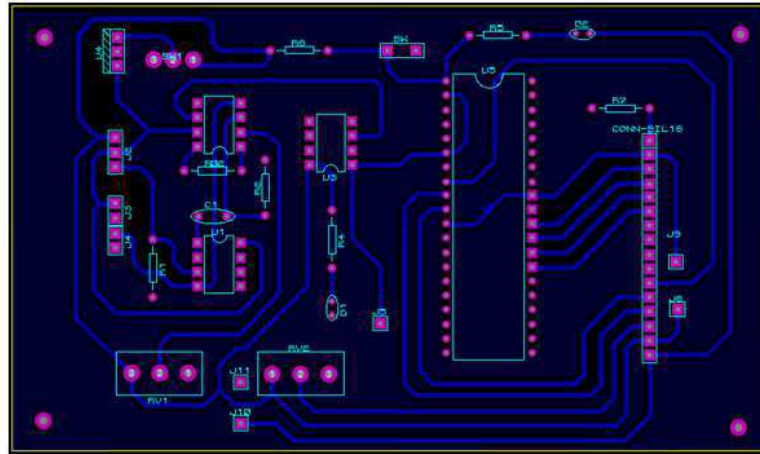


Figura 4.11: Diseño en Ares-Proteus.

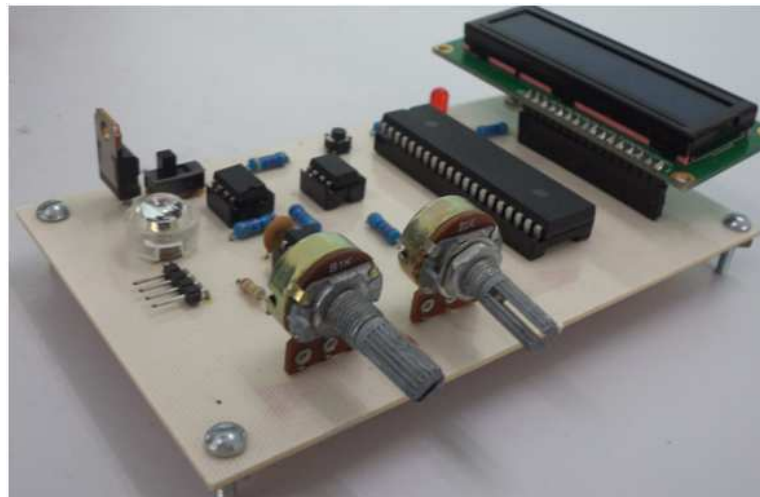


Figura 4.12: Prototipo Impreso.

## 4.5. Resultados

A continuación una lista de los resultados que se obtuvieron.

- El circuito no sólo detecta ubicación sino también orientación cuando el receptor se encuentra en una zona de interferencia.
- El error que se maneja es grande en comparación al área que cubren las lámparas pero razonable en comparación a los GPS convencionales.
- El sistema está propenso a errores en la determinación de la posición debido a que puede haber dos señales muy similares en dos puntos distintos.
- La iluminación del sol no interfiere con el funcionamiento del sistema; en cambio, las lámparas halógenas colocadas en posiciones adjuntas sí pueden llegar a alterar las mediciones.
- La caracterización depende de la aplicación ya que el receptor no siempre se encuentra a la misma distancia de las lámparas.
- El receptor se debe mantener siempre en posición horizontal para que la inclinación del fotorreceptor no sea una variable más.
- El control de offset rara vez se utiliza, lo mejor es dejarlo fijo en una posición donde el sistema funciona.

## 4.6. Conclusiones

Como conclusión se puede decir que la aplicación del sistema de posicionamiento en interiores utilizando comunicación VLC es más eficiente cuando se trabaja con lámparas que no se interfieren entre sí de manera que no hay dos señales iguales en dos posiciones distintas.

Los sistemas de IPS para robots en la industria utilizan sensores colocados en el piso para determinar su posición. El sistema con luz visible desempeña la misma función con la diferencia de que utiliza las lámparas que iluminan el interior, de manera que no hace falta hacer instalaciones adicionales. Además, toda la lógica del IPS está controlada desde el transmisor de modo que si se quiere modificar alguna ruta sólo es necesario modificar el programa que hace parpadear todas las lámparas.

## 4.7. Trabajos a futuro

Algunos puntos interesantes que se pueden implementar en un futuro son:



- 
- Aumentar la precisión del receptor utilizando más de un sensor de luz para tener más puntos de comparación y poder hacer al sistema independiente de la orientación.
  - Cubrir todo el interior con las lámparas de LEDs para tener más área de ubicación y eliminar todas las interferencias.
  - Acoplar el sistema receptor a un robot industrial que utiliza ruedas para desplazarse de tal manera que pueda saber su ubicación y tomar decisiones respecto al punto al que quiere llegar.

# Bibliografía

- [1] <http://www.etud.insa-toulouse.fr/~tkabir/code/cietorgb.html>
- [2] H. Sugiyama, S. Haruyama. Experimental investigation of modulation method for visible-light communications.
- [3] Tomasi Wayne.(2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas. México, Prentice Hall
- [4] Información oficial del gobierno de Estados Unidos sobre el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). <http://www.gps.gov/multimedia/exhibits/adventures/>
- [5] Goldsmith Andrea.(2005) Wireless Communications. <http://wsl.stanford.edu/~andrea/Wireless/SampleChapters.pdf>
- [6] Ventajas de la iluminación LED. <http://fitttech.blogspot.mx/2015/02/iluminacion-led-que-ventajas-tiene.html>
- [7] INTALITE UK, ECO LED PANEL ROUND. <http://www.intalite.co.uk/eco-led-panel-round-downlight-round-white-10w-3000k.html>
- [8] Catálogo de productos de iluminación. <http://www.technoshine.com/productos.php>
- [9] Manejo de la plataforma Pinguino. <http://tecbolivia.com/index.php/articulos-y-tutoriales-microcontroladores/23-introduccion-a-la-plataforma-qpinguinoq-arduino-con-pic>
- [10] Electronic Components Datasheet IRF510 MOSFET.
- [11] Introducción a los fotodetectores. [tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20426/Capitulo3.pdf](http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20426/Capitulo3.pdf)
- [12] [www.itl.laguna.edu.mx/Academico/Carreras/.../UNIDAD2TEMA4.PDF](http://www.itl.laguna.edu.mx/Academico/Carreras/.../UNIDAD2TEMA4.PDF)
- [13] Catálogo de componentes electrónicos. <http://www.radioelectronics.com/info/data/>

- 
- [14] ZAMTSU Corporation S.R.L. <http://www.zamtsu.com/web/luxometros/Luxometro-LX107.html>
- [15] Instrucciones de uso del luxómetro [www.pce-iberica.es/manuales/manual-luxometro-pce-174-nuevo.pdf](http://www.pce-iberica.es/manuales/manual-luxometro-pce-174-nuevo.pdf)
- [16] BURR-BROWN Corporation Datasheet. INA128P Instrumentation Amplifier
- [17] Microchip Datasheet. PIC18F4550 Microcontroller.
- [18] CCS Compiler Basics. <https://sites.google.com/site/ielectrox/home/programas-1/pic-c-compiler>
- [19] C Compiler Reference Manual. Version 4. August 2007.
- [20] CCS Compiler Details. <http://www.ccsinfo.com/content.php?page=compilers>
- [21] Franco Sergio.(2005). Diseño con aplicadores operacionales y circuitos integrados analógicos. México D.F., McGraw Hill
- [22] Project LiFi. <http://micro.org/bldsomething/>
- [23] Abhishek Kurup, Vipin Tiwari, Selvanathiya. Implementation and Demonstration of LiFi Technology, 2014.
- [24] Rahul R. Sharma, Akshay Sanganal, Sandhya Patl . Implementation of a Simple Li-Fi Based System. October 2014
- [25] García Brejio Eduardo.(2008). Compilador CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC. Barcelona, Alfaomega







UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

---

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA,  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*Sistema de Posicionamiento Local basado en la tecnología  
Li-Fi*

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

*Miguel Ángel Flores Olmedo*

DIRECTOR:

*Dr. Mario Alberto Ibarra Manzano*

SALAMANCA, GTO.

Noviembre 2016

M. EN I. J. ANTONIO ALTAREZ JAIME  
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES  
PRESENTE.

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno (a) Miguel Ángel Flores Olmeda del Programa de Licenciatura en Ing. en Comunicaciones y Electrónica cuyo número de NUA es 413744 del cual soy director. El título de la tesis es Sistema de Posicionamiento Local basado en la Tecnología Li-Fi

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los dos sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE

  
Mario Alberto Obregon Hernandez

NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS  
SECRETARIO

\_\_\_\_\_  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS

  
José A. Andrade Lucio

NOMBRE Y FIRMA  
PRESIDENTE

  
José Ruiz Pinales

NOMBRE Y FIRMA  
VOCAL

# Agradecimientos

A mis padres que siempre creyeron en mí a pesar de que nunca los ponía al tanto de mi situación académica ni de mis avances en la tesis. Ellos simplemente me proyectaban en el futuro simplemente con ver mi aprovechamiento y la manera en que enfrentaba los problemas.

A mis asesores que siempre me aclararon todas mis dudas de la forma más clara posible y me plantearon diferentes opciones para que no me aferrara a una sola metodología.



# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.1.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS) . . . . .	1
1.1.2. Sistema de Posicionamiento en Interiores (IPS) . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	5
1.3. Justificación . . . . .	5
1.4. Planteamiento . . . . .	5
<b>2. Marco teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Comunicaciones inalámbricas . . . . .	7
2.1.1. Comunicaciones infrarrojas . . . . .	7
2.1.2. Comunicaciones basadas en luz . . . . .	8
2.2. Comunicación VLC . . . . .	8
2.2.1. Modulación OOK . . . . .	9
2.3. Lámpara de LEDS downlight . . . . .	9
2.3.1. Características . . . . .	9
2.3.2. Ventajas . . . . .	11
2.4. Microcontroladores . . . . .	11
2.4.1. PIC18F4550 . . . . .	11
2.4.2. Plataforma Pingüino . . . . .	14
2.4.3. Compilador CSS . . . . .	17
2.5. Manejo del luxómetro . . . . .	17
2.6. Fotorreceptores . . . . .	19
2.6.1. Definición . . . . .	19
2.6.2. Fotodiodos . . . . .	19
2.6.3. Fototransistores . . . . .	19
2.6.4. Fotorresistencias . . . . .	19
2.7. Fotorreceptor con preamplificación . . . . .	21
2.7.1. Fotodiodo S4349 de Hamamatsu . . . . .	21

---

<b>3. Diseño e Implementación</b>	<b>22</b>
3.1. Transmisión . . . . .	22
3.1.1. Principio . . . . .	22
3.1.2. Código del transmisor . . . . .	22
3.1.3. Diseño del transmisor . . . . .	24
3.1.4. Impresión de la PCB . . . . .	24
3.2. Caracterización . . . . .	24
3.2.1. Objetivo . . . . .	24
3.2.2. Resultados . . . . .	27
3.2.3. Conclusiones . . . . .	27
3.3. Diseño del receptor . . . . .	29
3.3.1. Etapa de fotorrecepción . . . . .	29
3.3.2. Etapa de filtrado . . . . .	31
3.3.3. Etapa de amplificación . . . . .	31
3.3.4. Etapa de digitalización . . . . .	33
<b>4. Pruebas y Resultados</b>	<b>39</b>
4.1. Prueba con una lámpara . . . . .	39
4.2. Prueba con tres lámparas . . . . .	40
4.2.1. Recepción en distintos puntos . . . . .	41
4.2.2. Recepción en distintos ángulos . . . . .	43
4.3. Determinación de la posición . . . . .	44
4.3.1. Planteamiento de la solución . . . . .	45
4.3.2. Diagrama de flujo . . . . .	45
4.4. Impresión de la PCB . . . . .	45
4.5. Resultados . . . . .	48
4.6. Conclusiones . . . . .	48
4.7. Trabajos a futuro . . . . .	48
<b>Bibliografía</b>	<b>50</b>

# Índice de figuras

1.1. Órbitas de varios satélites Navstar (Navigation System with Time And Ranging), superpuestas a una proyección Mercator del mundo. Como allí se ve, los satélites describen una espiral en torno a la Tierra . . . . .	2
1.2. Esquema del IPS basado en luz visible. . . . .	6
2.1. Espectro de la luz visible. . . . .	8
2.2. Vista esquemática del proceso completo de transmisión y recepción de datos. . . . .	9
2.3. Vista lateral de la lámpara LED. . . . .	10
2.4. Encapsulado del PIC18F4550. . . . .	13
2.5. Placa Pinguino comercial. . . . .	14
2.6. Entorno de desarrollo de Pinguino. . . . .	15
2.7. Numeración de terminales de la tarjeta Pinguino. . . . .	16
2.8. Luxómetro. . . . .	18
2.9. Fototransistor a) Símbolo b) Circuito Equivalente. . . . .	20
3.1. Contador desglosado en sus 8 bits, se observan las señales en fase y en múltiplos del bit B0. . . . .	23
3.2. Código del transmisor. . . . .	23
3.3. Diagrama del transmisor. . . . .	25
3.4. Diseño del circuito. . . . .	26
3.5. Prototipo terminado. . . . .	26
3.6. Comportamiento de la intensidad de la luz a 3m de distancia. . . . .	27
3.7. Comportamiento de la intensidad de la luz a 1.5m de distancia. . . . .	28
3.8. Conexión del fotorreceptor. . . . .	30
3.9. Filtro Pasa-Altas. . . . .	31
3.10. Diagrama interno del INA128P. . . . .	32
3.11. Conexión del INA128P. . . . .	33
3.12. Simbolismo del comparador de voltaje y curva de la salida. . . . .	34
3.13. Detector de umbral. . . . .	35
3.14. Comparador como detector de cruce por cero. . . . .	35

---

3.15. Primera etapa del receptor. . . . .	36
3.16. Diseño de la PCB. . . . .	37
3.17. Prototipo Impreso. . . . .	38
4.1. Señal proveniente de la lámpara. . . . .	40
4.2. Deformación de la señal al alejar el receptor 1.10 m del centro del halo. . . . .	40
4.3. Triangulación de la luz. . . . .	41
4.4. Señal capturada en el punto B. . . . .	42
4.5. Señal capturada en el punto E. . . . .	42
4.6. Señal capturada en el punto M. . . . .	43
4.7. Punto M a un ángulo de $90^\circ$ . . . . .	43
4.8. Punto M a un ángulo de $180^\circ$ . . . . .	44
4.9. Punto M a un ángulo de $270^\circ$ . . . . .	44
4.10. Diagrama de flujo de la solución. . . . .	46
4.11. Diseño en Ares-Proteus. . . . .	47
4.12. Prototipo Impreso. . . . .	47

# Índice de Tablas

2.1. Propiedades de la lámpara LED que fue utilizada. . . . .	10
2.2. Descripción del PIC18F4550. . . . .	12
3.1. Características eléctricas IRF510. . . . .	24
3.2. Mediciones de intensidad. . . . .	29

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

**RESUMEN:** En la presente sección se muestran algunos de los antecedentes del Sistema de Posicionamiento Global en ambientes de interiores, así como las distintas maneras en que se pueden construir estos sistemas utilizando diferentes métodos. Se presentan también los objetivos del proyecto, su justificación y su planteamiento.

### 1.1. Antecedentes

#### 1.1.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

La manera clásica para determinar la posición de un objeto en cualquier lugar de la Tierra es mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

El GPS es una constelación de satélites que orbitan aproximadamente a 11000 millas sobre la tierra y transmiten ondas de radio a los receptores alrededor del planeta. Determinando el tiempo que toma una señal GPS de un satélite hasta el receptor, se puede calcular la distancia al satélite y averiguar la posición exacta en la Tierra.

Las señales de radio del satélite viajan a 186000 millas por segundo. Para encontrar la distancia de un satélite a un receptor, se usa la siguiente ecuación:  $(186,000 \text{ mi/sec}) \times (\text{tiempo de viaje de la señal en segundos}) = \text{Distancia del satélite al receptor en millas}$ .

Calculando simultáneamente la distancia del receptor GPS a 4 satélites es posible determinar su posición general con respecto a la latitud, longitud y elevación.

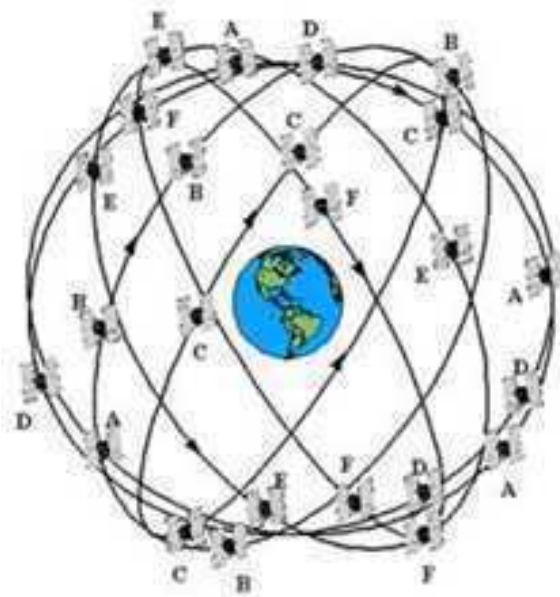


Figura 1.1: Órbitas de varios satélites Navstar (Navigation System with Time And Ranging), superpuestas a una proyección Mercator del mundo. Como allí se ve, los satélites describen una espiral en torno a la Tierra .

### 1.1.2. Sistema de Posicionamiento en Interiores (IPS)

Cubrimos todo acerca del arte, ciencia e historia de construir mapas y cómo, junto con la localización inteligente, están impactando el mundo a nuestro alrededor en nuestros teléfonos inteligentes, en nuestros carros y en el trabajo.

Imaginen los beneficios de conocer su ubicación precisa en los interiores. Podrían llegar a un aeropuerto y consultar una aplicación en el Smartphone que muestre cómo llegar a la puerta de despegue y cuánto tiempo tomaría llegar ahí. La aplicación podría incluso tener en cuentas las colas de seguridad, porque sabe cuánta gente está esperando en la línea.

Los hospitales son edificios idóneos para utilizar este tipo de sistemas de localización y navegación, debido a su tamaño y a sus grandes dimensiones. Entre las ventajas que supondría un IPS de interiores en hospital se encuentran:

**Mejor ubicación.** No tendríamos que preguntar a dónde tenemos que ir, el teléfono se convertiría en nuestra guía.

**Agilidad en la recepción.** No tendríamos que buscar ningún mostrador

para avisar de que llegamos, el propio sistema registra nuestra presencia en el edificio.

**Mayor información.** Obtendríamos todo tipo de información sobre salud, desde videos promocionales hasta consejos, además de opciones de ocio para amenizar nuestra espera.

**Agilizar las visitas.** Al ir de visita podríamos dirigirnos directamente a la habitación de nuestro amigo o familiar.

Estas son sólo algunas de muchas aplicaciones potenciales de la tecnología de localización interior. Pero a diferencia del exterior, donde el teléfono determina la localización a partir de la red de satélites que conforman el GPS, adentro, no hay solución especialmente diseñada. Los sistemas capaces de señalar nuestra ubicación con error de unos cuantos centímetros están en desarrollo, por ahora los servicios de localización requieren un buen aprovechamiento de la tecnología existente.

Un enfoque consiste en imitar la manera en que trabaja el GPS, determinando la posición relativa a las estaciones base de WiFi que se encuentran en los aeropuertos, centros comerciales y salas de conciertos. Si el teléfono puede encontrar tres estaciones base, es posible encontrar nuestra posición usando técnicas de triangulación matemática midiendo la distancia a cada una. No obstante, las estaciones base no fueron construidas para tal aplicación, a diferencia de la red de satélites que conforman el GPS que transmiten señales precisas llamadas códigos de tiempo. En lugar de eso, la triangulación resuelve dónde estamos por la intensidad de las señales WiFi en esa posición.

El inconveniente es que el WiFi usa ondas de radio. En interiores, estas ondas son reflejadas por obstáculos y refractadas alrededor de las esquinas. Las señales WiFi incluso se fugan de edificios circundantes y son afectadas por la gente. Esto significa que la intensidad de la señal cambia constantemente conforme las puertas se abren y cierran y la gente se mueve de un lugar a otro, esa es la razón por la que el WiFi por sí mismo sólo es capaz de determinar nuestra posición 10m a la redonda.

Un método para mejorar la exactitud se llama *huellas dactilares por WiFi*, el cual consiste en usar una aplicación en el teléfono celular para mapear la intensidad de la señal. Al visitar cada habitación de un edificio con el celular, éste registra la intensidad de la señal en esa posición. El mapa de intensidades de la señal es almacenado en el teléfono o en internet y es comparado posteriormente con las señales capturadas en otro momento.

La precisión del método *Huellas dactilares por WiFi* fue mejorada todavía más por WiFiSLAM, una compañía adquirida por Apple en 2013. Usa técnicas matemáticas para calcular las probabilidades de que diferentes intensidades de WiFi ocurran, esto reduce drásticamente los errores debido a fluctuaciones en la señal.



A pesar de lo prometedor de estas tecnologías, otras podrían encontrar más a su favor. Por ejemplo, lámparas de LED montadas en el techo podrían ser programadas para parpadear miles de veces por segundo. Eso es demasiado rápido para el ojo humano pero fácilmente detectable para la cámara de un Smartphone. Si las lámparas de un hotel, sala de conferencias o museo fueran programadas para parpadear a diferentes velocidades, el software en el celular podría saber dónde está parada la persona por la frecuencia de conmutación. Entre más lámparas, mayor es la precisión que se obtiene, típicamente de 1m o menos. Esta forma de enviar información a través de la conmutación a diferentes frecuencias de lámparas se le conoce como comunicación por luz visible o VLC.

Un sistema basado en VLC (Comunicación por Luz Visible) está siendo desarrollado por ByteLight en asociación con GE. Una desventaja para los lugares es que necesitarían instalar el ByteLight equipado con bombillas GE para que el sistema funcione. Un beneficio es que las bombillas incorporan un transmisor Bluetooth inteligente, con el cual las tiendas podrían alertar sobre ofertas especiales incluso si el celular se encuentra en el bolsillo.

ByteLight está lejos de ser la única compañía que trae transmisores Bluetooth inteligentes al posicionamiento en interiores. Apple ha equipado todas sus tiendas minoristas en E.U. con su propia tecnología llamada iBeacons, y ha incorporado el software iBeacons en iOS 7. Los pequeños comerciantes pueden usarlo para enviar noticias, información de productos o cupones a los clientes que los elijan. Los estadios de la liga mayor de Baseball también han instalado transmisores Bluetooth inteligentes para permitir a los fanáticos registrarse cuando llegan al juego para recibir mapas y videos.

## 1.2. Objetivos

En el presente proyecto se pretende localizar dispositivos utilizando la tecnología LiFi en ambientes de interiores ofreciendo una mejor exactitud y precisión en la posición que los sistemas actuales de posicionamiento global.

## 1.3. Justificación

EL GPS ha sido una revolución en la tecnología con diversas aplicaciones en campos como la navegación, el posicionamiento, diseminación de la hora, cartografía, sistemas de guía, topografía, seguridad pública, aviación y muchas otras aplicaciones de investigación. La precisión de un GPS oscila entre los 2 y los 5 metros; sin embargo, a pesar de que no es significativa si se compara con las dimensiones de la Tierra, ésta toma relevancia cuando se trata de ubicar la posición del receptor en un interior ya que las ondas de radio se atenúan demasiado al toparse con barreras como el techo y los muros; además, la posición se vuelve ambigua ya que un error de precisión de 2 metros puede cambiar la habitación o el piso en el que se encuentra el receptor. Dado el problema anterior, este trabajo propone desarrollar un sistema basado en la comunicación con luz visible para obtener dicha posición de forma más exacta por medio de la emisión constante de luz de lámparas monocromáticas LED instaladas en los techos de los interiores.

## 1.4. Planteamiento

En este proyecto se pretende aplicar algoritmos de localización para determinar con una exactitud mayor a los GPS convencionales la posición de un objeto en el interior de una habitación, utilizando para ello un arreglo de tres lámparas colocadas en forma de triángulo sobre el techo de la habitación. Se pretende además que se puedan adatar dispositivos como robots que requieran saber su posición mientras se dirigen de un punto a otro dentro de la habitación.

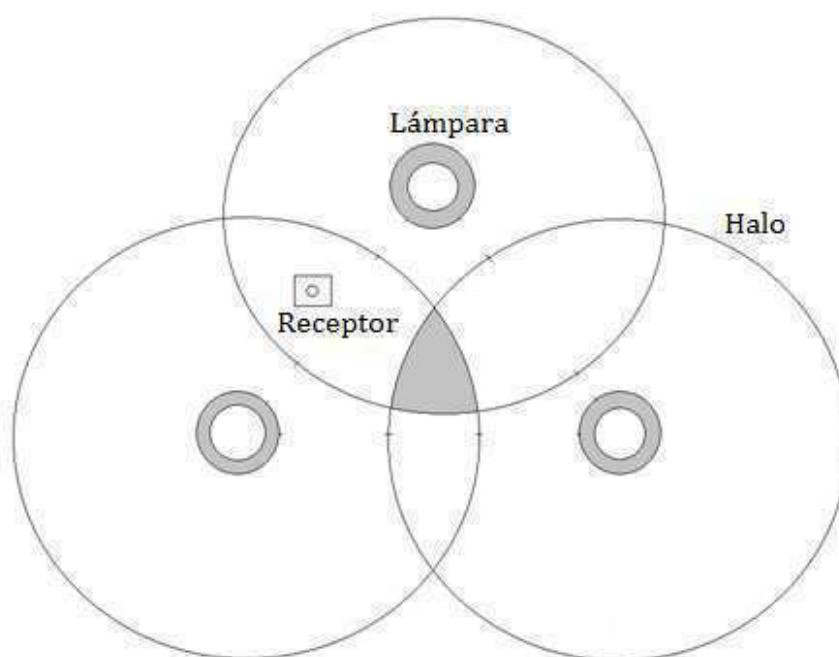


Figura 1.2: Esquema del IPS basado en luz visible.

# Capítulo 2

## Marco teórico

**RESUMEN:** Este apartado ofrece una explicación teórica y detallada de los elementos que serán utilizados a lo largo del proyecto tales como: dispositivos electrónicos, software, aparatos de medición y esquemas de comunicación utilizando luz visible.

### 2.1. Comunicaciones inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas son aquellas que utilizan ondas electromagnéticas para transmitir la información del emisor al receptor. Sus campos de aplicación son muy vastos y abarcan áreas como las telefonías, las redes de área local, los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas de telemetría así como la comunicación con luz visible, entre otras.

#### 2.1.1. Comunicaciones infrarrojas

Estas son basadas en radiación infrarroja (espectro no visible), estas son favorecidas para aplicaciones de corto alcance en las cuales la tasa de bits por enlace y la capacidad total del sistema deben ser maximizadas. Los costos deben ser minimizados, la compatibilidad internacional es requerida, o la complejidad del receptor de señal debe ser minimizada.

La comunicación infrarroja ofrece varias ventajas significantes sobre la radio, por ejemplo:

1. Los emisores y detectores de infrarrojos de alta velocidad tienen un costo reducido.
2. La región espectral infrarroja ofrece un ancho de banda virtualmente ilimitado que no es regulado en todo el mundo.

3. Las comunicaciones infrarrojas están confinadas al cuarto en el cual se originan, lo cual favorece las transmisiones seguras contra casuales espías y previene la interferencia entre enlaces operando en diferentes cuartos.
4. LANs inalámbricas e infrarrojas pueden alcanzar una muy alta capacidad; además, las transmisiones en diferentes cuartos no necesitan coordinarse.

### 2.1.2. Comunicaciones basadas en luz

Las comunicaciones con luz visible son una nueva forma de comunicación que utiliza LEDs para transmitir la información aprovechando la alta velocidad de conmutación de estos dispositivos, así como su bajo precio y consumo de potencia. El principio de funcionamiento de este sistema consiste en definir un 1 lógico cuando el LED está encendido y un 0 lógico cuando está apagado. Sus ventajas incluyen una velocidad de transmisión de varios Mb/s en interiores cuando no hay presencia de barreras físicas.

## 2.2. Comunicación VLC

La comunicación por luz visible se refiere a la comunicación inalámbrica de corto alcance usando luz visible en el espectro de 380 a 780 nm.

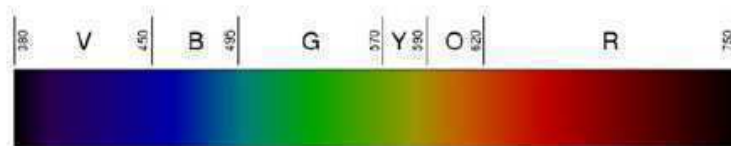


Figura 2.1: Espectro de la luz visible.

En 2011, el profesor Harald Haas de la Universidad de Edimburgo mostró el primer dispositivo que usaba una nueva tecnología denominada Li-Fi, enviando una señal de video a 10 Mbps con una sola bombilla LED.

El IEEE 802.15.7 standard ofrece tres tipos distintos (PHY) para VLC. PHY I opera de 11.67 a 266.6 kb/s, PHY II opera de 1.25 a 96 Mb/s y PHY III opera entre 12 y 96 Mb/s. PHY I y PHY II están definidos para una única fuente de luz y usan la modulación digital de amplitud o manipulación de encendido-apagado o OOK (por sus siglas en inglés, On-Off Keying) y la modulación por posición de pulso variable o VPPM (por sus siglas en inglés, Variable Pulse Position Modulation), PHY III usa múltiples fuentes ópticas

con diferentes frecuencias (colores) y un formato de modulación particular llamado modulación por cambio de color o CSK (Color Shift Keying).

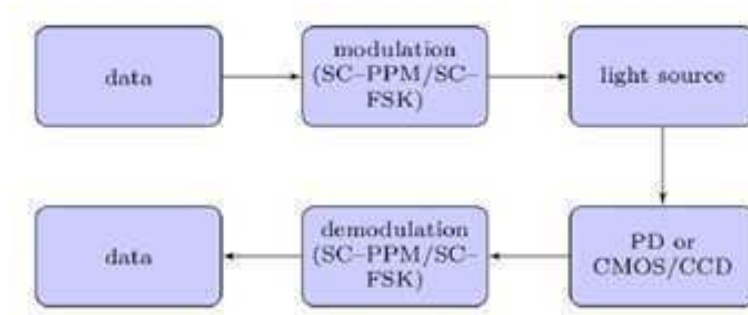


Figura 2.2: Vista esquemática del proceso completo de transmisión y recepción de datos.

### 2.2.1. Modulación OOK

La modulación OOK es el esquema de modulación más simple para VLC, donde los LEDs están encendidos o apagados dependiendo si los bits de datos son 1 o 0. Aunque la modulación es lógicamente de encendido-apagado, el estado de apagado no necesariamente significa que la luz está completamente apagada; más bien, la intensidad de la luz puede simplemente ser reducida tanto como uno pueda distinguir claramente entre los niveles on y off.

## 2.3. Lámpara de LEDS downlight

### 2.3.1. Características

Un downlight led es una lámpara que ilumina desde el techo y proyecta un punto de luz concentrado consiguiendo aislar la luminosidad y evitando que se propague por la habitación y por supuesto que cuente con la tecnología led ya que normalmente este tipo de bombillas utilizan tecnología halógena.

En la implementación del proyecto se usó una lámpara downlight, algunas de las características de este tipo de lámpara son: carcasa de aluminio, voltaje AC110-265 V para interior y con colores que van desde el blanco frío hasta el blanco cálido, LEDs instalados detrás de una cubierta escarchada para lograr una luz sin reflejos, etc. Una lista más detallada de sus características se muestra en la tabla [2-1].

Nombre	ECO LED PANEL ROUND
Color	Blanco
Material	Aluminio/Acrílico
Grosor	3.00 cm
Diámetro	18.00 cm
Máxima Potencia	10 W
Tipo de lámpara	SMD LED
Temperatura de la lámpara	3000 K
Salida de lúmenes	590 lm
Rendimiento de color	80
Clase de eficiencia energética	A

Tabla 2.1: Propiedades de la lámpara LED que fue utilizada.



Figura 2.3: Vista lateral de la lámpara LED.

### 2.3.2. Ventajas

Las bombillas LED cubren con creces las necesidades de cualquier hogar proporcionando ventajas en el ahorro de energía ya que pueden reducir hasta en un 80 % el consumo energético.

La iluminación de una bombilla LED se caracteriza porque dura mucho y consume muy poco. De hecho, se estima que tiene una duración aproximada de 73.000 horas, por lo que pueden llegar a durar hasta 25 años. Además las lámparas LED no contienen ningún elemento tóxico y su funcionamiento conlleva una reducción de calor muy elevada debido a que los LEDs transforman hasta el 98 % de su energía en luz y sólo 2 % en calor.

Otra ventaja que fue de gran utilidad para el proyecto es su rápido tiempo de respuesta a altas frecuencias, lo cual permite utilizar la modulación OOK, sin alterar su intensidad, a una frecuencia de hasta 10 kHz.

## 2.4. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarjeta determinada, como el control de un microondas, un teclado de un ordenador, una impresora, un sistema de alarma, etc. Para esto, el microcontrolador precisa de muy pocos componentes asociados. Un sistema con microcontrolador debe disponer de una memoria donde se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo, de tal manera que una vez programado y configurado sólo sirve para realizar la tarea asignada. La utilización de un microcontrolador en un circuito reduce notablemente el tamaño y el número de componentes y, en consecuencia, disminuye el número de averías, el volumen, el peso y el precio de los equipos, entre otras ventajas.

### 2.4.1. PIC18F4550

Para el presente proyecto se decidió trabajar con el PIC18F4550 debido a la experiencia que se tiene trabajando con él ya que siempre se han obtenido resultados satisfactorios. Este dispositivo cumple con todos los requisitos necesarios para el proyecto tales como: módulo de convertidor analógico digital (ADC) con una resolución de hasta 10 bits, temporizadores configurables como generadores de retardo o contadores de pulsos externos, puertos de E/S de hasta 8 bits analógicos o digitales que permiten comunicarse con dispositivos o señales externas, gran capacidad de almacenamiento de código y memoria RAM suficiente para almacenar las variables.

El PIC18F4550 tiene encapsulado DIP de 40 pines, la figura [2-4] muestra la distribución de sus terminales mientras que la tabla [2-2] explica las terminales que se usaron.



<b>Terminal</b>	<b>Descripción</b>
MCLR/Vpp/RE3	Reset del circuito
RA0/AN0	Entrada, tomar muestras de la señal
RA4/T0CKI/C1OUT/RCV	Entrada, calcular la frecuencia
RE0/AN5/CK1SPP	Salida, Habilitar la LCD
RE1/AN6/CK2SPP	Salida, Modo de la LCD
RE2/AN7/OESPP	Salida, Habilitar escritura en la LCD
VDD	Alimentación a 5V
VSS	Conexión a tierra
RD4/SPP4	Salida, datos a la LCD bit0
RD5/SPP5/P1B	Salida, datos a la LCD bit1
RD6/SPP6/P1C	Salida, datos a la LCD bit2
RD7/SPP7/P1D	Salida, datos a la LCD bit3

RB2/AN8/INT2/VMO	E/S Digital/entrada analógica interrupción externa
RB3/AN9/CCP2/VPO	E/S Digital/entrada analógica módulo PWM/
RB4/AN11/KBI0	E/S Digital/entrada analógica interrupción en cambio de pin
RB5/KBI1/PGM	E/S Digital/interrupción en cambio de pin programación
RB6/KBI2/PGC	E/S Digital/interrupción en cambio de pin programación
RB7/KBI3/PGD	E/S Digital/interrupción en cambio de pin programación

Tabla 2.2: Descripción del PIC18F4550.

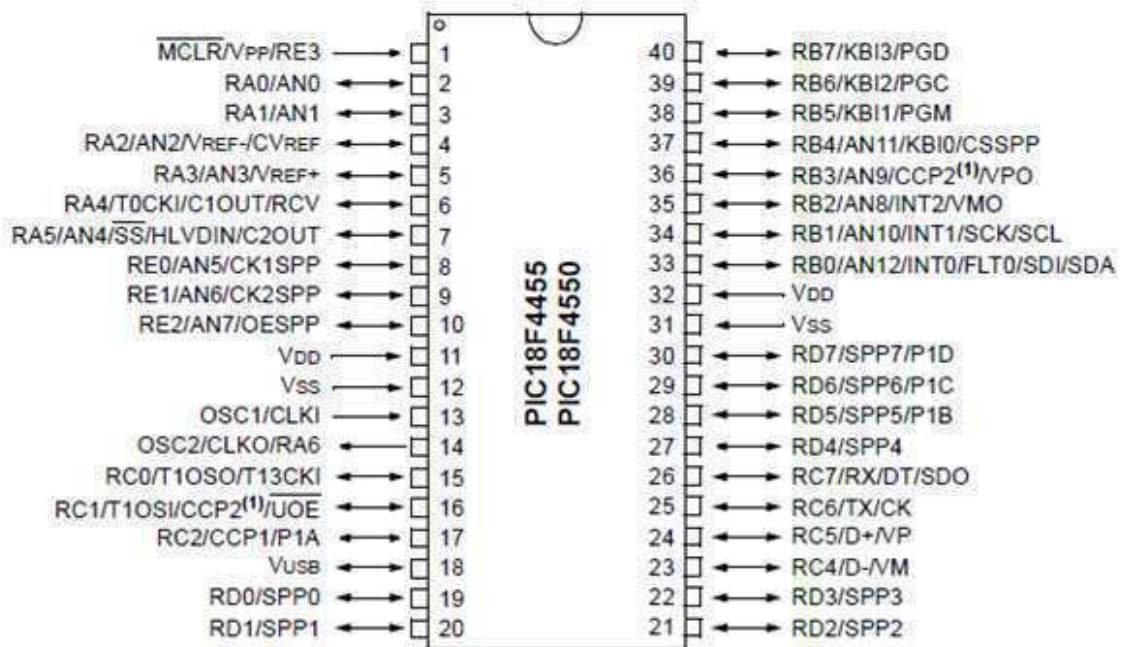


Figura 2.4: Encapsulado del PIC18F4550.

## 2.4.2. Plataforma Pingüino

### 2.4.2.1. Antecedentes

Pingüino es una plataforma de hardware y software de código libre para la experimentación con microcontroladores, similar a arduino pero basada en un microcontrolador PIC18F2550. Esta plataforma cuenta con su propio Entorno de Desarrollo Integrado IDE (por sus siglas en inglés, Integrated Development Enviroment), y la apariencia de este entorno es similar al de Arduino.

El circuito básico del Pingüino es muy simple y sólo se precisan unos pocos componentes; todo el software necesario está disponible para bajarse de internet gratuitamente. Actualmente el software para Pingüino sólo está soportado oficialmente para los sistemas operativos Linux, Windows XP, Windows 7 y MACOSX.

Debido a que el entorno de desarrollo integrado de Pingüino, el cual permite escribir, compilar y grabar los programas, está escrito en Python, es necesario instalar componentes Python para su funcionamiento.

En la figura [2-5] se ilustra una placa Pingüino comercial que utiliza el PIC18F4550.

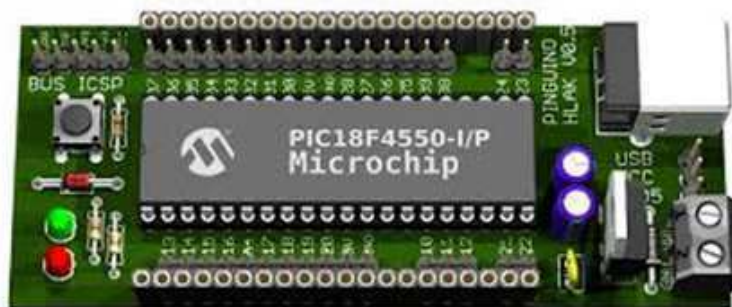


Figura 2.5: Placa Pinguino comercial.

### 2.4.2.2. Ventajas

A diferencia de la placa Arduino, el Pingüino no necesita una Interfaz UART a USB adicional para comunicarse con la PC, debido a que el microcontrolador PIC18F4550 tiene un módulo USB integrado, lo cual le permite comunicarse directamente con la PC y reduce el costo del hardware, dejando además libre el puerto UART del microcontrolador para las aplicaciones.

A pesar de estar todavía en desarrollo, la plataforma promete mucho en cuanto a costo de entrada pues es muy económico, los componentes de la placa son mínimos y relativamente más fáciles de conseguir en Latinoamérica

en comparación con el Arduino.

### 2.4.2.3. Ejemplo de uso

La plataforma Pinguino cuenta con muchas librerías y ejemplos de código que pueden ser utilizados directamente por el usuario. Los códigos de ejemplo son muy ilustrativos y permiten comprender de una mejor manera la programación en esta plataforma. Las instrucciones y la sintaxis que se manejan en esta plataforma son muy simples y están disponibles en los códigos de ejemplo o bien en algunos enlaces de ayuda tales como <http://wiki.pinguino.cc/index.php/Mainpage>.

El entorno de desarrollo utilizado para Pinguino se ilustra en la figura [2-6]. En la misma figura se muestra un ejemplo de código precargado en la carpeta de instalación del compilador; su función es muy sencilla, simplemente apaga y enciende un LED conectado a la terminal número 12 de la tarjeta. Cabe mencionar que la tarjeta en cuestión utiliza el PIC18F4550 y que sus terminales no coinciden con las del microcontrolador, en la figura [2-7] se muestra la numeración de las terminales de la tarjeta.

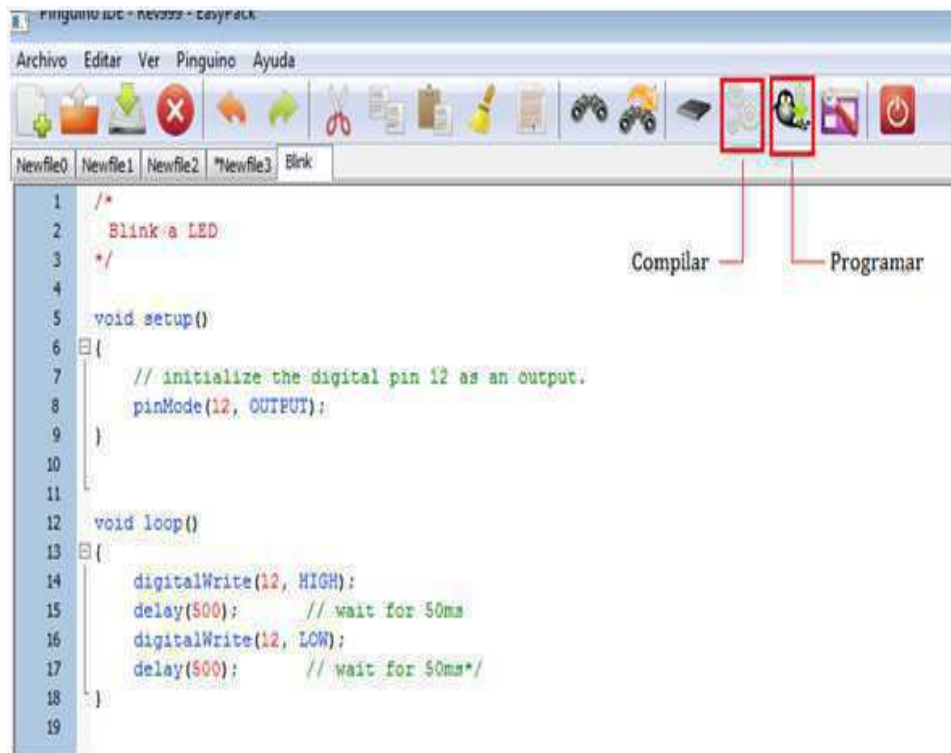


Figura 2.6: Entorno de desarrollo de Pinguino.

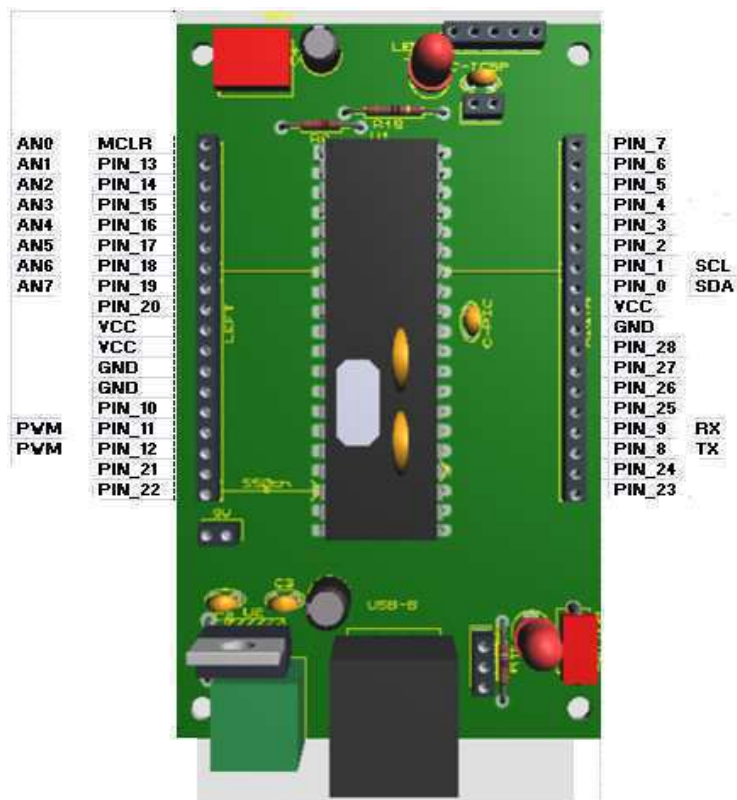


Figura 2.7: Numeración de terminales de la tarjeta Pinguino.

### 2.4.3. Compilador CCS

PIC C Compiler es un inteligente y muy optimizado compilador que contiene operadores estándar del lenguaje C y funciones incorporadas en bibliotecas que son específicas a los registros del PIC, proporcionando a los desarrolladores una herramienta poderosa para el acceso al hardware de las funciones del dispositivo desde el nivel de lenguaje C.

El compilador CCS contiene más de 307 funciones integradas que simplifican el acceso al hardware. Algunas de las características clave del compilador son:

- Fácil migración entre todos los dispositivos PIC de Microchip.
- Minimiza el tiempo de desarrollo con: controladores periféricos construcción C estándar.
- Estilo C++ en la transmisión de Entrada/Salida con formato completo para algunos dispositivos o para cadenas.
- Funciones convenientes como `# bit` y `# byte` permiten a las variables en C ser colocadas en direcciones absolutas.
- El tipo integral de un bit (Short Int) permite al compilador generar código orientado a bits muy eficiente.
- Define, configura y maneja interrupciones fácilmente.

## 2.5. Manejo del luxómetro

El luxómetro es un medidor de precisión para medir lux y FootCandle. El luxómetro sirve para la medición de luz en la industria, la agricultura y la investigación. También se utiliza el luxómetro para determinar la iluminación en puestos de trabajo, decoraciones de escaparates y por parte de diseñadores. El manejo es muy sencillo, lo que permite que el luxómetro sea usado también por personal no-instruido. Sin embargo, siempre es conveniente a la hora de medir la luz tener en cuenta las condiciones previas. Así, se debería fijar la distancia y el ángulo entre el luxómetro y el objeto a medir para obtener resultados con una reproducibilidad alta.

Para la caracterización de la lámpara de LEDs en el cuarto oscuro se utilizó el luxómetro Lutron LX-107 cuyas características se mencionan a continuación.

- Display a LCD con ajuste de contraste.
- Rango: 2000, 20000, 100000 lux.

- Función de valores máximos y mínimos.
- Indicador de sobre rango.
- Temperatura de operación: 0 a 50°C
- Humedad: máx. 80
- Botón de ajuste a cero.
- Función de congelamiento de datos.
- Apagado automático.
- Indicador de batería baja.
- Alimentación: Batería de 9 VDC.
- Panel resistente al agua.



Figura 2.8: Luxómetro.

## 2.6. Fotorreceptores

### 2.6.1. Definición

Un fotorreceptor es un dispositivo que convierte una señal de luz a una señal eléctrica de voltaje o corriente. En muchos fotorreceptores tales como fotodiodos y fotoconductores esta conversión es típicamente lograda por la creación de pares electrón-hueco debida a la absorción de fotones, esto es, la creación de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia.

### 2.6.2. Fotodiodos

El principio de operación del fotodiodo es muy simple, ya que el diodo se polariza inversamente generando una pequeña corriente de oscuridad, la cual fluirá a través del dispositivo.

Existen diferentes tipos de fotodiodos cuyas características varían de acuerdo a sus regiones de dopaje; entre los que se encuentran el fotodiodo de unión pn, el cual es el más común entre los fotodiodos pero a su vez genera corrientes demasiado pequeñas; el fotodiodo pin, el cual es más sensible que el anterior debido a su región de agotamiento más grande; y el fotodiodo de avalancha, éste es el más sensible de los fotorreceptores de estado sólido disponibles, sin embargo presenta desventajas tales como su elevado costo y la necesidad de una complicada circuitería.

### 2.6.3. Fototransistores

Los fototransistores combinan en un mismo dispositivo la detección de luz y la ganancia. Su construcción es similar a la de los transistores convencionales, excepto que la superficie superior se expone a la luz a través de una ventana o lente.

En la figura [2-9] se muestra el símbolo del fototransistor así como su circuito equivalente.

### 2.6.4. Fotorresistencias

Un fotorresistor es un componente que usa un fotoconductor entre dos contactos, de manera que cuando ésta es expuesta a la luz un cambio en la resistencia aparece.

Tomando en cuenta que los diferentes tipos de material usados para resistencias dependientes de la luz son semiconductores, cuando son usados como fotorresistencias, funcionan sólo como elementos resistivos y no hay uniones PN. En conclusión el dispositivo es puramente pasivo.

Hay dos tipos de fotorresistores:





## 2.7. Fotorreceptor con preamplificación

Los fotorreceptores con preamplificación constan comúnmente de un fotodiodo acoplado a una pequeña etapa de amplificación para elevar el rango de voltajes que pueden entregar. Su principal ventaja es que dependiendo de la intensidad de luz que incide sobre ellos es posible eliminar la etapa de amplificación a la que generalmente se conectan antes de digitalizar la señal recibida. Para el presente proyecto se trabajó con un fotorreceptor de este tipo debido a que la distancia entre la lámpara y el receptor es considerable y los fotodiodos comunes no permiten alejar la lámpara más de 20 cm.

### 2.7.1. Fotodiodo S4349 de Hamamatsu

Los fotodiodos *hamamatsu* tienen un amplio rango espectral que cubre desde el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta e incluso regiones de alta energía. Se caracterizan por su rápida respuesta, alta sensibilidad y bajo ruido. Estos fotodiodos son utilizados en un amplio rango de aplicaciones que incluyen campos médicos y analíticos, mediciones científicas, comunicaciones ópticas y productos electrónicos en general. Su rango espectral varía y su empaquetamiento puede presentarse en diferentes versiones como: metálico, cerámico, plástico, así como de montaje superficial.

## Capítulo 3

# Diseño e Implementación

**RESUMEN:** A continuación se muestran los principios de funcionamiento del sistema transmisor y receptor, los diagramas de conexión de los mismos y el funcionamiento de las distintas etapas que los componen. Se ofrece también una explicación acerca de la caracterización de la lámpara, sus objetivos y resultados.

### 3.1. Transmisión

#### 3.1.1. Principio

La transmisión se hará por medio de la tarjeta Pingüino y su principio es el siguiente.

Dado que el elemento transmisor del sistema va encender y apagar tres lámparas simultáneamente a tres frecuencias distintas, es necesario que el código genere tres señales cuadradas cada una por una terminal distinta de la tarjeta.

La manera más sencilla de generarlas es utilizando un contador infinito de 8 bits y tomando los 3 bits menos significativos ya que son los de más alta frecuencia. Este método es también muy práctico ya que las frecuencias generadas están en fase y son múltiplos de la frecuencia más pequeña.

Una ilustración de este método se muestra en la figura [3-1].

#### 3.1.2. Código del transmisor

En la figura [3-2] se observa una captura de pantalla del código mostrando la simplicidad que caracteriza tanto al entorno Pingüino como al código en sí.

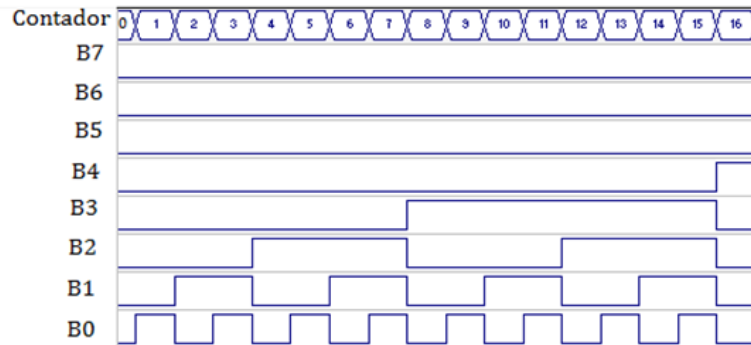


Figura 3.1: Contador desglosado en sus 8 bits, se observan las señales en fase y en múltiplos del bit B0.

```

1
2 char count=0;           //contador
3 void setup()           //configuracion
4 {
5     pinMode(12, OUTPUT); //pin 10,11 y 12 como salidas
6     pinMode(11,OUTPUT);
7     pinMode(10,OUTPUT);
8     TRISB=0x00;         //puerto B como salidas
9 }
10 /*implementar un contador,
11 tomar los ultimos 3 bits y
12 sacar cada uno por una terminal diferente*/
13 void loop()            //ciclo infinito
14 {
15     count++;           //incremento del contador
16     PORTB=count;      //salida por el puerto B
17     delayMicroseconds(68); //retardo
18 }

```

Figura 3.2: Código del transmisor.

### 3.1.3. Diseño del transmisor

El transmisor necesita tres transistores para poder acoplar las señales digitales provenientes de la tarjeta Pingüino con las lámparas de LEDs, que manejan un voltaje nominal de 24 V y necesitan aproximadamente 360 mA para funcionar correctamente.

El transistor que se utilizó es el IRF510, el cual es un transistor MOSFET cuyas características eléctricas son idóneas para la aplicación ya que tiene voltajes de ruptura muy altos, alta impedancia de entrada, baja capacitancia de entrada y altas velocidades de conmutación.

Una lista más detallada de sus características se muestra en la tabla [3-1].

Parámetro	Min	Max	Typ	Unit
Voltaje de ruptura Drenaje-Fuente	100			V
Capacitancia de entrada		150		pF
Retardo de encendido		20		ns
Tiempo de subida		25		ns
Retardo de apagado		25		ns
Tiempo de bajada		20		ns

Tabla 3.1: Características eléctricas IRF510.

### 3.1.4. Impresión de la PCB

En la figura [3-3] se muestra la forma en que se conectan los transistores a las lámparas, como se puede observar la conexión es muy sencilla y no requiere dispositivos adicionales, lo que le permite minimizar el tamaño de la PCB de manera considerable.

Para el diseño del circuito impreso se utilizó el Software Ares-Proteus. El circuito diseñado se muestra en la figura [3-4] y el prototipo impreso en la figura [3-5].

En el prototipo terminado se observan dos tiras de pines colocadas en lados opuestos del circuito, éstas sirven para conectar el transmisor a la tarjeta Pingüino a manera de *Shield de Arduino*.

## 3.2. Caracterización

### 3.2.1. Objetivo

El objetivo de caracterizar la lámpara de LEDs es observar la variación en las mediciones que son capturadas con el luxómetro a medida que se modifican algunas variables tales como la iluminación de la habitación, la distancia

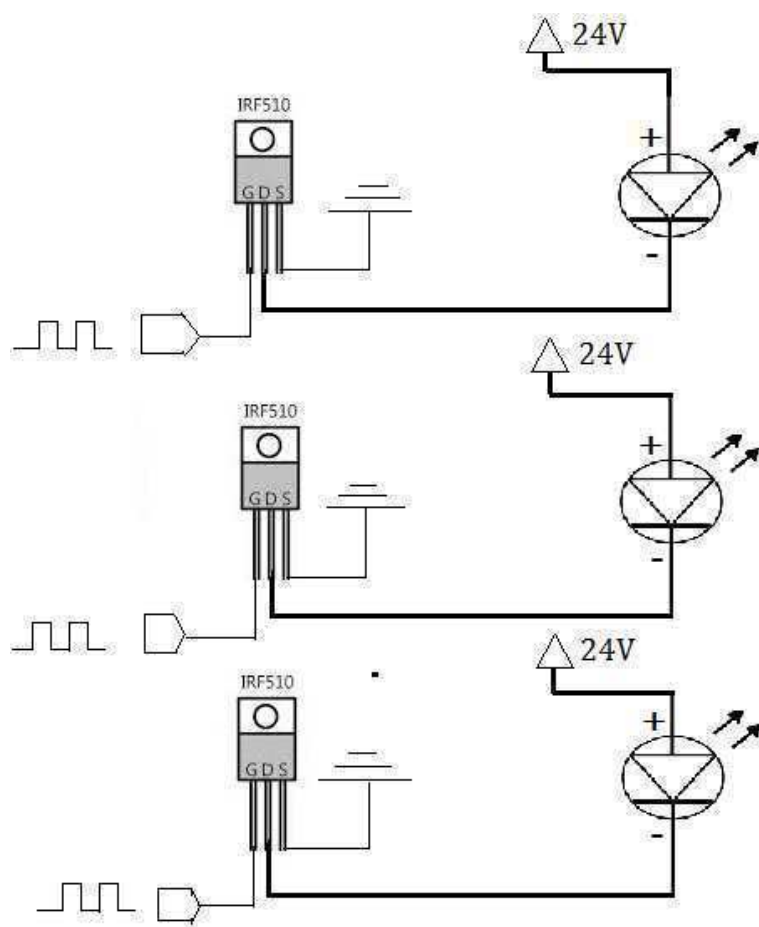


Figura 3.3: Diagrama del transmisor.

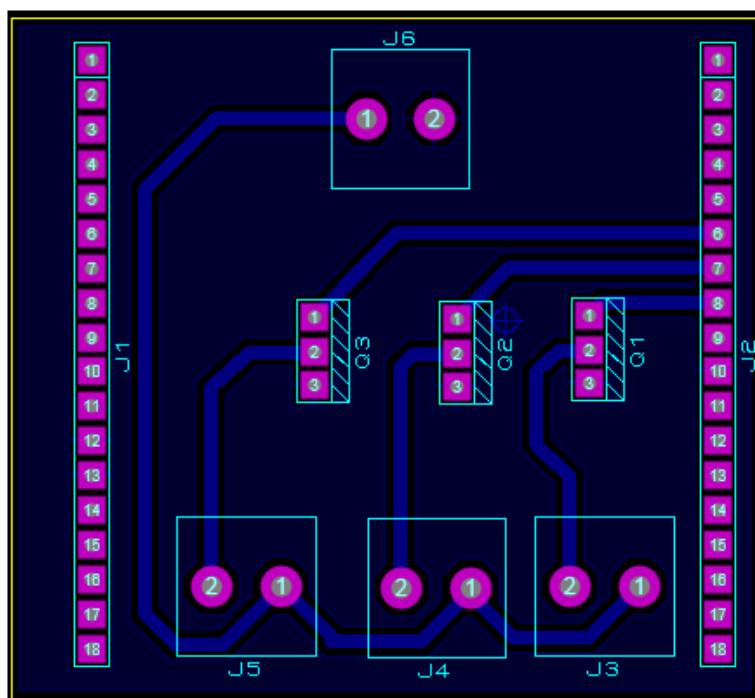


Figura 3.4: Diseño del circuito.

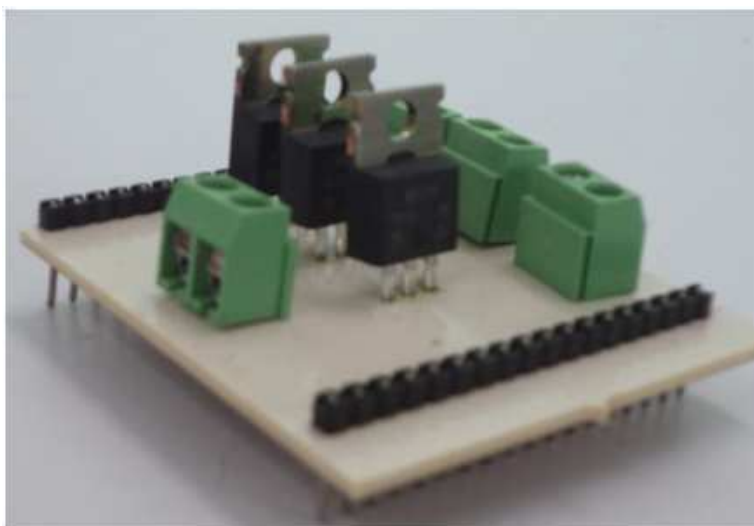


Figura 3.5: Prototipo terminado.

entre el luxómetro y la lámpara, así como la frecuencia de conmutación de la lámpara que va desde 1 kHz hasta 15 kHz.

### 3.2.2. Resultados

En la tabla 3-2 se muestran algunas mediciones hechas cuando el luxómetro se colocó a 3 m de distancia de la lámpara, la cual se instaló previamente en el techo de la habitación. La lámpara se enciende y se apaga a una frecuencia que va desde 3000 Hz hasta 10 kHz. Se observa que hay una dependencia entre la frecuencia de conmutación con respecto a la luz que se recibe. En un principio, cuando la frecuencia comienza a incrementarse, sólo se observan fluctuaciones en los Luxes que se reciben; pero cuando la frecuencia llega a su valor máximo de 10 kHz, se puede apreciar que la intensidad de la luz disminuye considerablemente. En las figuras [3-6] y [3-7] se muestra una gráfica con el comportamiento de ambas mediciones; el cual, tiene su fundamento en el tiempo de respuesta de los LEDS que constituyen la lámpara.

### 3.2.3. Conclusiones

De acuerdo con las observaciones anteriores, se concluye que para el proyecto del sistema de posicionamiento en interiores utilizando modulación OOK se deben utilizar frecuencias menores a 10 kHz para que las lámparas no pierdan su principal funcionalidad que es iluminar.

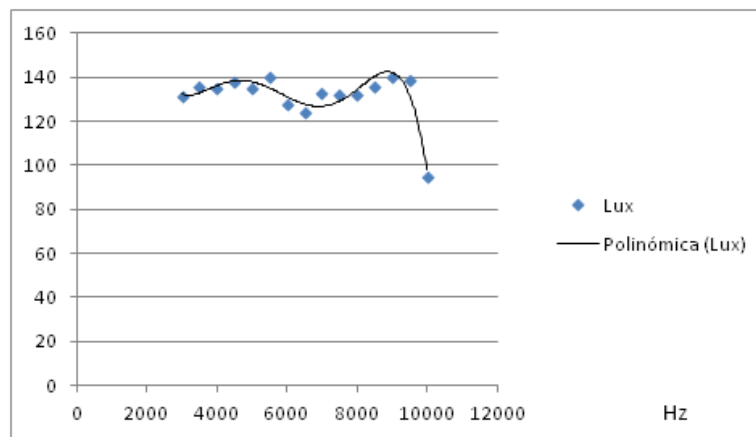


Figura 3.6: Comportamiento de la intensidad de la luz a 3m de distancia.



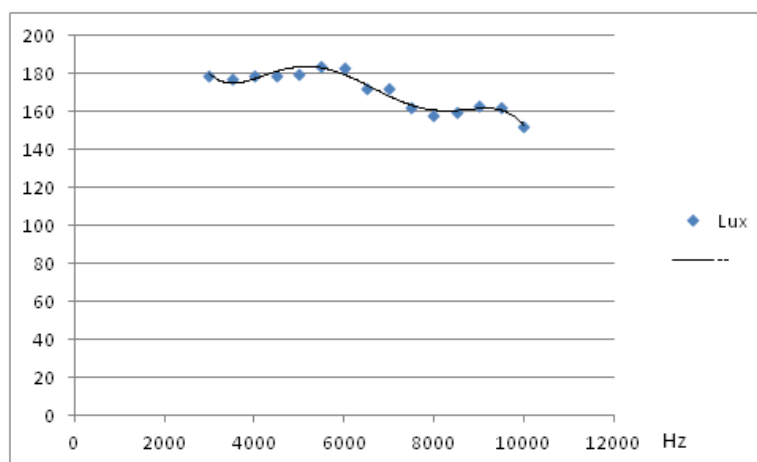


Figura 3.7: Comportamiento de la intensidad de la luz a 1.5m de distancia.

Frecuencia(Hz)	Intensidad a 3m(Lux)	Intensidad a 1.5m(Lux)
3000	131	179
3500	136	177
4000	135	179
4500	138	179
5000	135	180
5500	140	184
6000	128	183
6500	124	172
7000	133	172
7500	132	162
8000	132	158
8500	136	160
9000	140	163
9500	139	162
10000	95	152

Tabla 3.2: Mediciones de intensidad.

### 3.3. Diseño del receptor

El circuito receptor consta de varias etapas: Fotorrecepción, Filtrado, Amplificación y Digitalización. Cada una de ellas será explicada detalladamente en las secciones subsecuentes.

#### 3.3.1. Etapa de fotorrecepción

Esta es la etapa más importante del circuito ya que el fotorreceptor debe alcanzar a recibir la luz de las lámparas de LEDs colocadas a tres metros de altura y bajo la influencia de otras fuentes de luz externas.

El fotorreceptor con preamplificación por sí solo no puede hacer esto ya que la luz se dispersa demasiado conforme aumenta la distancia entre el receptor y las lámparas, para corregirlo se usa el fotorreceptor con lente acoplada de manera que la luz se concentra y se puede detectar a mayores distancias. La conexión del fotorreceptor es muy simple, tan sólo se polariza en forma inversa y se conecta en serie con una resistencia para obtener un voltaje de salida.

En la figura [3-7] se muestra esta conexión.

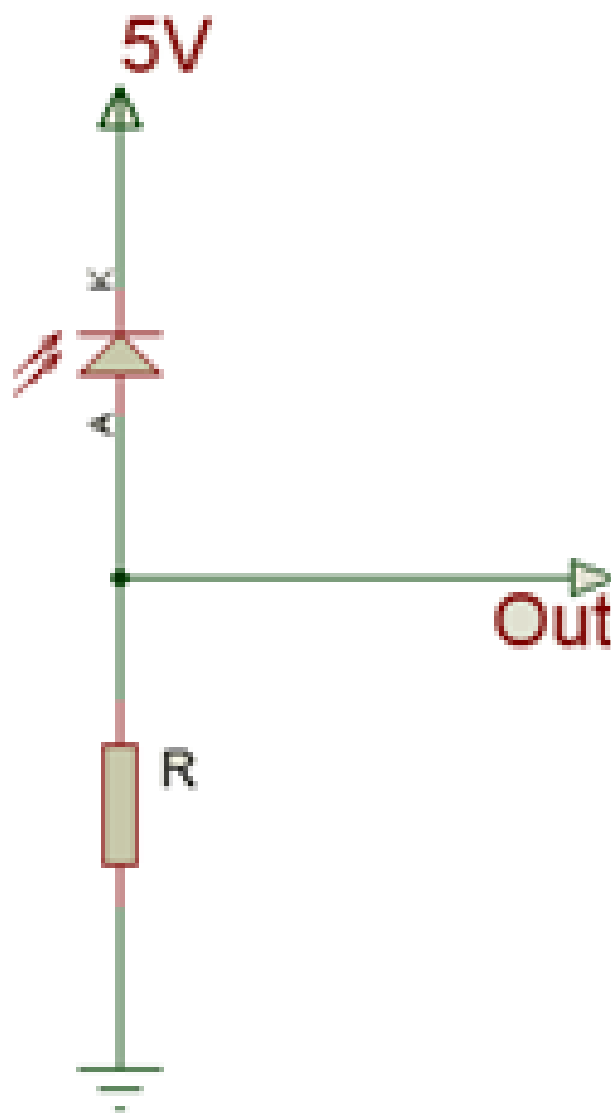


Figura 3.8: Conexión del fotorreceptor.

### 3.3.2. Etapa de filtrado

Dado que las lámparas de LEDs no son la única fuente de luz en la habitación es necesaria una etapa de filtrado para eliminar el ruido que inducen las lámparas fluorescentes colocadas en otros puntos del cuarto. La iluminación del sol es otra variable que es necesario eliminar ya que cambia constantemente a lo largo del día dependiendo de la hora y de las condiciones meteorológicas.

El filtro que se implementa es un filtro analógico pasivo del tipo Pasa-Altas. Las lámparas fluorescentes oscilan a 120 Hz, es decir, el doble de la frecuencia de la terminal eléctrica, por lo que la frecuencia de corte del filtro debe ser mayor a ese valor para que se garantice una correcta supresión de la frecuencia. La luz solar en cambio sólo agrega un voltaje de offset a la salida del fotorreceptor; por lo tanto, no es necesario agregar más filtros ya que el mismo filtro Pasa-Altas elimina las frecuencias de 0 Hz o de voltaje continuo. En la figura [3-8] se muestra el diagrama del filtro Pasa-Altas.

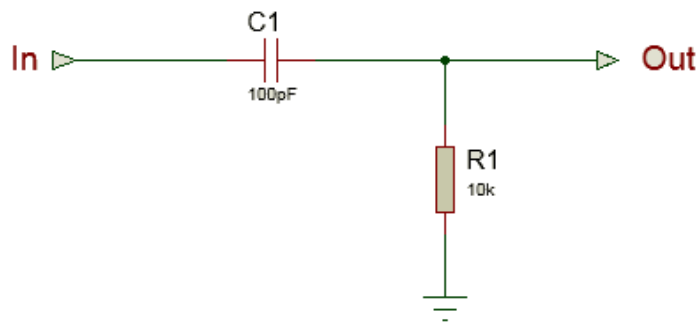


Figura 3.9: Filtro Pasa-Altas.

En el diagrama se observa que se eligió un capacitor de 100 pF y una resistencia de 10K. En la ecuación 1 se obtiene el valor de la frecuencia de corte para estos parámetros.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(10000\Omega)(100 \times 10^{-9})F} = 159,15Hz \quad (3.1)$$

Como se puede observar la frecuencia de corte es suficientemente mayor a la frecuencia indeseada, por lo tanto el filtro está bien diseñado.

### 3.3.3. Etapa de amplificación

En esta etapa se amplifican los voltajes que entrega el fotorreceptor generalmente en el orden de los miliVolts para obtener valores en el orden de

Volts.

Dado que se tienen que amplificar voltajes pequeños es necesario utilizar un amplificador de instrumentación debido a su excelente exactitud, alto Rechazo en Modo Común (CMR) y bajo voltaje de offset.

Para este propósito se decidió utilizar el INA128P, el cual tiene un diseño de 3 OPAMP y cuenta con dos terminales para conectar una resistencia externa y controlar la ganancia. Su diagrama interno así como la ecuación de su ganancia se muestra en la figura [3-9].

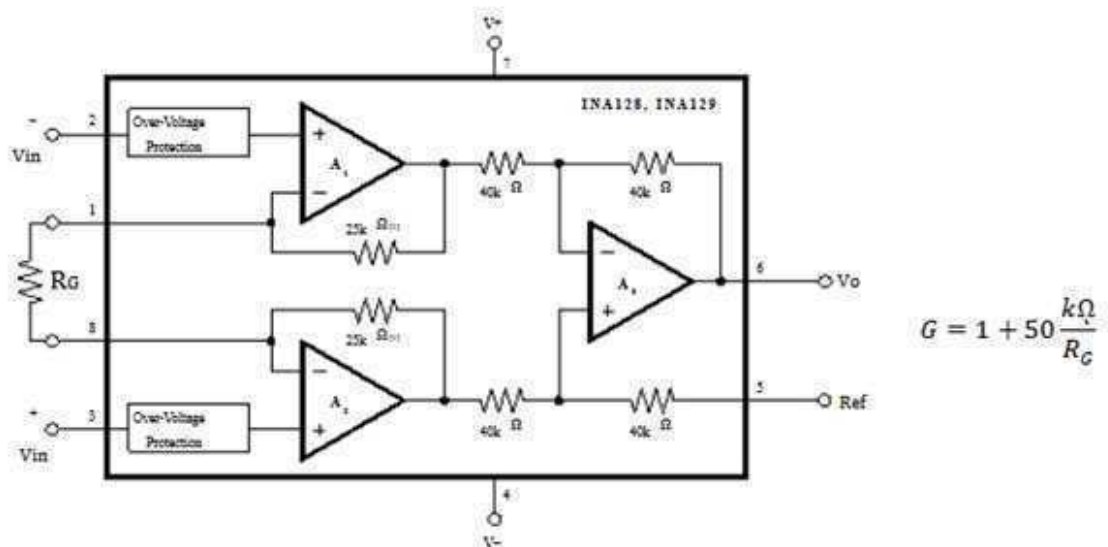


Figura 3.10: Diagrama interno del INA128P.

### 3.3.3.1. Amplificación

El voltaje que se va amplificar se conecta a la terminal 3 o  $V_{in+}$  del INA128P, mientras que la terminal  $V_{in-}$  puede conectarse a tierra o algún divisor de voltaje para regular la diferencia de potencial que se amplifica. La terminal de referencia se conecta siempre a tierra y, por último, el voltaje de salida se obtiene directamente de la terminal 6, la cual se suele aterrizar con una resistencia en caso de que no haya más etapas posteriores.

### 3.3.3.2. Control de offset

En algunas ocasiones la intensidad luminosa de algunas fuentes externas puede ser de tal magnitud que el amplificador de instrumentación puede llegar saturarse perdiendo su funcionalidad e inutilizando todo el sistema, para evitar esto es necesario conectar un divisor de tensión a través de un

potenciómetro a la entrada negativa del amplificador, de manera que en condiciones de alta luminosidad es posible aumentar el voltaje de la terminal negativa disminuyendo la diferencia de potencial que se amplifica y, en consecuencia, evitando la saturación.

En la figura [3-11] se muestra la conexión del amplificador con el divisor de tensión.

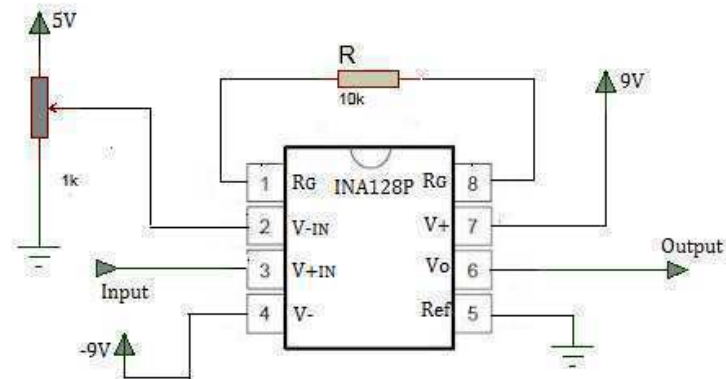


Figura 3.11: Conexión del INA128P.

### 3.3.4. Etapa de digitalización

Una vez que la señal proveniente de las lámparas tiene un voltaje pico de unos cuantos volts variando entre tensiones positivas y negativas, es necesario convertirla en una señal TTL que pueda ser leída por un dispositivo electrónico digital como el microcontrolador.

Este proceso se conoce como digitalización y consiste en obtener una señal cuadrada a partir de la señal recibida. Debido a que la señal original no contiene offset tiene tensiones tanto positivas como negativas, de tal manera que las tensiones mayores a 0V representan un **1** lógico y las tensiones menores a 0V representan un **0** lógico.

Antes de proseguir con la digitalización se explicará un poco acerca de los comparadores ya que son el corazón de esta etapa.

La función de un comparador de voltaje consiste en comparar el voltaje  $V_p$  en una de sus entradas con el voltaje  $V_N$  de la otra entrada, y obtener como salida ya sea un voltaje bajo  $V_{OL}$  o un voltaje alto  $V_{OH}$  de acuerdo con

$$V_O = V_{OL} \quad \text{para} \quad V_p < V_N \quad (3.2)$$

$$V_O = V_{OH} \quad \text{para} \quad V_P > V_N \quad (3.3)$$

La figura [3-12] ilustra las ecuaciones anteriores.

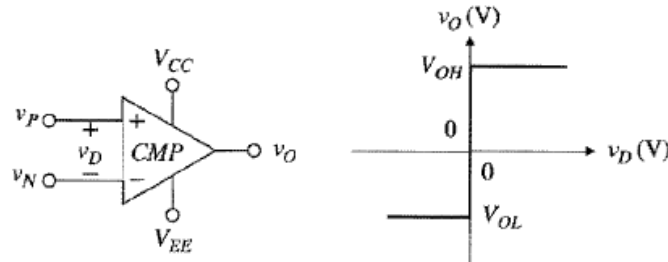


Figura 3.12: Simbolismo del comparador de voltaje y curva de la salida.

Se observa que mientras  $V_P$  y  $V_N$  son variables analógicas debido a que pueden asumir un conjunto continuo de valores,  $V_O$  es una variable binaria debido a que únicamente puede asumir uno de dos valores,  $V_{OL}$  o  $V_{OH}$ . Fuera del origen, la señal de salida consiste en dos líneas horizontales ubicadas en  $V_O = V_{OL}$  y  $V_O = V_{OH}$ . Estos niveles no deben, necesariamente, ser simétricos; no obstante, la simetría es deseable en ciertas aplicaciones. Lo más importante es que los niveles estén lo suficientemente separados para hacer posible su distinción. Por ejemplo, las aplicaciones digitales requieren que  $V_{OL} = 0V$  y que  $V_{OH} = 5V$ . Cuando la velocidad no es crítica, un amplificador operacional se puede convertir en un excelente comparador, en especial en vista de las ganancias extremadamente altas y de los bajos desvíos de entrada disponibles en muchos tipos comunes de amplificadores operacionales. El circuito de la figura [3-13] utiliza un amp op para comparar  $V_{in}$  con algún umbral de voltaje,  $V_T$ . Cuando  $V_{in} < V_T$  el circuito proporciona  $V_O = -V_{sat}$ , y cuando  $V_{in} > V_T$  proporciona  $V_O = +V_{sat}$ . Es importante señalar que cuando el amplificador operacional se usa como un comparador, éste no tiene control sobre  $V_N$  debido a la ausencia de retroalimentación. El amplificador ahora opera en modo de lazo abierto y, en virtud de su ganancia extremadamente alta, pasa la mayor parte de su tiempo en saturación.

Una vez que se ha explicado el funcionamiento del comparador se procede con su utilización para digitalizar la señal recibida. Para obtener una señal TTL, la alimentación positiva del amplificador debe conectarse a 5V y la alimentación negativa a 0V de manera que la salida se alterna entre esos dos valores. Dado que la señal de entrada debe compararse con 0V, la referencia correspondiente a la terminal inversora (V-) se conecta a tierra. En la figura [3-14] se muestra la conexión.

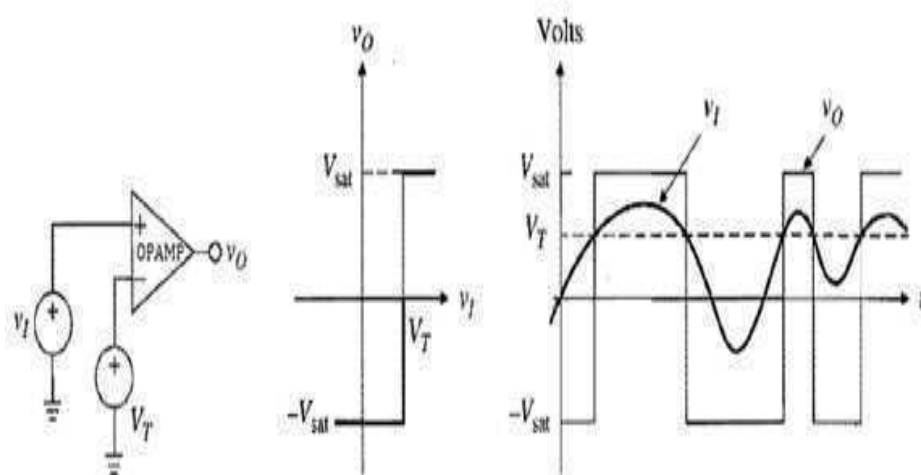


Figura 3.13: Detector de umbral.

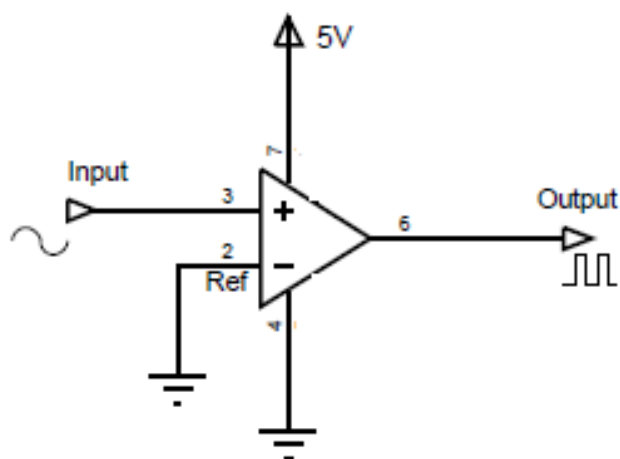


Figura 3.14: Comparador como detector de cruce por cero.



### 3.3.4.1. Primera etapa del receptor en PCB

La primera etapa del circuito impreso para el receptor consiste en unir todas las etapas anteriores con el objetivo de captar las señales provenientes de las lámparas y observarlas en el osciloscopio, esto permitirá observar su comportamiento en distintos puntos y a diferentes ángulos para plantear la solución final que consiste en determinar la ubicación del receptor. La conexión de todas las etapas se muestra en la figura [3-15].

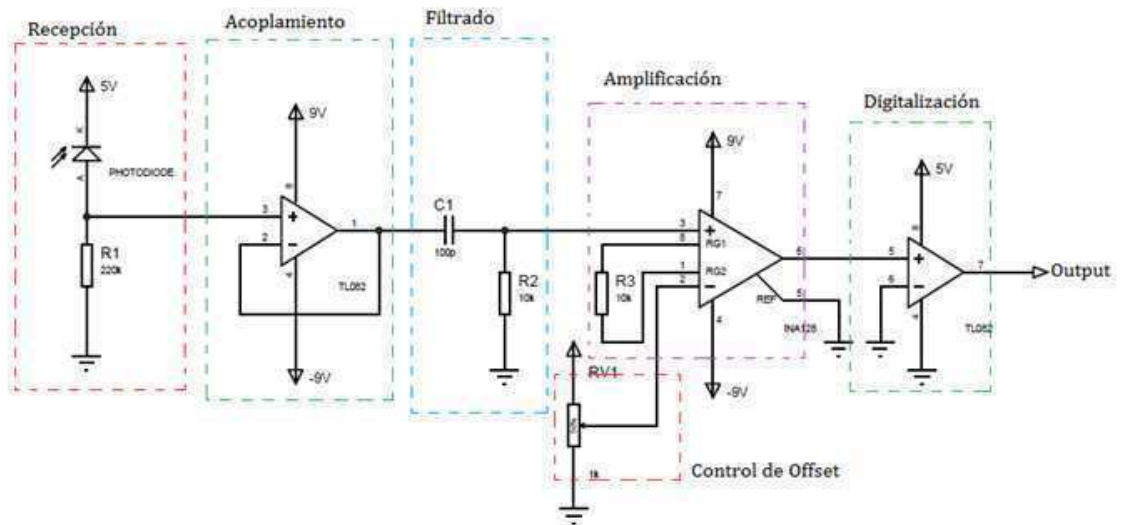


Figura 3.15: Primera etapa del receptor.

La única etapa que no se expuso fue la de acoplamiento debido a su simplicidad, ésta tiene como finalidad acoplar la etapa de recepción y la de filtrado para evitar caídas de voltaje y pérdida de la señal. Se observa el uso del circuito integrado TL082 en dos etapas del receptor, esto debido a que es un circuito que mantiene un equilibrio entre calidad y costo, sus aplicaciones como amplificador y comparador arrojan resultados satisfactorios.

Para el diseño en PCB del circuito se dispuso del Software de diseño y simulación Ares-Proteus debido a la facilidad que ofrece para simular circuitos, la disponibilidad de gran cantidad de librerías y el entorno de desarrollo muy intuitivo y práctico que maneja.

En la figura [3-16] se muestra el diseño del circuito impreso, mientras que en la figura [3-17] se muestra el prototipo terminado.

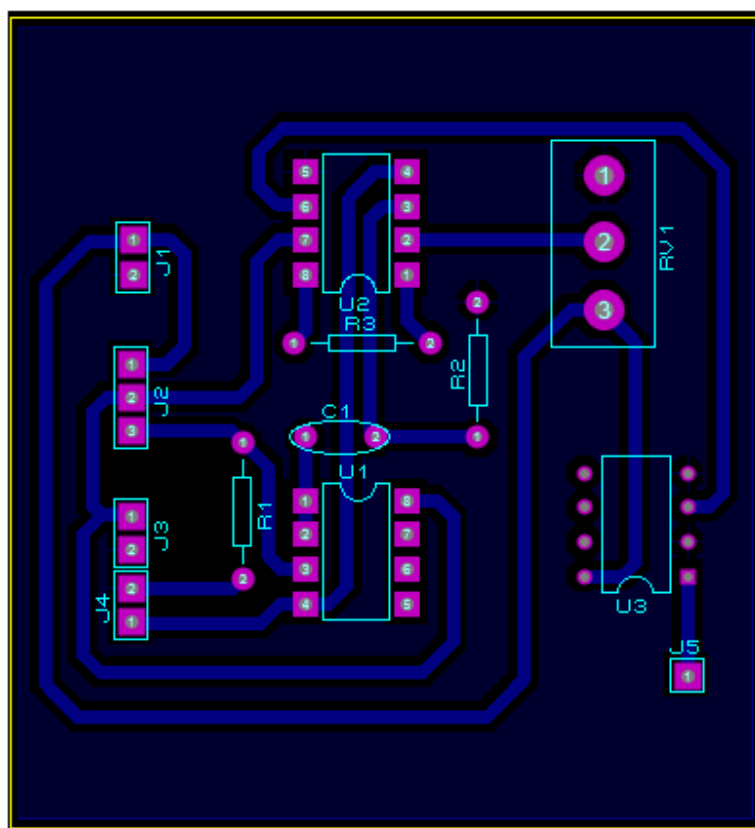


Figura 3.16: Diseño de la PCB.

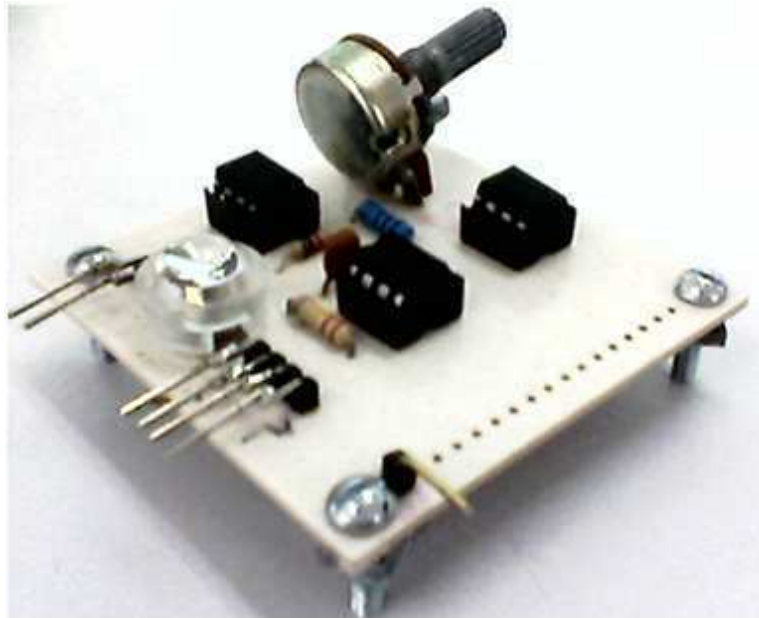


Figura 3.17: Prototipo Impreso.

## Capítulo 4

# Pruebas y Resultados

**RESUMEN:** En este capítulo se exponen los resultados obtenidos al hacer pruebas de fotorrecepción con varias lámparas. Se muestran las señales obtenidas en puntos de interferencia de los halos y se plantea la solución para determinar la posición con base en las características de las señales.

### 4.1. Prueba con una lámpara

Una vez que se tienen los prototipos impresos tanto del transmisor como del receptor se puede iniciar con las pruebas de recepción para evaluar sobre todo la efectividad del fotorreceptor ya que se trabajará en un ambiente no controlado y propenso de variaciones en la iluminación debida a la luz solar.

La lámpara se coloca en uno de los plafones de la habitación y el receptor se coloca en el suelo de tal modo que se tiene la máxima distancia entre ambos, aproximadamente 3 m.

A través de una extensión eléctrica la lámpara se conecta al transmisor, el cual se encuentra en otro punto de la habitación donde puede ser fácilmente programado.

A través de la modulación OOK (on-off keying) la lámpara se enciende y apaga a una frecuencia entre 1 y 10 kHz de manera que esas transiciones resultan imperceptibles para el ojo humano.

En la figura [4-1] se muestra la forma de onda recibida cuando el receptor se coloca debajo de la lámpara.

Se observa que la frecuencia a la que parpadea la lámpara es de aproximadamente 4 kHz y que la señal a la salida del receptor oscila entre 0 y 5.79V. El voltaje pico a pico es muy próximo al de una señal TTL pura por lo tanto no habrá conflicto al momento de hacer la adquisición con el microcontrolador.

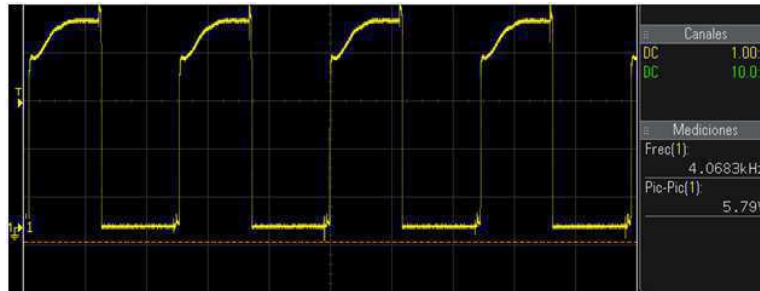


Figura 4.1: Señal proveniente de la lámpara.

Otro punto importante es que el ciclo de trabajo de la señal es del 50 %; sin embargo, esta cualidad solo se cumple en áreas cercanas al eje de iluminación. Experimentalmente se comprobó que aproximadamente a una distancia 1.10 m del centro del halo de la lámpara la señal se empieza a deformar de tal manera que deja de coincidir con la señal que se envía a través del transmisor. Este efecto se puede apreciar en la figura [4-2].

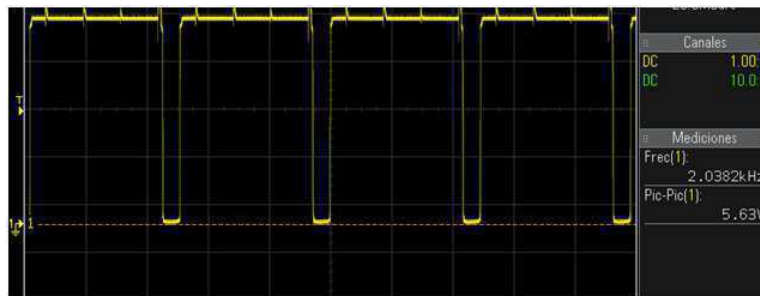


Figura 4.2: Deformación de la señal al alejar el receptor 1.10 m del centro del halo.

Como se puede observar en la figura, la frecuencia se ha reducido a la mitad y el ciclo de trabajo que era del 50 % ahora es del 90 %. Con lo anterior se puede concluir que la señal transmitida se recibe correctamente siempre y cuando el receptor se encuentre dentro del halo de la lámpara, es decir, a no más de 1.10 m de distancia del centro.

## 4.2. Prueba con tres lámparas

Ahora que ya se sabe el radio funcional del halo de una lámpara se procede a colocar las tres en el techo y formando un triángulo entre sí con el objetivo de definir una cierta área sobre la que habrá interferencia entre los halos, ya sea entre sólo dos lámparas o entre las tres.

Este tipo de interferencias es lo que va permitir determinar la posición del receptor ya que dependiendo de su ubicación el patrón de interferencia va cambiar.

En la figura [4-3] se muestra una vista superior de este acomodo así como las longitudes de los lados del triángulo que se forma.

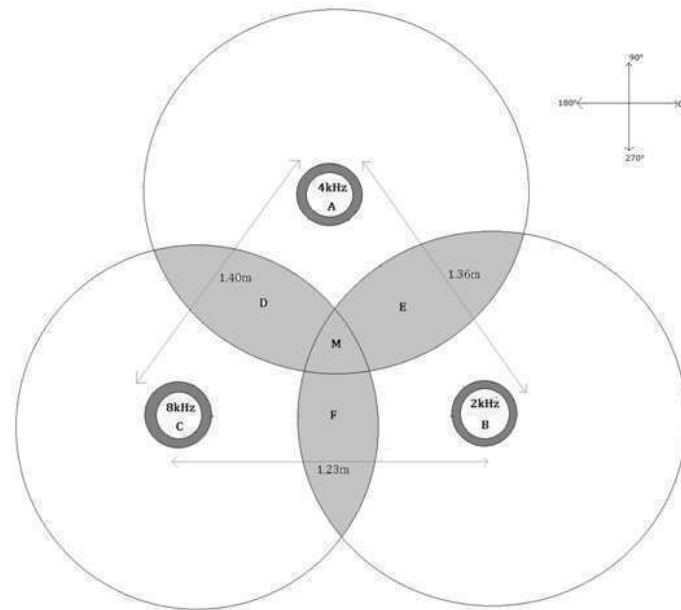


Figura 4.3: Triangulación de la luz.

Se observa que cada lámpara parpadea a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia más pequeña.

Para identificar diferentes puntos dentro del triángulo se les han asignado letras a distintas posiciones dentro del área tales como el centro de cada lámpara (A B C), las intersecciones entre pares de halos (D E F) y la intersección de los tres halos correspondiente al punto M.

La sección del área alrededor de las lámparas donde no hay intersecciones no permite detectar cambios en la posición ya que la frecuencia recibida es siempre la misma y, al no haber interacción con otros halos, la forma de onda se mantiene siempre constante. Lo anterior significa un error bastante grande en comparación con la longitud del triángulo, pero razonable en comparación a los GPS convencionales ya que hablamos de un error de menos de 1 metro.

#### 4.2.1. Recepción en distintos puntos

Si se coloca el receptor en cada uno de los puntos marcados en la figura [4-4] se obtienen distintas formas de onda que dependen de los elementos que

intervienen. Por ejemplo, al colocar el receptor en los puntos A B y C se obtienen formas de onda con un ciclo de trabajo del 50 % ya que se ubica justo debajo de cada lámpara; en cambio, cuando el receptor se coloca en cualquiera de los puntos D, E, F o M se presenta un patrón de interferencia que genera una señal ya sea con un ciclo de trabajo distinto, o bien, compuesta por una serie de pulsos con diferente ancho de pulso.

Las figuras [4-4], [4-5] y [4-6] muestran tres formas de onda correspondientes a tres ubicaciones distintas.

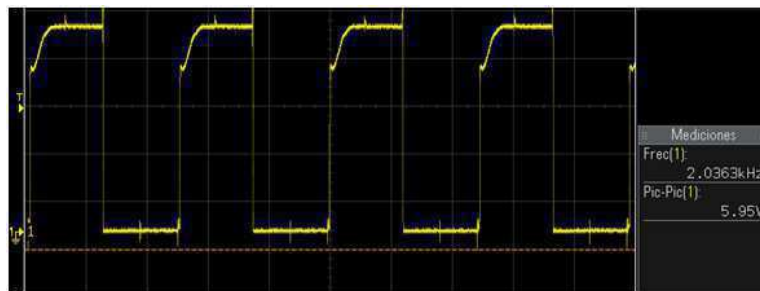


Figura 4.4: Señal capturada en el punto B.

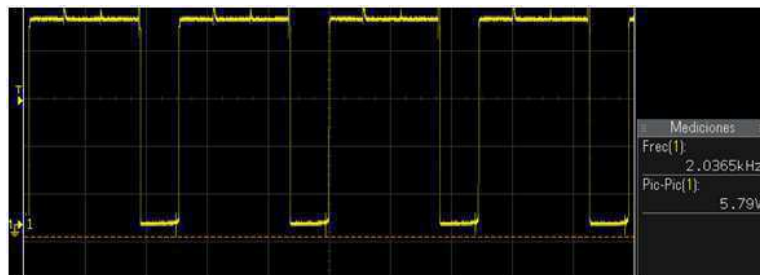


Figura 4.5: Señal capturada en el punto E.

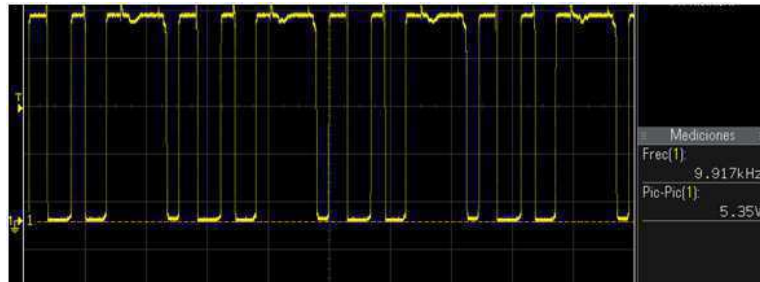


Figura 4.6: Señal capturada en el punto M.

#### 4.2.2. Recepción en distintos ángulos

A pesar de que la ubicación del receptor dentro del área de las tres lámparas determina la forma de onda de la señal recibida, ésta no es la única que interviene ya que debido a la gran sensibilidad que tiene la lente del fotorreceptor así como a las irregularidades de las superficies como el suelo y el techo, la señal recibida se ve modificada al rotar el receptor. Sin embargo, esto sólo sucede en zonas de interferencia, si el receptor se coloca en los puntos A,B y C, justo debajo de cada lámpara, la señal recibida no cambia aunque el receptor se rote, esto debido a que está recibiendo casi toda la luz de una sola lámpara y la colaboración de las demás es despreciable.

En las figuras [4-7], [4-8] y [4-9] se muestran tres formas de onda capturadas en el punto M pero con distintos ángulos. Se eligió el punto M debido a que es la zona de mayor interferencia.

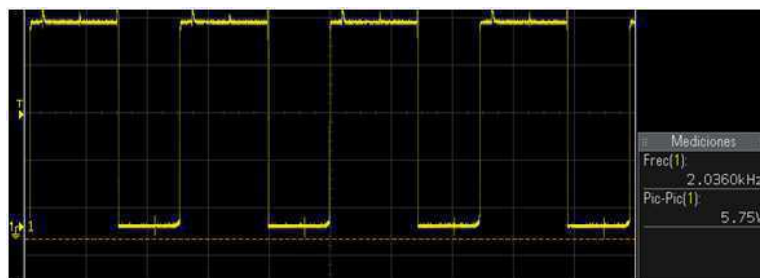
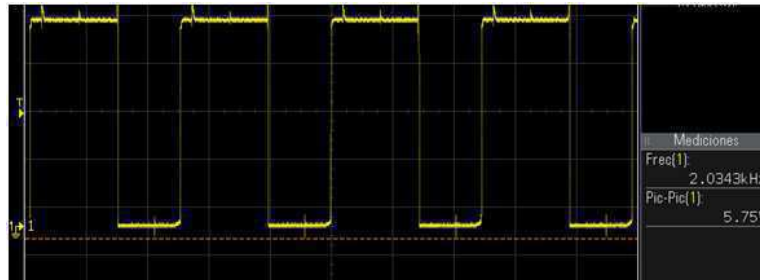
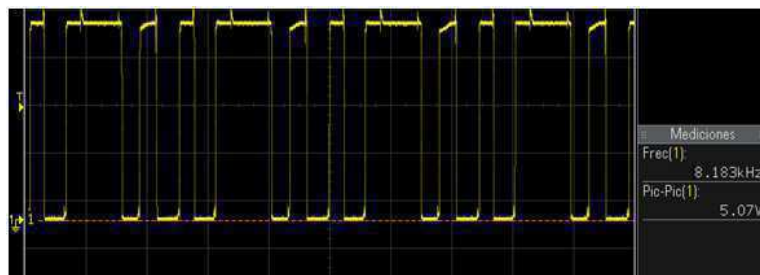


Figura 4.7: Punto M a un ángulo de 90°.



Figura 4.8: Punto M a un ángulo de  $180^\circ$ .Figura 4.9: Punto M a un ángulo de  $270^\circ$ .

En las figuras anteriores se observa que a pesar de que se trata del mismo punto tanto la frecuencia como la forma de onda cambian al modificar la rotación del receptor.

Este fenómeno puede ser una ventaja o una desventaja dependiendo de la perspectiva. Si sólo se desea saber la posición es mejor tener una señal única por cada punto para evitar posibles errores debido a traslapes con otros puntos; en cambio, si además de saber la posición se desea saber también la orientación entonces puede resultar ventajoso con la problemática de que pueden existir dos direcciones distintas con la misma forma de onda.

### 4.3. Determinación de la posición

Ya se caracterizaron las formas de onda en distintos puntos dentro del área de las lámparas e incluso se hicieron mediciones a distintos ángulos. Ahora se va proceder con la parte más importante de este proyecto: *la determinación de la posición*.

### 4.3.1. Planteamiento de la solución

Una primera alternativa que se tenía para la determinación de la posición era adquirir las señales del receptor a través de una tarjeta de adquisición de datos *Elvis* de National Instruments para hacer un algoritmo de reconocimiento que permitiera comparar las señales capturadas con otras señales previamente almacenadas y correspondientes a los puntos dentro del triángulo de lámparas. Este método no resultó eficiente debido a que las señales capturadas variaban dependiendo del instante en que eran capturadas y, por lo tanto, las probabilidades de que coincidieran con las señales previamente almacenadas eran casi nulas. Además, el tamaño de los equipos que se necesitaban hacía al sistema muy poco práctico ya que debía estar conectado a la red eléctrica y tenía muy poca libertad de movimiento.

Finalmente, se optó por una segunda alternativa que consiste en utilizar un microcontrolador para tomar muestras de la señal a una tasa de 25 kHz, esta frecuencia cumple con la ley de Nyquist ya que la mayor frecuencia muestreada es de 8kHz. Cada vez que el microcontrolador toma una muestra aumenta un contador dependiendo si capturó un voltaje de 5V, si el voltaje capturado es de 0V el contador mantiene su valor. En adición al muestreo, el microcontrolador también mide la frecuencia de la señal para tener otro punto de comparación.

Al cabo de 500 ms el microcontrolador entra a una interrupción para desplegar el valor de la frecuencia y del contador en una LCD.

Para poder determinar la ubicación usando estos valores es necesario hacer una caracterización de los puntos principales dentro del triángulo de las lámparas. La frecuencia y las cuentas de cada punto se ingresan al código usando los condicionales `if()`? `else()` de tal manera que permiten discernir la posición del receptor dependiendo de la condición que se cumpla.

### 4.3.2. Diagrama de flujo

El código correspondiente a la determinación de la solución fue escrito en lenguaje C con el compilador CCS. Sin embargo, se considera más ilustrativo explicar el procedimiento de manera gráfica a través de diagramas de flujo. En la figura [4-10] se muestra un gráfico que explica de forma más detallada el procedimiento y la solución del problema.

## 4.4. Impresión de la PCB

Esta etapa del proyecto consiste en unir en una sola placa el receptor, el microcontrolador y la LCD para hacer un circuito más práctico y funcional.

El nuevo diseño utiliza dos baterías de 9V para generar las tensiones duales que utiliza el amplificador de instrumentación y el seguidor de tensión.

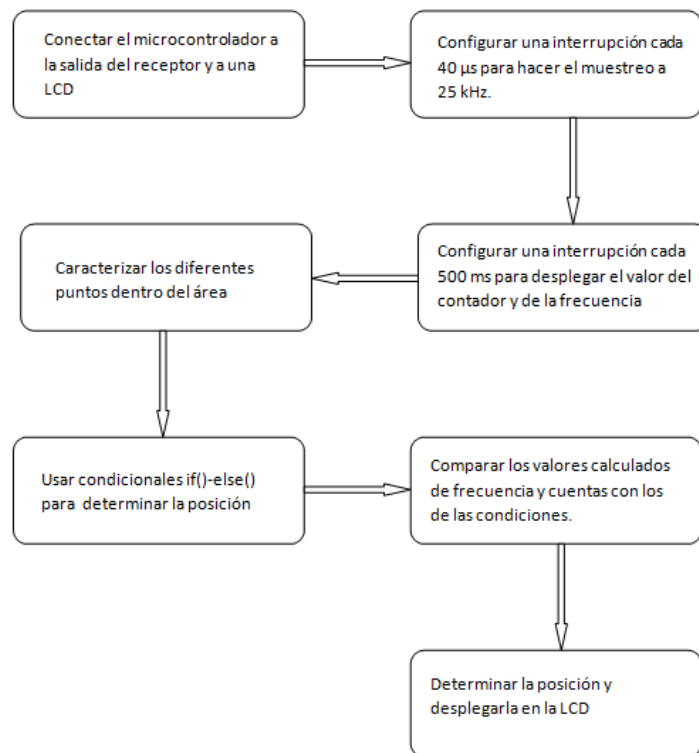


Figura 4.10: Diagrama de flujo de la solución.

Para alimentar los elementos que trabajan con 5V como el potenciómetro, el fotorreceptor, el comparador, el microcontrolador y la LCD se utiliza el regulador de voltaje LM7805, el cual entrega una salida de 5V siempre y cuando la tensión de entrada sea mayor a ese valor.

En la figura [4-11] se presenta el diseño en Ares-Proteus y en la figura [4-12] el prototipo terminado.

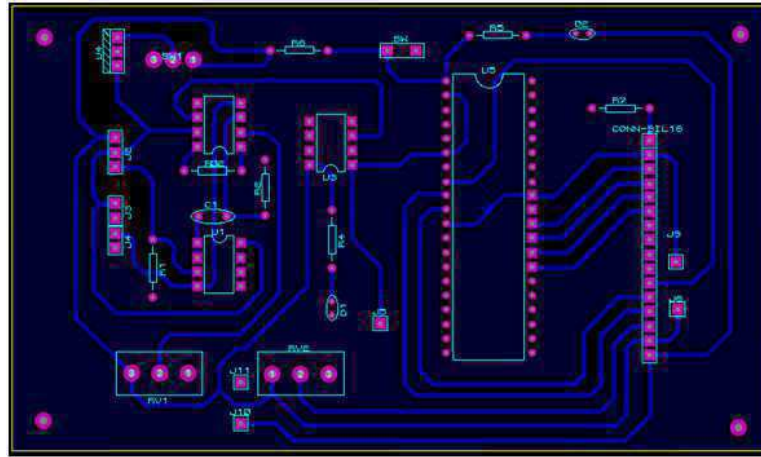


Figura 4.11: Diseño en Ares-Proteus.

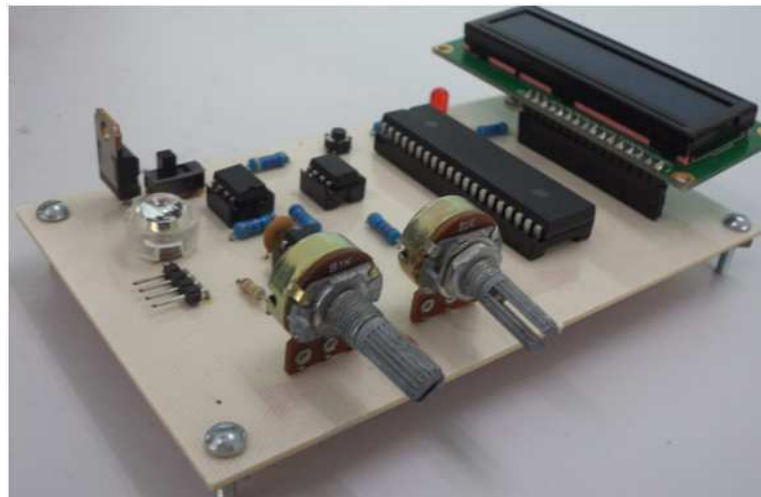


Figura 4.12: Prototipo Impreso.

## 4.5. Resultados

A continuación una lista de los resultados que se obtuvieron.

- El circuito no sólo detecta ubicación sino también orientación cuando el receptor se encuentra en una zona de interferencia.
- El error que se maneja es grande en comparación al área que cubren las lámparas pero razonable en comparación a los GPS convencionales.
- El sistema está propenso a errores en la determinación de la posición debido a que puede haber dos señales muy similares en dos puntos distintos.
- La iluminación del sol no interfiere con el funcionamiento del sistema; en cambio, las lámparas halógenas colocadas en posiciones adjuntas sí pueden llegar a alterar las mediciones.
- La caracterización depende de la aplicación ya que el receptor no siempre se encuentra a la misma distancia de las lámparas.
- El receptor se debe mantener siempre en posición horizontal para que la inclinación del fotorreceptor no sea una variable más.
- El control de offset rara vez se utiliza, lo mejor es dejarlo fijo en una posición donde el sistema funciona.

## 4.6. Conclusiones

Como conclusión se puede decir que la aplicación del sistema de posicionamiento en interiores utilizando comunicación VLC es más eficiente cuando se trabaja con lámparas que no se interfieren entre sí de manera que no hay dos señales iguales en dos posiciones distintas.

Los sistemas de IPS para robots en la industria utilizan sensores colocados en el piso para determinar su posición. El sistema con luz visible desempeña la misma función con la diferencia de que utiliza las lámparas que iluminan el interior, de manera que no hace falta hacer instalaciones adicionales. Además, toda la lógica del IPS está controlada desde el transmisor de modo que si se quiere modificar alguna ruta sólo es necesario modificar el programa que hace parpadear todas las lámparas.

## 4.7. Trabajos a futuro

Algunos puntos interesantes que se pueden implementar en un futuro son:

- 
- Aumentar la precisión del receptor utilizando más de un sensor de luz para tener más puntos de comparación y poder hacer al sistema independiente de la orientación.
  - Cubrir todo el interior con las lámparas de LEDs para tener más área de ubicación y eliminar todas las interferencias.
  - Acoplar el sistema receptor a un robot industrial que utiliza ruedas para desplazarse de tal manera que pueda saber su ubicación y tomar decisiones respecto al punto al que quiere llegar.

# Bibliografía

- [1] <http://www.etud.insa-toulouse.fr/~tkabir/code/cietorgb.html>
- [2] H. Sugiyama, S. Haruyama. Experimental investigation of modulation method for visible-light communications.
- [3] Tomasi Wayne.(2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas. México, Prentice Hall
- [4] Información oficial del gobierno de Estados Unidos sobre el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). <http://www.gps.gov/multimedia/exhibits/adventures/>
- [5] Goldsmith Andrea.(2005) Wireless Communications. <http://wsl.stanford.edu/~andrea/Wireless/SampleChapters.pdf>
- [6] Ventajas de la iluminación LED. <http://fitttech.blogspot.mx/2015/02/iluminacion-led-que-ventajas-tiene.html>
- [7] INTALITE UK, ECO LED PANEL ROUND. <http://www.intalite.co.uk/eco-led-panel-round-downlight-round-white-10w-3000k.html>
- [8] Catálogo de productos de iluminación. <http://www.technoshine.com/productos.php>
- [9] Manejo de la plataforma Pinguino. <http://tecbolivia.com/index.php/articulos-y-tutoriales-microcontroladores/23-introduccion-a-la-plataforma-qpinguinoq-arduino-con-pic>
- [10] Electronic Components Datasheet IRF510 MOSFET.
- [11] Introducción a los fotodetectores. [tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20426/Capitulo3.pdf](http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20426/Capitulo3.pdf)
- [12] [www.itl.laguna.edu.mx/Academico/Carreras/.../UNIDAD2TEMA4.PDF](http://www.itl.laguna.edu.mx/Academico/Carreras/.../UNIDAD2TEMA4.PDF)
- [13] Catálogo de componentes electrónicos. <http://www.radioelectronics.com/info/data/>

- 
- [14] ZAMTSU Corporation S.R.L. <http://www.zamtsu.com/web/luxometros/Luxometro-LX107.html>
- [15] Instrucciones de uso del luxómetro [www.pce-iberica.es/manuales/manual-luxometro-pce-174-nuevo.pdf](http://www.pce-iberica.es/manuales/manual-luxometro-pce-174-nuevo.pdf)
- [16] BURR-BROWN Corporation Datasheet. INA128P Instrumentation Amplifier
- [17] Microchip Datasheet. PIC18F4550 Microcontroller.
- [18] CCS Compiler Basics. <https://sites.google.com/site/ielectrox/home/programas-1/pic-c-compiler>
- [19] C Compiler Reference Manual. Version 4. August 2007.
- [20] CCS Compiler Details. <http://www.ccsinfo.com/content.php?page=compilers>
- [21] Franco Sergio.(2005). Diseño con aplicadores operacionales y circuitos integrados analógicos. México D.F., McGraw Hill
- [22] Project LiFi. <http://micro.org/bldsomething/>
- [23] Abhishek Kurup, Vipin Tiwari, Selvanathiya. Implementation and Demonstration of LiFi Technology, 2014.
- [24] Rahul R. Sharma, Akshay Sanganal, Sandhya Patl . Implementation of a Simple Li-Fi Based System. October 2014
- [25] García Brejio Eduardo.(2008). Compilador CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC. Barcelona, Alfaomega







M. EN L. J. ANTONIO ALTAREZ JAIME  
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES  
PRESENTE.

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno (a) Miguel Ángel Flores Olmeda del Programa de Licenciatura en Ing. en Comunicaciones y Electrónica cuyo número de NUA es 413744 del cual soy director. El título de la tesis es Sistema de Posicionamiento Local basado en la Tecnología Li-Fi

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los dos sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE

  
Mario Alberto Obregon Hernandez

NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS  
SECRETARIO

\_\_\_\_\_  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS

  
José A. Andrade Lucio

NOMBRE Y FIRMA  
PRESIDENTE

  
José Ruiz Pinales

NOMBRE Y FIRMA  
VOCAL