



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Pablo Manuel Caro Mejías

Sistema de posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 22 de Diciembre de 2017



Sistema de posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

Pablo Manuel Caro Mejías

Tesis para el título de Ingeniero Civil Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Ariel Leiva López
Profesor Guía

Sr. Francisco Alonso Villalobos
Profesor Correferente

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, Diciembre de 2017

A mi esposa, la mejor compañera de vida que podría tener,

A mis padres porque fueron un impulso para llegar hasta acá,

A mi Mami y Tata quienes siempre confiaron en mí y me ayudaron.

Agradecimientos

Mis agradecimientos a cada una de las personas que me acompañaron durante todos estos años, a mis familiares y compañeros de universidad de muchos años. Quiero agradecer en especial a los profesores Ariel Leiva, Francisco Pizarro y Francisco Alonso, por su generosidad y comprensión, sus consejos y enseñanzas a lo largo de este año. También quiero agradecer a cada uno de mis profesores, ya que sin ellos no tendría los conocimientos que me acompañan ahora.

Valparaíso, 22 de Diciembre de 2017

P. C

Resumen

El presente informe da a conocer el desarrollo e implementación de un sistema de posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi, donde el sistema de posicionamiento hace uso del espectro de luz infrarroja en forma bidireccional y el sistema de comunicación establece un enlace unidireccional haciendo uso del espectro de luz visible.

El sistema de posicionamiento en interiores es el encargado de disponer de la información del lugar en donde se encuentre un potencial usuario, para así poder enviar información dedicada a dicha posición. El sistema de comunicación en interiores es la encargada de enviar la información de acuerdo a la posición del usuario dentro del sistema completo. Esta información es unidireccional haciendo que el usuario solo reciba información.

Una de las ventajas de este sistema es que permite gran flexibilidad al agregar estaciones de detección de posición, así como de transmisión de información. Cuando se agregan nuevas la programación del sistema, en sí, debe cambiar en determinados puntos de ésta.

La implementación de este proyecto se basa en dos transceptores que transmiten y reciben información de posición y que, a su vez, transmiten información de comunicación. Por otro lado, un usuario recibe información de posición y la transmite, a su vez, en el espectro infrarrojo para crear un enlace de comunicación en donde este usuario solo recibe información en el espectro de luz visible.

Este sistema permite la posibilidad de enviar información dedicada de acuerdo a la posición de un usuario lo que hace posible usarla en universidades, supermercados, fábricas y un sin fin de espacios interiores donde se requiera información al instante del entorno circundante.

Palabras claves: Li-Fi, infrarrojo, luz visible, transceptor, usuario.

Abstract

The present report describes the development and implementation of an internal positioning and communication system via Li-Fi, where the positioning system makes use of the infrared light spectrum in bidirectional form and the communication system establishes a unidirectional link making use of the visible light spectrum.

The system of positioning in interiors is in charge of having the information of the place where a potential user is located, in order to be able to send information dedicated to that position. The indoor communication system is responsible for sending the information according to the user's position within the complete system. This information is unidirectional making the user only receive information.

One of the advantages of this system is that it allows great flexibility when adding stations of detection of position, as well as of transmission of information. When you add new system programming, itself, you must change in certain points of the system.

The implementation of this project is based on two transceivers that transmit and receive position information and, in turn, transmit communication information. On the other hand, a user receives position information and transmits it, in turn, in the infrared spectrum to create a communication link where this user only receives information in the visible light spectrum.

This system allows the possibility of sending dedicated information according to the position of a user which makes it possible to use it in universities, supermarkets, factories and an endless number of interior spaces where information is required instantly from the surrounding environment.

Keywords: Li-Fi, infrared, visible light, transceiver, user

Índice general

Glosario de términos	1
Introducción.....	1
Objetivos generales.....	3
Objetivos específicos	3
1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi	5
1.1 Sistema de posicionamiento en interiores	5
1.1.1 Triangulación.....	5
1.1.2 Análisis de escena.....	9
1.1.3 Proximidad.....	10
1.2 Sistemas de comunicación en interiores	10
1.2.1 Estándar IEEE 802.15.7	12
1.2.2 Comunicaciones ópticas inalámbricas	15
1.3 Dispositivos para sistemas vía Li-Fi	26
1.3.1 Transmisor	26
1.3.2 Receptor	31
1.4 Unidades empleadas para la medición de la luz.....	33
1.4.1 Intensidad luminosa	33
1.4.2 Flujo luminoso.....	33
1.5 Propuesta.....	34
2 Diseño de un sistema de posicionamiento en interiores vía Li-Fi	35
2.1 Protocolo NEC.....	35
2.2 Detección de la posición por proximidad.....	36
2.3 Implementación.....	37
2.4 Diagramas electrónicos del sistema de posicionamiento en interiores	40
2.4.1 Transceptor 1	40
2.4.2 Transceptor 2	42
2.4.3 Usuario	44
2.5 Conclusiones	44

3	Diseño de un sistema de comunicación en interiores vía Li-Fi	46
3.1	Implementación.....	46
3.2	Diagramas electrónicos del sistema de comunicación en interiores.....	48
3.2.1	Transceptor 1	48
3.2.2	Transceptor 2	49
3.2.3	Usuario	50
3.2.4	Conclusiones.....	50
4	Diseño de un sistema de posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi	52
4.1	Diagrama del sistema de posicionamiento por luz infrarroja y comunicación por luz visible	52
4.2	Diagrama en bloques del transceptor 1	53
4.3	Diagrama en bloques del transceptor 2	54
4.4	Diagrama en bloques del usuario.....	54
4.5	Conclusiones	55
5	Pruebas del sistema de posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi	56
5.1	Transceptor 1.....	56
5.2	Transceptor 2.....	58
5.3	Transceptor usuario.....	60
5.4	Comportamiento del sistema de posicionamiento y de comunicación vía Li-Fi	62
5.5	Conclusiones	66
6	Discusiones y conclusiones	67
	Bibliografía	69
A	Apéndice.....	71

Glosario de términos

AC: Alternating Current

ACO-OFDM: Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency División Multiplexing

ASK: Amplitude Shift Modulation

DC: Direct Current

DCO-OFDM: Direct Current biased Optical Orthogonal Frequency División Multiplexing

FPGA: Field Programmable Gate Array

FOV: Field Of View

FWHM: Full Width at Half Maximun

GPS: Global Positioning System

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform

IM/DD: Intensity Modulation and Direct Detection

IR: Infra Red

IrDA: Infra red Data Association

LDR: Light Dependent Resistor

LED: Light Emitting Diode

Li-Fi: Light Fidelity

LOS: Line Of Sight

LPS: Light Positioning System

MAC: Medium Access Control

M-PAM: Multi level Pulse Amplitude Modulation

M-QAM: Multi level pulse Quadrature Amplitude Modulation

NEC: Nippon Electric Company

OFDM: Ortogonal Frequency División Multiplexing

O-OFDM: Optical Ortogonal Frequency División Multiplexing

OOK: On-Off Keying

PHY: Physical Layer

PIN: Positive Intrinsic Negative

PWM: Pulse Width Modulation

RF: Radio Frequency

RGB: Red Green Blue

Rx: Receiver

Tx: Transmitter

VLC: Visible Light Communication

Wi-Fi: Wireless Fidelity

WLAN: Wireless Local Area Network

Introducción

El posicionamiento en interiores es una tecnología que puede ser beneficiosa para muchas industrias y clientes. De acuerdo con un informe de la Comisión Federal de Comunicaciones en 2012, la mayoría de investigaciones está de acuerdo en que el mercado de servicios basados en localización se triplicó en el año 2015 en comparación a su tamaño en 2012 [1]. El informe también señaló que Foursquare, una compañía de redes sociales basada en localización, tenía 10 millones de usuarios, pero este número ha ido en aumento desde entonces incrementándose en 40 millones de usuarios en 2013 [2].

La tecnología de comunicación por luz tiene gran potencial ya que ayudaría a descongestionar el tráfico de la banda de ondas de radio. En primer lugar, la banda de luz visible proporciona teóricamente 400 [THz] (375-780 [nm]) de ancho de banda, que es un ancho de banda mucho mayor que las técnicas de RF pueden utilizar. Por otra parte, las ondas de luz se limitan a las paredes en una habitación y, en general no penetran materiales sólidos. Por lo tanto, las redes se pueden realizar fácilmente ya que la distancia del enlace es auto limitante. Llamamos a este tipo de sistemas que emplean esta propiedad *islas de alto ancho de banda*. La motivación para que los operadores elijan transferir datos a través de esta banda óptica es que, al hacerlo, todo el enorme ancho de banda puede ser reutilizado al lado, libre de interferencias. Un enlace óptico inalámbrico se ve como una solución a futuro, ya que la capacidad de estos enlaces supera las capacidades de los enlaces por radio frecuencias.

Los diodos emisores de luz LEDs (Light-emitting Diode) reemplazarían a las lámparas incandescentes y fluorescentes utilizadas en la actualidad para la iluminación. En comparación con los dispositivos tradicionales de luz, la luz LED tiene una mayor eficiencia de energía, mayor vida útil y una mayor tolerancia a los riesgos ambientales. El LED es una fuente de luz semiconductor, se puede modular fácilmente para muchas aplicaciones diferentes de iluminación, como la comunicación de banda ancha, iluminación inteligente, etc. [3-4]. Esta característica permite a los investigadores explorar la posibilidad de usarlo para hacer frente al problema de posicionamiento en interiores. Recientemente, VLC (Visible Light Communication) haciendo uso de LEDs u otras fuentes de luz ha sido considerado como una de las soluciones más atractivas para los sistemas de posicionamiento en interiores debido a las muchas características que trae.

Hay muchas soluciones de posicionamiento en interiores basadas en técnicas de ondas de radio. Las tecnologías inalámbricas asociadas con ellas incluyen, pero no se limitan a: la red de área local inalámbrica (WLAN), la identificación por radiofrecuencia (RFID), celular, banda ultra-ancha (UWB) y Bluetooth. Estos métodos proporcionan precisiones de posicionamiento de decenas de centímetros a varios metros [5]. Se espera que los sistemas basados en VLC proporcionen una mejor precisión de posicionamiento frente a las soluciones entregadas por las ondas de radio, ya que sufren menos efectos multi-trayecto y la interferencia de otros dispositivos inalámbricos.

Los sistemas de VLC para fines de comunicación o posicionamiento, no generan ninguna interferencia de RF y por lo tanto son seguros para usar en el interior de los centros sanitarios. Los LEDs se pueden utilizar para llevar diferentes formas de información, por ejemplo, información biomédica de los dispositivos de vigilancia, información de texto de pacientes, etc., para el personal médico [6].

El término Li-Fi significa Light Fidelity y es la transmisión de datos mediante una conexión inalámbrica por luz visible, es decir, que toma como base a la teoría VLC, la cual se ha estudiado mucho en los últimos años, como un desahogo al ya saturado espectro de radio frecuencia.

Un factor importante que ha llevado a que se pueda desarrollar esta tecnología es la evolución que ha tenido la tecnología LED, la cual está reemplazando a las lámparas comunes. La capacidad de conmutación de estos dispositivos ha permitido que aparte de servir de iluminación, se pueda transmitir información por medio de ellos por medio del encendido y apagado a una velocidad imperceptible al ojo humano.

La tecnología Li-Fi hace uso de esta tecnología y la aprovecha para lograr un sistema de transmisión inalámbrico, el cual es una alternativa que se da al Wi-Fi, el cual utiliza el espectro de radio frecuencia.

Pero ha sido en los últimos años que gracias a la tecnología LED se ha ahondado más en una alternativa a la comunicación por radio frecuencia. Es así que en el año 2011 en la charla TED Global realizada en Edimburgo, el doctor Harald Hass, el cual es el creador de esta tecnología, le da por nombre Li-Fi. En octubre de 2011 nace el consorcio de Li-Fi conformado por algunas compañías y grupos industriales para promover los sistemas inalámbricos ópticos de alta velocidad y para así ayudar al ya congestionado espectro de radio frecuencias. Este consorcio cree que es posible lograr velocidades de más de 10 [Gbps], de modo que teóricamente se podría realizar la descarga de una película en alta definición en tan solo 30 segundos.

De acuerdo a algunos estudios realizados sobre la transmisión de datos por luz visible se han creado sistemas que transmiten datos empleando modulación OOK (On – Off Keying) por medio de una tarjeta para arreglos de compuertas programables FPGA Cyclone III de Altera donde se logra transmitir a una velocidad máxima de 25 [kbps] con un led de luz blanca de baja corriente de 30 [mA] [7].

En [8] se habla de disminuir los efectos de degradación en el enlace mejorando sus características de acuerdo al diseño de una etapa de ecualización para la transmisión y una de post-ecualización para la recepción por medios de filtros digitales sobre un entorno computacional. El diseño de la etapa de pre-ecualización mejoró el ancho de banda de modulación intrínseca donde gracias a esta etapa se aumentó de 15 [kHz] a 30 [kHz] sin introducción de ruido y también se mejoró la velocidad de transmisión de datos aumentándola de 25 [kbps] a 34,13 [kbps].

Estos estudios proponen mejoras al enlace de comunicación por luz visible, pero ninguno de ellos hace uso del posicionamiento por luz para crear un en conjunto con el de comunicación lo que beneficiaría enormemente a industrias y mercados que requieren de información o la desean entregar a sus clientes para hacer más atractivos sus productos. Esta tecnología también podría utilizarse en museos, universidades o diversos centros educativos donde se puede realizar un gran aporte en la entrega de información del entorno a quien la necesite.

La propuesta de solución que se presenta en este trabajo es el diseño de un sistema de posicionamiento por luz infrarroja y posterior comunicación por luz visible, en donde dependiendo de la ubicación del usuario, éste recibirá información diferente. Este proyecto consta de dos etapas, la primera es la de diseñar un sistema de posicionamiento por luz infrarroja y la segunda etapa es la de diseñar un sistema de comunicación con el usuario en forma unidireccional para el envío de datos en el espectro de luz visible.

El presente informe, presenta al sistema de posicionamiento por luz infrarroja funcionando en conjunto con un sistema de comunicación por luz visible, donde dependiendo de la posición del usuario es la información que recibirá. El sistema en su totalidad conjuga el posicionamiento con la comunicación, la cual en este proyecto es de forma unidireccional y con espacios que no se interfieren entre sí para la localización y la comunicación. Los datos a transferir por el canal, el cual en este caso es el aire, es una señal de audio la cual es modulada en intensidad a la salida de la fuente que la origina siendo transmitida en su frecuencia original.

Objetivos generales

- El objetivo general del proyecto es diseñar un sistema de posicionamiento por luz infrarroja con comunicación en el espectro de luz visible en forma unidireccional.

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema básico de posicionamiento por luz infrarroja.
- Diseñar un sistema básico de comunicación por luz visible.

- Conjugar los dos sistemas en un sistema único que permita detectar posición y realizar comunicación vía Li-Fi.

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

1.1 Sistema de posicionamiento en interiores

Las investigaciones en este campo demuestran que los algoritmos de posicionamiento propuestos hasta ahora se pueden clasificar en tres tipos: de triangulación, análisis de la escena, y de proximidad.

1.1.1 Triangulación

La triangulación es el nombre general para los algoritmos que utilizan las propiedades geométricas de los triángulos para la estimación de ubicación. La triangulación tiene dos ramas: laceración y angulación [6]. En los métodos de laceración, la ubicación de destino se calcula mediante la medición de sus distancias desde múltiples puntos de referencia. Para todos los sistemas de posicionamiento en interiores basados en VLC, éstos proponen que los puntos de referencia son fuentes de luz o transceptores para efectos de este informe, dado que se transmitirá y recibirá información; y el objetivo es un receptor óptico o usuario para efectos de este informe. Las distancias son casi imposibles de medir directamente; sin embargo, se pueden calcular matemáticamente a partir de otras mediciones tales como la fuerza de la señal recibida (RSS), el tiempo de llegada (TOA) o de diferencia de tiempo de llegada (TDOA). Por otra parte, de acuerdo a las medidas de angulación de los ángulos en relación con varios puntos de referencia (ángulo de llegada (AOA)), la estimación de localización se lleva a cabo mediante la búsqueda de puntos de intersección de las líneas de dirección que son los radios de los puntos de referencia.

Triangulación – laceración circular

Los métodos de laceración circular principalmente hacen uso de dos tipos de medidas: TOA o RSS.

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

A medida que la luz viaja a una velocidad constante en el aire, la distancia entre el usuario y el transceptor es proporcional al tiempo de viaje de las señales ópticas. En los sistemas basados en TOA, se requieren mediciones de tiempo de llegada con respecto a tres transceptores para localizar el objetivo, dando la intersección de tres círculos de 2-D, o tres esferas en un escenario en 3-D. Un muy buen ejemplo de los sistemas basados en TOA es el sistema GPS que se utiliza ampliamente. En el sistema, los mensajes de navegación enviados desde satélites contienen información de tiempo (en la forma de un código de distancia) y de efemérides (información de órbita para todos los satélites). Después de recibir con éxito los mensajes de navegación de más de tres satélites, la laceración circular (en adelante, la tri-laceración) se realiza para determinar la ubicación del usuario. Sin embargo, todos los relojes utilizados por los transmisores, así como por el usuario tienen que estar perfectamente sincronizado. Para aplicaciones en interiores, la precisión de posicionamiento debe oscilar entre sub-metros a centímetros, que significa que los diferentes relojes en los sistemas basados en TOA tienen que ser sincronizados en el nivel de unos pocos nanosegundos, o incluso mayor precisión. Como resultado, la complejidad y el coste de tales sistemas son impracticables. Por lo tanto, la investigación en la técnica de posicionamiento basado en TOA ha sido muy limitada.

Los sistemas basados en RSS calculan la pérdida de propagación de la señal emitida basada en las mediciones de la intensidad de la señal recibida. La estimación de la distancia se hace entonces mediante el uso de un modelo adecuado de pérdida de trayectoria. Al igual que en los sistemas basados en TOA, la estimación de la posición del objetivo se obtiene por laceración circular como se muestra en la Figura 1-1. Debido a la disponibilidad de canales de línea de visión directa (LOS) para la mayoría de los ambientes interiores, se considera que los métodos basados en RSS utilizando VLC ofrecen un buen desempeño [9]. Cabe destacar en la Figura 1-1 que los círculos centrales de las respectivas circunferencias corresponden a los transmisores de luz y el usuario es el triángulo donde se intersectan las circunferencias.

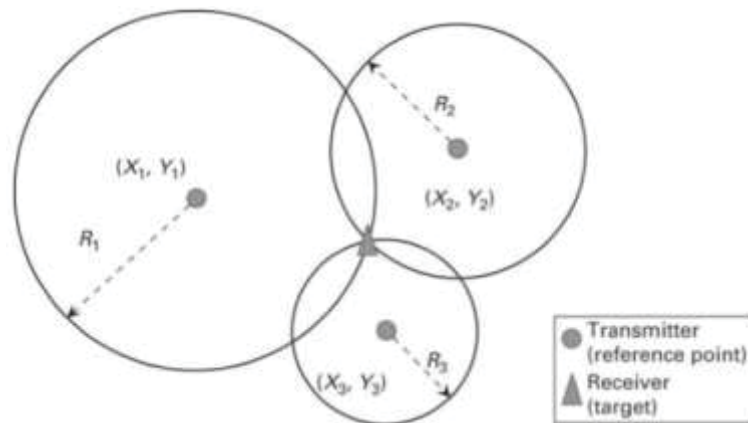


Figura 1-1: Posicionamiento utilizando laceración circular (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

Se procede a introducir una expresión matemática para laceración circular en el espacio bidimensional. La expresión para las tres dimensiones es similar. Sea (X_i, Y_i) la posición del

transmisor *i-ésimo* (punto de referencia) en un plano de dos dimensiones y (x, y) denotan la posición del usuario (de destino). Si la distancia medida entre el transmisor y el usuario *i-ésimo* es R_i , entonces cada círculo, como se muestra en la Figura 1-1 es un conjunto de posibles ubicaciones del receptor determinado por una sola medida de la distancia, que es:

$$(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 = R_i^2 \quad (1-1)$$

Donde $i = 1, 2, \dots, n$ y n es el número de transmisores (puntos de referencia) que participan en las mediciones de distancia. En teoría, si las medidas están libres de ruido, la intersección de las circunferencias dadas por la ecuación (1-1) debe producir la posición del usuario como un único punto. Sin embargo, esto no puede ser realista en mediciones reales. Las mediciones de distancia ruidosas conducen a múltiples soluciones al sistema descrito por la ecuación. (1-1).

Triangulación – laceración hiperbólica

Los métodos de laceración hiperbólicas se asocian generalmente con las mediciones de TDOA. En los sistemas basados en TDOA, las señales de luz de diferentes LEDs están designadas para ser transmitida en el mismo instante. Esto se puede lograr fácilmente, ya que todos los LEDs están en estrecha proximidad para que puedan compartir el mismo reloj. El receptor mide la diferencia en el momento en que llegan estas señales. Por otro lado, el usuario no tiene que sincronizarse con los transmisores, ya que no está tratando de extraer el tiempo absoluto de la información de llegada.

Al igual que en los sistemas basados en TOA y RSS, se necesitan tres transceptores para permitir el posicionamiento 2-D o 3-D. Debido a que una sola medición TDOA con transceptores implicados proporciona una hipérbola en un plano 2-D o un hiperboloide en un espacio 3-D, se requieren dos mediciones TDOA para localizar el objetivo mediante el uso de laceración hiperbólica (referido como multi-laceración). En lugar de tomar directamente mediciones TDOA, se pueden tomar otras medidas, y calcular la información TDOA mediante el uso de ellos. En [10], los componentes sinusoidales de las señales emitidas a partir de dos LEDs generar un patrón de interferencia en el receptor debido a que tienen la misma frecuencia. Por lo tanto, el valor sinusoidal de pico a pico de la señal recibida puede ser utilizado para obtener mediciones TDOA equivalentes.

Para la expresión matemática de laceración hiperbólica en el espacio de dos dimensiones, siguiendo la notación utilizada para laceración circular, cada hipérbola como se muestra en la Figura 1-2 es un conjunto de posibles ubicaciones del usuario determinado por una única medición de diferencia de distancia. Cada hipérbola puede ser representada por:

$$D_{ij} = R_i - R_j = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2} \quad (1-2)$$

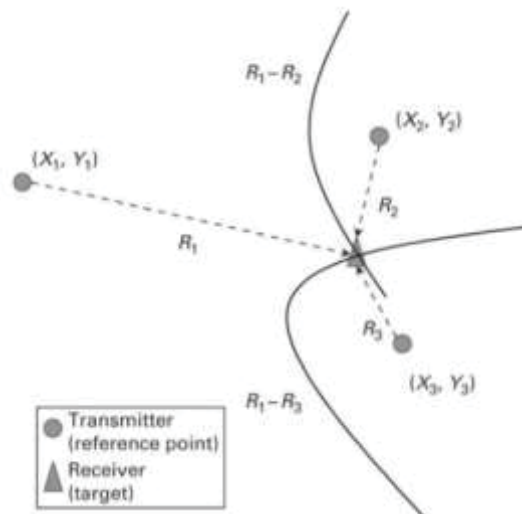


Figura 1-2: Posicionamiento utilizando laceración hiperbólica (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

Triangulación – angulación

En los sistemas basados en AOA, el receptor mide ángulos de llegada de señales de varios puntos de referencia. La ubicación del usuario se determina entonces como la intersección de las líneas de dirección (Figura 1-3). Típicamente se necesitan dos transeceptores para dar cuenta del posicionamiento en 2-D y de tres fuentes de luz para 3-D. La mayor ventaja de los sistemas basados en AOA es que no se necesita sincronización de tiempo. Otra ventaja es que es relativamente más fácil de detectar la AOA de las señales entrantes en el dominio óptico con un receptor de formación de imágenes, en comparación con el empleo de redes de antenas complejas utilizadas en los enfoques de ondas de radio. Las cámaras que se encuentran en el frente de algunos dispositivos móviles, que son inherentemente receptores de imágenes, han traído oportunidades para que este método sea aplicado a la electrónica de consumo móvil. Sin embargo, para lograr un buen rendimiento para un sistema real, la infraestructura de iluminación puede que tenga que ser ajustada ya que la mayoría de estas cámaras tienen un campo de visión muy limitado. Más en general, la precisión de posicionamiento de un sistema basado en AOA se degradará cuando el objetivo se aleje de las fuentes de luz debido a la resolución espacial limitada de los receptores de formación de imágenes. Una exactitud de posicionamiento de 5 cm se informa cuando se utiliza un receptor de imágenes con una resolución de 1296×964 píxeles [11].

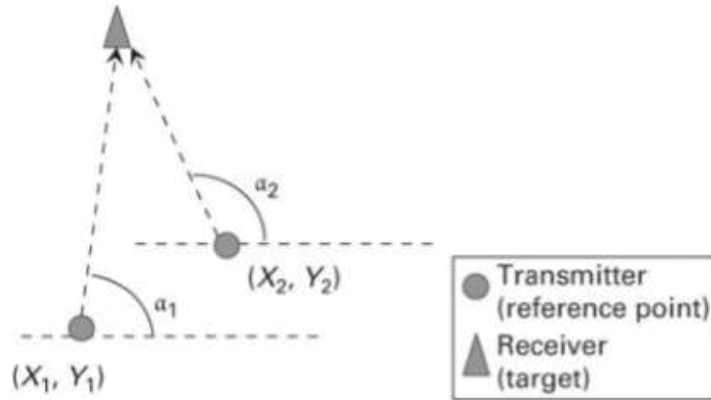


Figura 1-3: Posicionamiento utilizando angulación (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

1.1.2 Análisis de escena

La técnica de análisis de escena se refiere a algoritmos de posicionamiento que hacen uso de las huellas digitales asociadas con cada punto de anclaje en el sistema dentro de una escena, como se muestra en la Figura 1-4. El usuario es entonces situado, haciendo coincidir en tiempo real (on-line) mediciones a estas huellas digitales. Las mediciones que se pueden utilizar como las huellas digitales incluyen todas las mediciones mencionadas anteriormente, es decir, TOA, TDOA, AOA y RSS. RSS es la forma más utilizada de la huella digital. El tiempo requerido para que coincida con las huellas digitales es generalmente más corta que la realización de una triangulación, ahorrando una gran cantidad de tiempo y energía. Sin embargo, las soluciones de análisis de la escena también tienen una desventaja significativa. No se pueden implementar al instante dentro de un nuevo escenario ya que se necesita de un sistema preciso pre-calibrado.

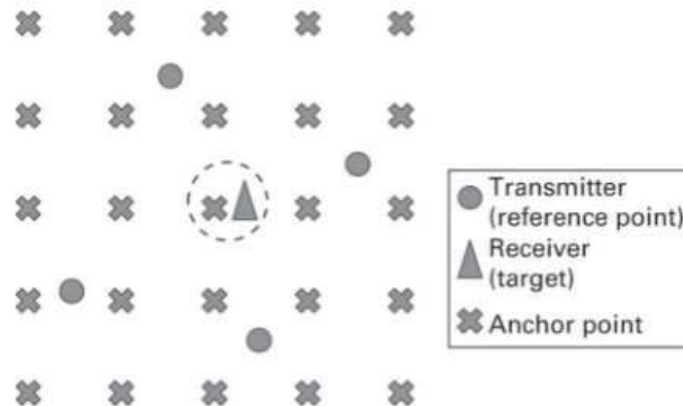


Figura 1-4: Sistema de posicionamiento utilizando análisis de escena (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

1.1.3 Proximidad

Los sistemas basados en proximidad, como se muestra en la Figura 1-5, se basan en una densa red de transceptores, cada uno con una posición conocida y un ID de hardware único. Cuando el usuario recibe señales desde un solo transceptor, se considera que se co-localiza con la fuente. Cuando se detectan señales de múltiples fuentes, se llevará a cabo un promedio. Sistemas de proximidad utilizando la tecnología VLC, teóricamente proporcionan una precisión no mayor que la resolución de la propia red de iluminación. Se debe tener en cuenta que cuando se emplean redes densas, se requiere un estrecho haz de iluminación desde las fuentes de luz con el fin de evitar interferencias y problemas de determinación de la ubicación. En [12], los autores demostraron experimentalmente un sistema de posicionamiento basado en proximidad. El posicionamiento es proporcionado por LEDs de luz visible, mientras que una red inalámbrica ZigBee se emplea para enviar la información de localización al nodo principal, que se extiende al rango de trabajo del sistema.

ZigBee es un estándar que define un conjunto de protocolos para el armado de redes inalámbricas de corta distancia y baja velocidad de datos. Opera en las bandas de 868 [MHz], 915 [MHz] y 2,4 [GHz] y puede transferir datos hasta 250 [Kbps].

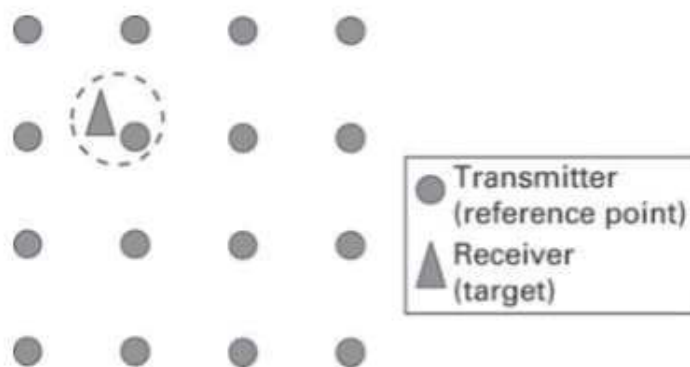


Figura 1-5: Sistema de posicionamiento por proximidad (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

1.2 Sistemas de comunicación en interiores

La tecnología Li-Fi utiliza la tecnología LED para la transmisión de datos enviando información por ellos mediante el parpadeo a una gran velocidad de éstos. La información a transmitir debe ser codificada y modulada a las frecuencias a las cuales trabajan los LEDs.

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

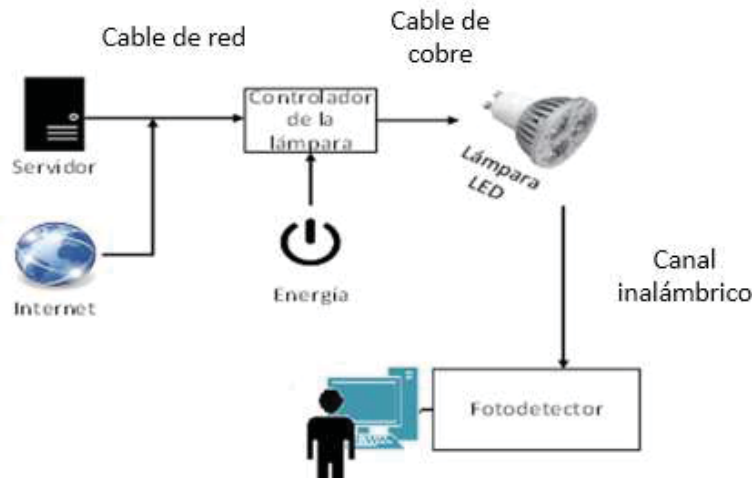


Figura 1-6: Esquema básico de un sistema de comunicación por luz visible

La Figura 1-6 muestra el esquema básico de un sistema de comunicación inalámbrica por luz visible. El sistema de transmisión está compuesto por dos elementos: el emisor que es, básicamente, el LED y un receptor que es un fotodiodo de silicio. Cuando la luz está encendida, se está enviando un '1' digital y caso contrario, un '0'. De esta manera, al incorporarle un controlador, se modifica la intermitencia del foco, la cual depende de los datos a transmitir.

Para el receptor, esto opera análogamente, es decir, la luz emitida es capturada por el fotodetector el cual traspasa la información recibida a la tarjeta de un PC para poder decodificarla.

Para que esto sea posible, se usa el espectro de luz visible que va desde los 400[THz] (750[nm]) hasta los 800[THz] (400[nm]) como se muestra en la Figura 1-7. Dada la velocidad de destello del LED, resulta imperceptible para el ojo humano esta variación.

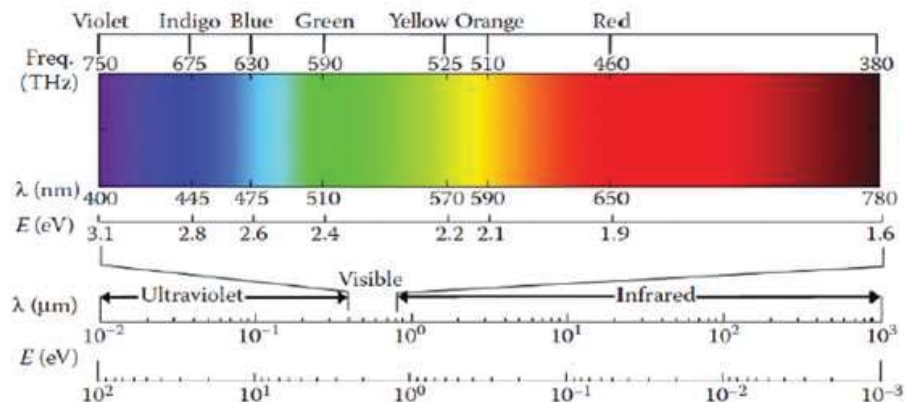


Figura 1-7: Espectro de luz visible

El esquema de la Figura 1-8 muestra como el canal de comunicación se ve afectado por la atenuación, el ruido, la interferencia y la distorsión, por lo que la señal debe ser acondicionada correctamente para la transmisión y recepción.

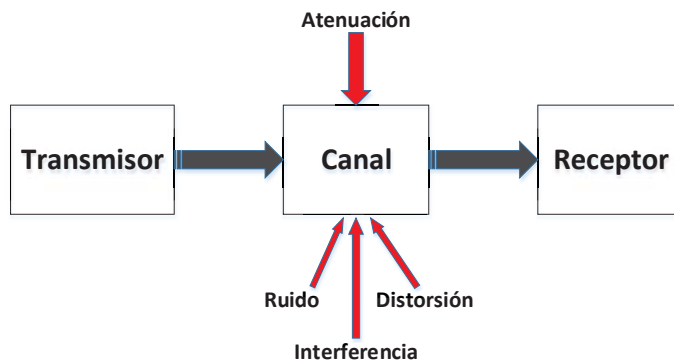


Figura 1-8: Diagrama en bloques de un sistema de comunicación óptica inalámbrica

1.2.1 Estándar IEEE 802.15.7

En el estándar IEEE 802.15.7 son definidos los protocolos que se utilizan para las comunicaciones inalámbricas por luz visible. Este estándar define dos características fundamentales, la capa de control de acceso al medio (MAC) y la capa física denominada (PHY) con una velocidad de transmisión que es capaz de soportar audio, vídeo y archivos multimedia [13]. La capa de control de acceso al medio es un protocolo por el cual los nodos transmiten por el canal de transmisión sin potenciales colisiones y la capa física es la encargada de la codificación y modulación de la información para ser transmitida por el transmisor al canal de forma óptima.

Modulación de portadoras

La modulación consiste en la manipulación de los cambios de las ondas senoidales. Es la capacidad inherente de tomar la información digital y modificar las frecuencias específicas de la señal portadora, la cual es una forma de onda que es modulada por la señal moduladora la que contiene la información a transmitir. Esta manipulación de la señal senoidal permite que la información pueda ser transmitida de un punto a otro sin problema aprovechando las características de canal de transmisión.

Modulación OOK

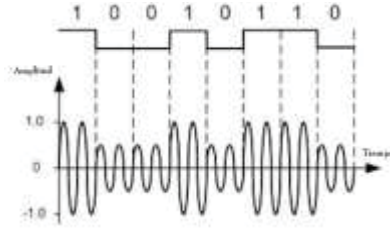


Figura 1-9: Modulación OOK (fuente: [https:// http://www.cb27.com/](https://http://www.cb27.com/))

La modulación OOK es un caso específico de la ASK en el cual el valor de la amplitud varía entre 0 hasta un valor “A” (amplitud que se requiera). La Figura 1-9 muestra la forma en la que se modula una señal digital por medio de OOK. Este tipo de modulación es utilizada por la mayoría de los sistemas de transmisión ópticos. Consiste en suministrar a la fuente de luz una corriente superior a la corriente de umbral, para que tenga lugar la emisión de luz, en caso que se desee transmitir el bit “1”. En caso de que sea un “0”, la potencia óptica emitida por la fuente de luz deberá ser nula, es decir, la corriente aplicada será menor que la de umbral.

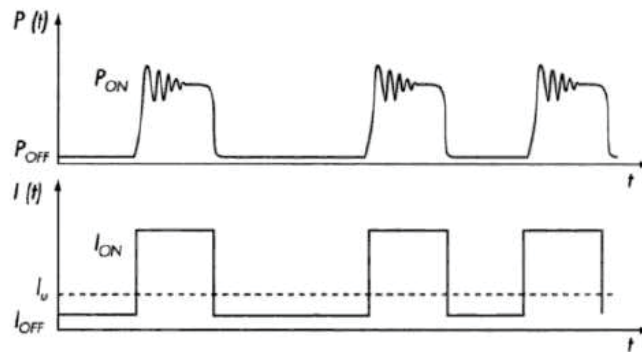


Figura 1-10: Modulación OOK donde se muestra la potencia óptica emitida y la corriente aplicada (fuente: PEÑAFIEL J., *Análisis de la tecnología Li-Fi: Comunicaciones por luz visible como punto de acceso a internet, una alternativa a la transmisión de datos en las comunicaciones inalámbricas*)

La Figura 1-10 muestra que cuando se suministra una corriente superior de umbral, se tiene lugar la emisión de luz para el caso que se quiera transmitir el bit “1”. En caso de que sea un “0”, la potencia óptica emitida por la fuente de luz deberá ser nula, es decir, la corriente aplicada será menor que la de umbral.

Modulación VPPM

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

La modulación VPPM es un esquema de modulación que es compatible con el control de atenuación que varía el ciclo de trabajo o anchura de pulso para conseguir atenuación en oposición al control de amplitud.

Combina 2-PPM (modulation 2 pulse position) con PWM (pulse width modulation) para un control de atenuación. Los bits “1” y “0” se distinguen por la posición de un pulso, mientras que el ancho del pulso se determina por la relación de atenuación.

PPM: Modulación por posición de pulso en donde la amplitud y el ancho son fijos y la posición es variable. La Figura 1-11 muestra un esquema de modulación 2-PPM.

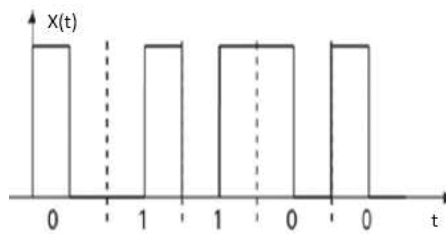


Figura 1-11: Modulación 2-PPM (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

PWM: Modulación por ancho de pulsos en donde se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica. La Figura 1-12 muestra un esquema de modulación PWM.

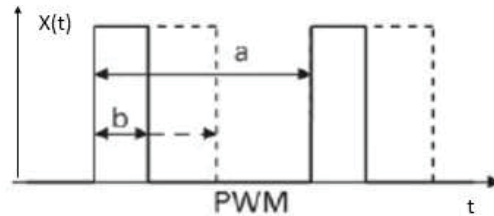


Figura 1-12: Modulación PWM (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

VPPM: Combina la posición del pulso con su ancho para distinguir los bits “1” y “0”. En la Figura 1-13 se pueden apreciar tres diferentes modulaciones VPPM para distintos porcentajes de atenuación.

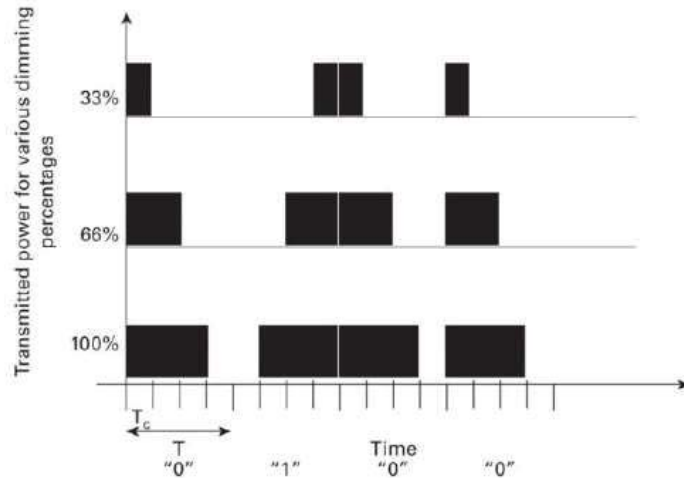


Figura 1-13: Modulación VPPM para distintos porcentajes de atenuación (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

1.2.2 Comunicaciones ópticas inalámbricas

Originalmente dirigido al espectro infrarrojo cercano (NIR), el enlace inalámbrico óptico era para comunicaciones de corto alcance. Desde 1993, un conjunto estandarizado de protocolos de la Asociación de datos por infrarrojos (IrDA) se han aplicado para la comunicación por infrarrojos inalámbrico en dispositivos portátiles, como teléfonos móviles, ordenadores portátiles, cámaras, controles remotos, y muchos más. Con los avances de tecnología de iluminación de estado sólido en los últimos años, los LED están reemplazando las bombillas incandescentes por su fiabilidad y una mayor eficiencia energética, por ejemplo, 5% vs. 30% a favor de LEDs. Además de la iluminación, LED también se prevén para proporcionar alta capacidad de transmisión inalámbrica de datos [14].

La comunicación óptica es cualquier forma de telecomunicación que utiliza la luz como medio de transmisión. Después de haberse originado en los tiempos antiguos en forma de incendios, balizas y señales de humo que transmiten un mensaje, la comunicación inalámbrica óptica (OWC) ha evolucionado a una tecnología complementaria a la de radiofrecuencia (RF). Sistemas OWC utilizan longitudes de onda en el infrarrojo (IR) del espectro para la comunicación IR y el espectro de la luz visible para la comunicación por luz visible (VLC). Debido a la disponibilidad de un amplio espectro sin licencia de aproximadamente 670 [THz], OWC tiene el potencial de proporcionar enlaces inalámbricos con muy altas tasas de datos.

La estructura básica de los sistemas OWC la constituyen un láser o diodo emisor de luz en el transmisor, y un sistema fotodetector de los haces de luz en el receptor como puede apreciarse en la Figura 1-14.

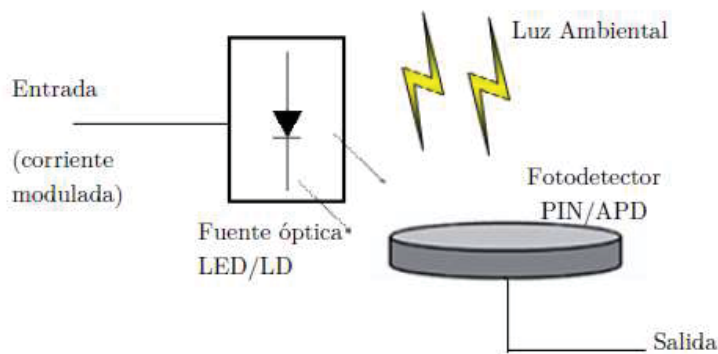


Figura 1-14: Diagrama de la parte óptica de OWC

Configuración del enlace OWC

Hay numerosas formas a través de las cuales se puede configurar físicamente un enlace óptico inalámbrico. En este caso, la configuración va a depender de dos parámetros. Primero, dependiendo si se encuentra con o sin línea de visión (LOS, Line of Sight, Non-LOS), y segundo, según el grado de direccionalidad del transmisor, del receptor, o de ambos (dirigida, directed o no dirigida, non directed).

LOS dirigida (directed LOS)

El transmisor y el usuario están en visión directa, sin ningún objeto que pueda obstruir entre ellos. Normalmente se utiliza para los enlaces de comunicación de punto a punto en espacios al aire libre y en algunos casos en el interior también.

La óptica se concentra en un haz muy estrecho como se aprecia en la Figura 1-15, mostrando de esta forma los requisitos de bajo consumo de energía, así como la creación de una densidad de flujo de alta potencia en el fotodetector. Por otra parte, el enlace LOS ofrece la más alta velocidad de datos (cientos de Mbps o más) en enlaces con un rango desde unos pocos metros hasta 5 [kms]. Además, en enlaces de LOS dirigidos, la señal no sufre de distorsión inducida por multitrayecto y el ruido de las fuentes de luz ambiental también son rechazadas en gran medida cuando se utiliza con un receptor con campo de visión (FOV, field of vision) estrecho. Por consiguiente, la velocidad de datos está limitada por la pérdida de trayectoria en el espacio libre en lugar de los efectos de la dispersión multitrayecto.

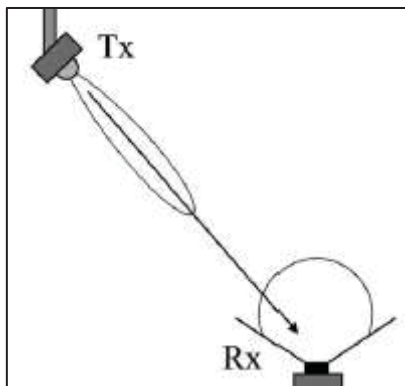


Figura 1-15: Configuración LOS dirigida (fuente: S. Dimitrov, H. Haas, Principles of LED Light Communications)

LOS no dirigida (Non-directed LOS)

Para aplicaciones en interiores, la configuración LOS no dirigida es considerada como la configuración más flexible. Utiliza transmisores con un haz ancho y receptores con un FOV amplio, además de la dispersión de las superficies dentro de la habitación para lograr un área de cobertura mayor, ofreciendo así una tasa de datos similar a la que puede ofrecer RF, superior a los 150 [Mbps] (ver Figura 1-16).

Los enlaces LOS no dirigidos son adecuados para aplicaciones de difusión de punto a multipunto. Por otra parte, ofrecen robustez al desvanecimiento y no requiere de alineamiento ni seguimiento. Es posible llegar a superar el problema del bloqueo usando los reflejos de las superficies de los objetos dentro de la habitación, por lo que se detecta una elevada proporción de la luz transmitida en el fotodetector provenientes de un gran número de direcciones diferentes.

Sin embargo, esto conlleva una gran pérdida de trayectoria óptica, y por consiguiente requiere una mayor potencia de transmisión, además de dispersión por multitrayecto. Si bien, la propagación multitrayecto no da lugar a desvanecimiento por trayectos múltiples en los sistemas de IR de interior, ya que los tamaños de detector son enormes en comparación con la longitud de onda, esto da lugar a interferencia entre símbolos (ISI), lo que limita la velocidad de datos de alrededor de unos pocos Mbps en una habitación de un tamaño normal. Además de esto, los enlaces OWC deben ser capaces de funcionar en situaciones con niveles de luz ambiente intensa, degradando así el rendimiento del enlace.

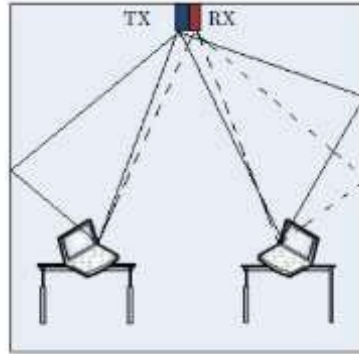


Figura 1-16: Configuración LOS no dirigida

Dirigida Sin LOS (directed non-LOS)

Incorporan transmisores y receptores (con ángulos de emisión y FOV muy estrechos) que, en lugar de apuntar directamente el uno al otro, se dirige a una superficie reflectante que permite superar el obstáculo (ver Figura 1-17).

La principal ventaja de esta topología es que, además de la posibilidad de la superación de un obstáculo, se recibe la señal de información después de una sola reflexión, lo que minimiza la dispersión multitrayecto.

El problema radica en que la alineación entre transmisor y receptor es bastante problemática.

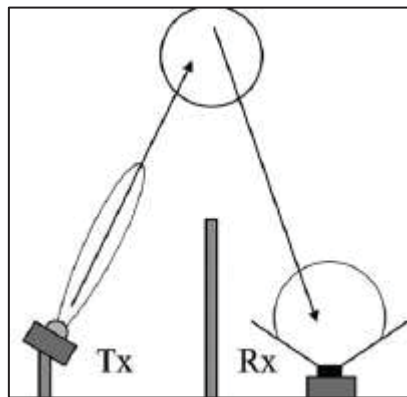


Figura 1-17: Configuración LOS no dirigida (fuente: S. Dimitrov, H. Haas, Principles of LED Light Communications)

Sin línea de visión no dirigida (Non-directed Non-LOS)

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

En las configuraciones Non-LOS pueden existir obstáculos bloqueando la visión directa entre el transmisor y el receptor, y por tanto se basan en el uso de superficies reflectantes para crear trayectorias alternativas entre el transmisor y el usuario.

El caso de topología non-directed, por lo general, consiste en un transmisor que apunta directamente hacia el techo emitiendo un amplio haz infrarrojo. Esta es la topología más conveniente para los sistemas OWC interior y para las redes LAN *ad-hoc*, ya que no requiere de una cuidadosa alineación del transmisor y receptor, ni requiere mantener rigurosamente la trayectoria.

Desafortunadamente, los enlaces *non-LOS* non-directed experimentan alta pérdida de trayectoria (multitrayecto), típicamente 50-70 [dB] para una separación horizontal de 5 [m]. La pérdida de trayectoria se incrementa aún más si existe una obstrucción de forma temporal, como puede ser una persona, oscureciendo el receptor de tal manera que la trayectoria de la señal principal queda bloqueada, una situación conocida como shadowing (sombreado). (Ver Figura 1-18).

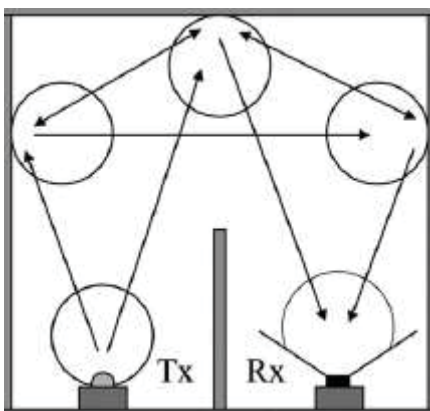


Figura 1-18: Configuración NLOS no dirigida (fuente: S. Dimitrov, H. Haas, Principles of LED Light Communications)

Modulación de portadoras en OWC

La transmisión de datos en la comunicación inalámbrica óptica (OWC), con fuentes de luz se realiza a través de la modulación de la intensidad y la detección directa (IM/DD). Para este propósito, la señal transmitida tiene que ser de valor real y no negativo. En la práctica, esto se consigue mediante técnicas de modulación de portadora única, tales como la modulación multinivel de posición de pulso (M-PPM) y la modulación multi-nivel de amplitud de pulso (M-PAM), y por medio de la modulación de múltiples portadoras tales como la modulación multi-nivel de amplitud en cuadratura (M-QAM) de multiplexación por división de frecuencia ortogonal óptica (O-OFDM). Convencionalmente, la potencia óptica promedio se define como el primer momento de la señal transmitida, mientras que la potencia eléctrica media se define como el segundo momento de la señal transmitida. En la práctica, el rango dinámico se puede linealizar a través de pre-distorsión sólo entre los niveles mínimo y máximo de potencia radiada óptica. Además, las normas de seguridad ocular y de diseño también imponen una restricción de

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

potencia óptica promedio. Debido a estas limitaciones, existe una relación fija entre la potencia media eléctrica y la potencia media óptica de las señales de una sola portadora y de múltiples portadoras que varía con el cambio en la configuración de empuje, es decir, una combinación de corriente continua (CC) de polarización directa y varianza de la señal.

Señales OFDM convencionales son de valor complejo y bipolar por naturaleza. Por lo tanto, la técnica estándar RF OFDM tiene que ser modificada para llegar a ser adecuada para sistemas de IM/DD. Una forma sencilla de obtener una señal OFDM de valor real es imponer una restricción de simetría hermitiana en las subportadoras en el dominio de la frecuencia, como se ilustra en la Figura 1-19.

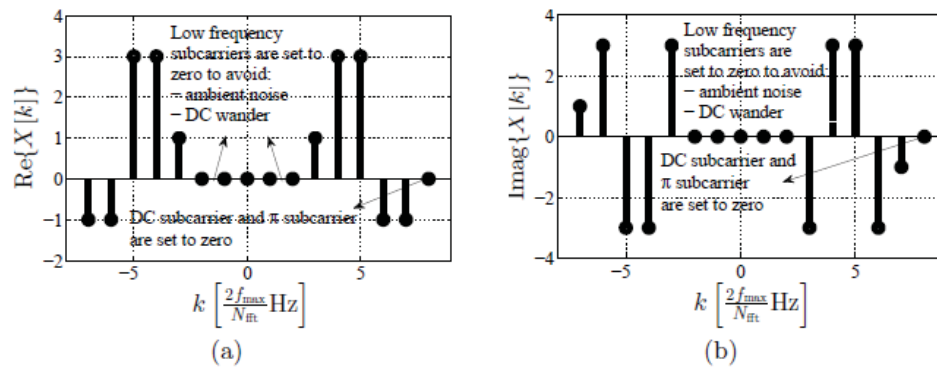


Figura 1-19: Restricción hermitiana en el dominio de la frecuencia para la parte real y la parte imaginaria de la señal (fuente: Dobroslav Tsonev, Light Fidelity (Li-Fi): Towards All-Optical Networking)

Sin embargo, la señal en dominio de tiempo resultante es todavía bipolar. Una forma para obtener una señal unipolar es introducir una corriente continua (CC) de valor positivo directo en torno al cual la amplitud de la señal OFDM puede variar como se muestra en la Figura 1-20.

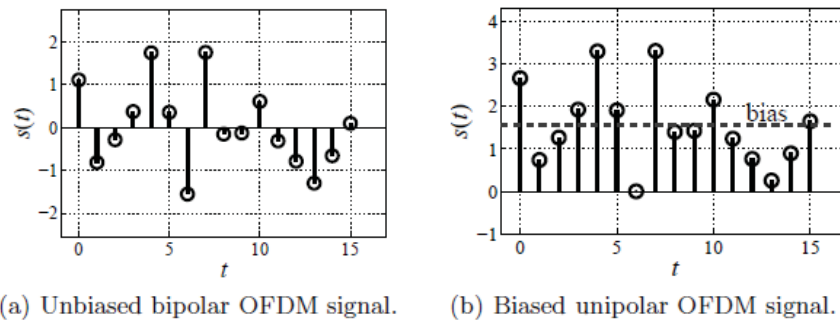


Figura 1-20: DCO-OFDM (fuente: Dobroslav Tsonev, Light Fidelity (Li-Fi): Towards All-Optical Networking)

El esquema de modulación unipolar resultante se conoce como OFDM Biased Optical DC (DCO-OFDM). La adición del nivel de polarización constante conduce a un aumento significativo en el consumo de energía eléctrica. Esto puede ser fácilmente visualizado en la Figura 1-20 (a) y

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

la Figura 1-20 (b). Sin embargo, si las fuentes de luz se utilizan para la iluminación al mismo tiempo, la salida de luz como resultado de la polarización CC se no se desperdicia ya que se utiliza para cumplir con la función de iluminación. Sólo si no se requiere iluminación, como en el enlace ascendente de un sistema de Li-Fi, la polarización de corriente continua puede comprometer significativamente la eficiencia energética. Por lo tanto, los investigadores han dedicado importantes esfuerzos para el diseño de un esquema de modulación basada en OFDM que es puramente unipolar. Una de las soluciones propuestas es OFDM asymmetrically Clipped Optical (ACO-OFDM), modulada por QAM o PSK en OFDM.

La idea de la utilización de ACO-OFDM es obtener una señal real y positiva a la salida del transmisor, pero la utilización de la modulación QAM y PSK en OFDM entregan una señal con valores positivos y negativos como se observa en la Figura 1-21.

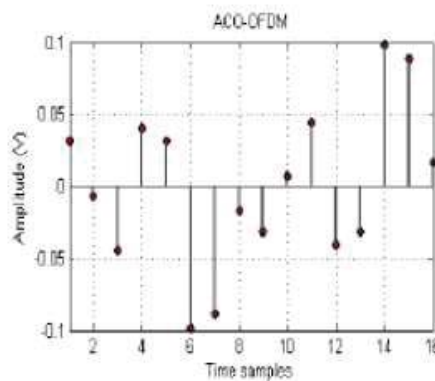


Figura 1-21: Señal resultante luego de la modulación QAM y PSK (fuente: PEÑAFIEL J., *Análisis de la tecnología Li-Fi: Comunicaciones por luz visible como punto de acceso a internet, una alternativa a la transmisión de datos en las comunicaciones inalámbricas*)

Para obtener valores positivos, los cuales serán transmitidos por los elementos ópticos, se aplica ACO-OFDM que lo que hace es eliminar las componentes negativas que se tiene en la Figura 1-21, pero gracias a la simetría hermitiana, es tos valores negativos no se pierden, sino que son repetidos de una manera positiva en forma de espejo respecto al eje como se puede ver en la Figura 1-22.

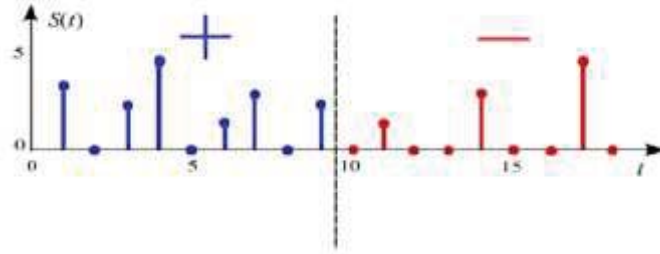


Figura 1-22: DCO-OFDM (fuente: PEÑAFIEL J., *Análisis de la tecnología Li-Fi: Comunicaciones por luz visible como punto de acceso a internet, una alternativa a la transmisión de datos en las comunicaciones inalámbricas*)

Desde una perspectiva de red, OFDM ofrece una aplicación de acceso múltiple sencillo utilizando subportadores las que se pueden asignar a los diferentes usuarios que resultan en división de frecuencia ortogonal de acceso múltiple (OFDMA).

OFDM

Multiplexación por división de frecuencia, la característica principal de estos sistemas es enviar un conjunto de ondas portadoras que llevan información a diferentes frecuencias, trabajan en tiempo discreto. Se modulan con QAM o PSK, para luego pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo con la transformada inversa de Fourier (IFFT).

Esta técnica permite dividir un canal de frecuencias en varias bandas de frecuencias equidistantes, cada una de ellas lleva una cierta cantidad de información manteniendo la ortogonalidad en la frecuencia, que es un punto muy importante ya que permite que la información no se sobre monte una con otra y que no haya interferencia. En la Figura 1-23 se muestra un canal OFDM.

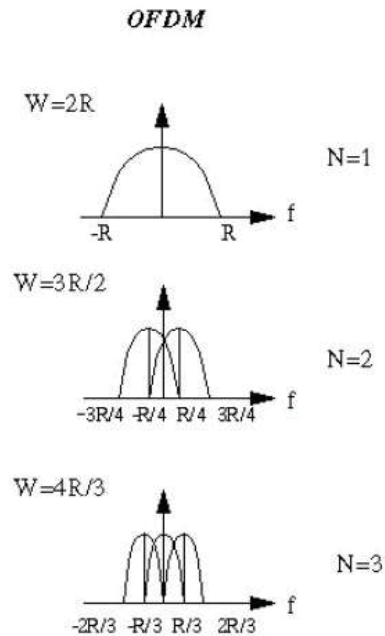


Figura 1-23: OFDM (fuente: Peñafiel J., *Análisis de la tecnología Li-Fi: Comunicaciones por luz visible como punto de acceso a internet, una alternativa a la transmisión de datos en las comunicaciones inalámbricas*)

Modulación QAM

La modulación por amplitud de cuadratura (QAM), esta modulación varía dos parámetros: la amplitud y la fase. El flujo de datos binarios que ingresan en serie son distribuidos en N símbolos, cada uno de estos símbolos contiene un número k de bits del flujo de entrada, los cuales forman una matriz ordenada y cada símbolo está equiespaciado el uno del otro. Como se puede observar en la Figura 1-24.

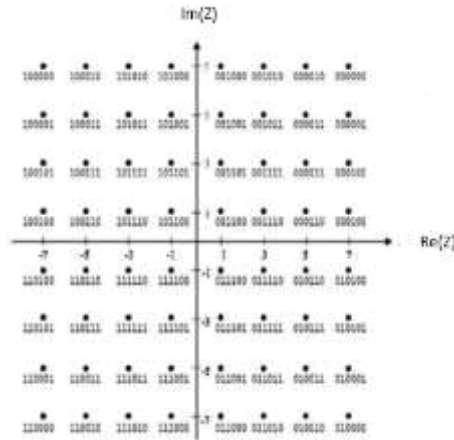


Figura 1-24: Constelación 64-QAM (fuente: Peñafiel J., *Análisis de la tecnología Li-Fi: Comunicaciones por luz visible como punto de acceso a internet, una alternativa a la transmisión de datos en las comunicaciones inalámbricas*)

Modulación Q-PSK

La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Q-PSK), es una modulación que varía el parámetro de la fase, de la misma manera está conformado por símbolos, cada símbolo tendrá 2 bits para este caso en particular y en cuadratura porque, cada uno de los símbolos están separados 90 grados uno con respecto al anterior. Como se puede observar en la Figura 1-25.

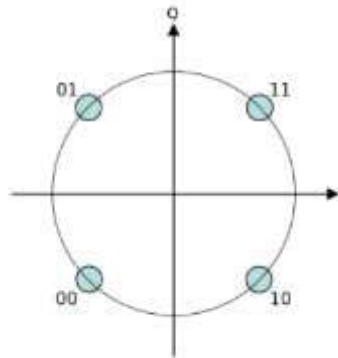


Figura 1-25: Constelación QPSK (fuente: Peñafiel J., *Análisis de la tecnología Li-Fi: Comunicaciones por luz visible como punto de acceso a internet, una alternativa a la transmisión de datos en las comunicaciones inalámbricas*)

Igual que para QAM también existen diferentes variantes para PSK en cuanto a las constelaciones como puede ser: 8-PSK, 16PSK, etc. En la Figura 1-26 se muestra una constelación 8-PSK con tres bits por símbolo, donde la velocidad de bit es 3 veces la velocidad de símbolo.

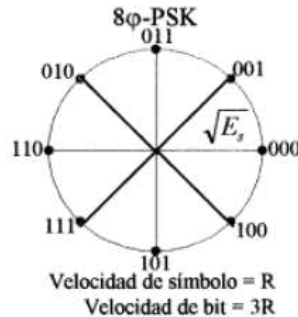


Figura 1-26: Constelación 8-PSK (fuente: Peñafiel J., *Análisis de la tecnología Li-Fi: Comunicaciones por luz visible como punto de acceso a internet, una alternativa a la transmisión de datos en las comunicaciones inalámbricas*)

Modulación M-PPM

La Modulación por Posición de Pulso, o en inglés, Pulse Position Modulation (PPM), En donde la Amplitud y el ancho son fijos y la posición es variable, es un tipo de modulación en la cual una palabra de M bits es codificada por la transmisión de un único pulso que puede encontrarse en alguna de las $2^N = M$ posiciones posibles, donde M corresponde al tipo de modulación PPM (M-PPM). Si esto se repite cada X segundos (tiempo de símbolo), la tasa de transmisión es de N/X bits por segundo. Este tipo de modulación se usa principalmente en sistemas de comunicación óptica, donde tiende a haber poca o ningún tipo de interferencia por caminos múltiples. En la Figura 1-27 se puede ver un ejemplo de modulación 2-PPM.

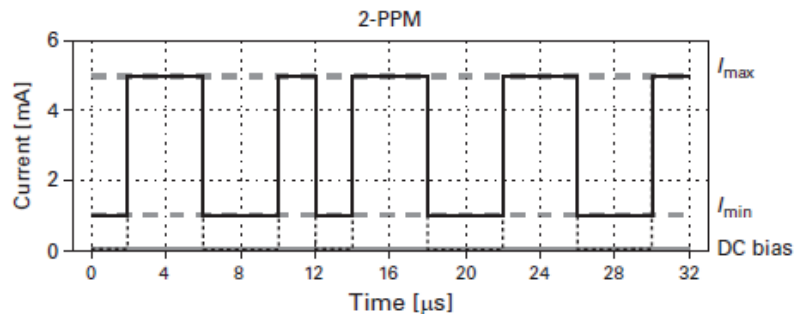


Figura 1-27: Modulación 2-PPM (fuente: S. Dimitrov, H. Haas, Principles of LED Light Communications)

Modulación M-PAM

La modulación PAM en donde la posición y el ancho quedan fijos y la amplitud es la que varía. En función del número de símbolos o amplitudes posibles se llama a la modulación M-PAM. Así podemos tener 2-PAM, 4-PAM, etc. En la Figura 1-28 se puede ver un ejemplo de modulación 4-PAM en donde es comparada con la modulación 4-PPM.

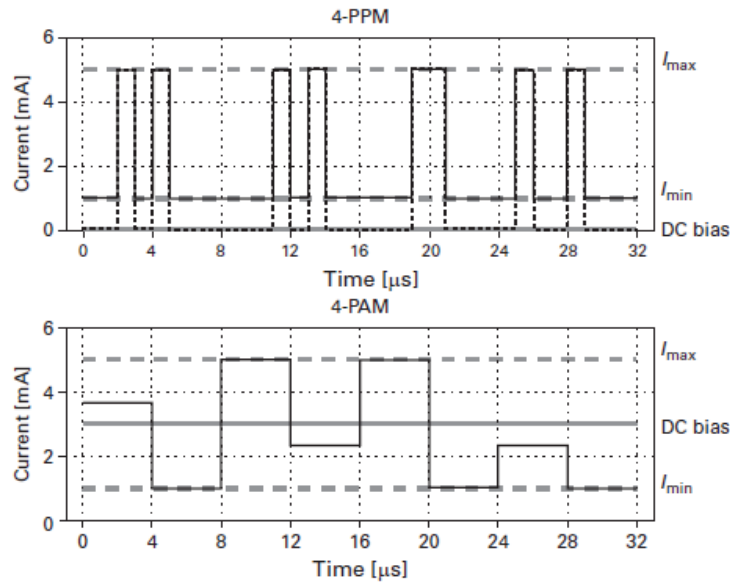


Figura 1-28: Modulación 4-PAM en comparación con la modulación 4-PPM (fuente: S. Dimitrov, H. Haas, Principles of LED Light Communications)

1.3 Dispositivos para sistemas vía Li-Fi

1.3.1 Transmisor

La etapa de transmisión consiste en la recepción de la señal digital al transmisor, el cual tiene la función de adecuar la señal para su óptima transmisión por el canal. La señal es modulada y luego transmitida por la ampollita LED.

Chip driver LED

Es el chip encargado de transmitir a múltiples receptores, ya que posee multi canales de transmisión, esto permite que la información pueda ser transmitida por varios transmisores ópticos a la vez. En la Figura 1-29 se puede apreciar un Chip Driver LED utilizado en Li-Fi.

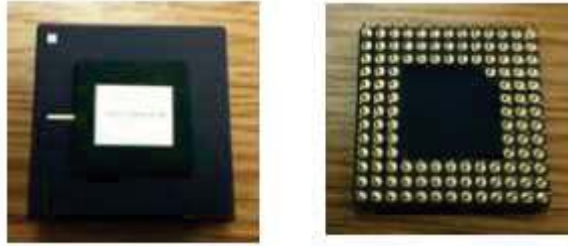


Figura 1-29: Chip Driver LED

Este chip no solo es el encargado de transmitir la información por múltiples canales, sino que también controla la intermitencia y brillo de la ampolla LED de acuerdo a la señal que se quiera transmitir. El chip es el elemento de que la lámpara LED transmita la información en forma correcta.

Driver LED

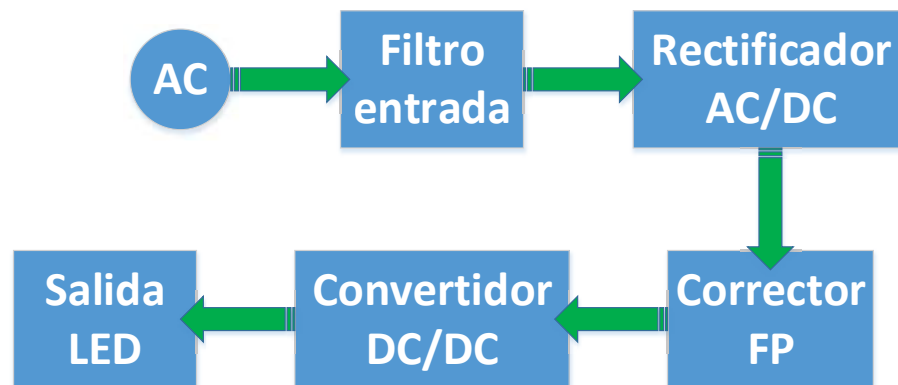


Figura 1-30: Driver LED (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 1-30 esquematiza al driver LED, el cual es el encargado de entregar la tensión necesaria para el correcto funcionamiento de la ampolla LED.

El driver LED consta de las siguientes partes:

Entrada: red de distribución: 220 [V], 50 [Hz]

Filtro: conformado por bobinas y condensadores que se encarga de disminuir las emisiones de alta frecuencia, filtro pasabajos. Este filtro contribuye a mejorar el factor de potencia al reducir la componente de alta frecuencia en la onda de corriente de alimentación. El filtro ayuda también a proteger los componentes electrónicos de sobretensiones.

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

Rectificación: Conformado por un puente de diodos donde se convierte la tensión alterna en continua.

Corrector factor de potencia: ayuda a mejorar la relación tensión-corriente evitando deformaciones para aproximarse al fp de 1

Convertidor AC/DC: esta etapa es fundamental en el driver LED ya que acomoda la tensión de salida a lo que se requiera. Se utilizan configuraciones Buck, boost, buck-boost y fly-back.

La etapa de salida: alimenta al LED con la tensión CC en el nivel requerido.

Ampolleta LED



Figura 1-31: Ampolleta LED sin driver (fuente: <http://visionled.cl/>)

Las lámparas LED operan a una temperatura de entre 0 a 40 [°C], a una tensión de alimentación de 12 [V] AC/DC, porque en AC utilizan un transformador electrónico y para DC utilizan un driver LED electrónico.

La Figura 1-31 muestra a la lámpara LED que funciona a baja tensión, la cual no tiene el driver LED incorporado, otorgan un blanco blanco cálido de 3000 [°K], neutro de 4000 [°K] y frío de 6000 [°K]. Su potencia de consumo es de entre 5,5 a 12 Watts.



Figura 1-32: Convertidor electrónico o driver LED (fuente: <http://www.masterled.es/>)

La Figura 1-32 muestra al convertidor electrónico, el cual sirve para disminuir la tensión de entrada de la red y rectificarla de AC a DC. Otorga una tensión de salida de 12 [V] CC y una corriente de salida de 0,1-1 [A].



Figura 1-33: Ampolleta LED con driver incorporado (fuente: <http://visionled.cl/>)

La Figura 1-33 muestra a la lámpara LED de tensión de red. Estas lámparas tienen incorporado el driver LED, su temperatura de funcionamiento es de 0 a 40 [°C].

Los dos tipos de lámparas LED utilizadas son para usos en interiores.

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

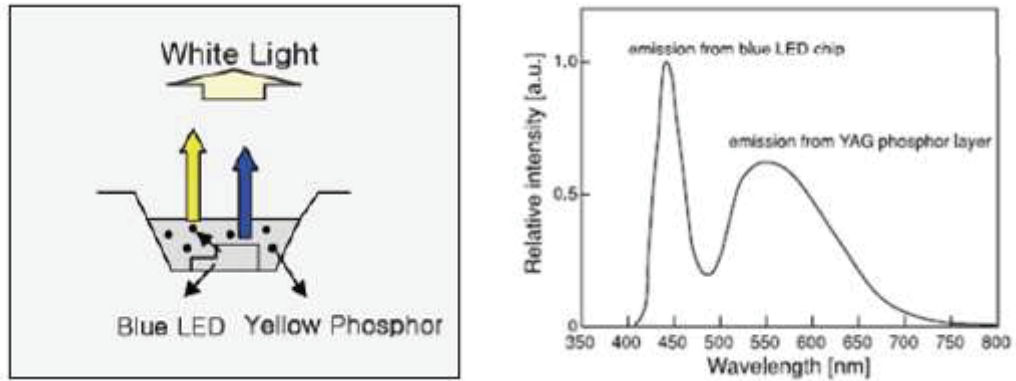


Figura 1-34: Características del LED blanco del tipo fluorescente (fuente: Project: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs))

Como se muestra en la Figura 1-34, este LED consta de un chip de luz azul el cual es recubierto con fósforo para lograr la luz blanca. Es de menor costo y complejidad que el LED RGB, sin embargo su velocidad de conmutación no es muy rápida debido al tiempo de caída que genera la presencia del fósforo.

La velocidad de transmisión de datos puede mejorar si se filtra la componente azul de la señal recibida permitiendo obtener velocidades de 100 [Mbps] con modulación OOK.

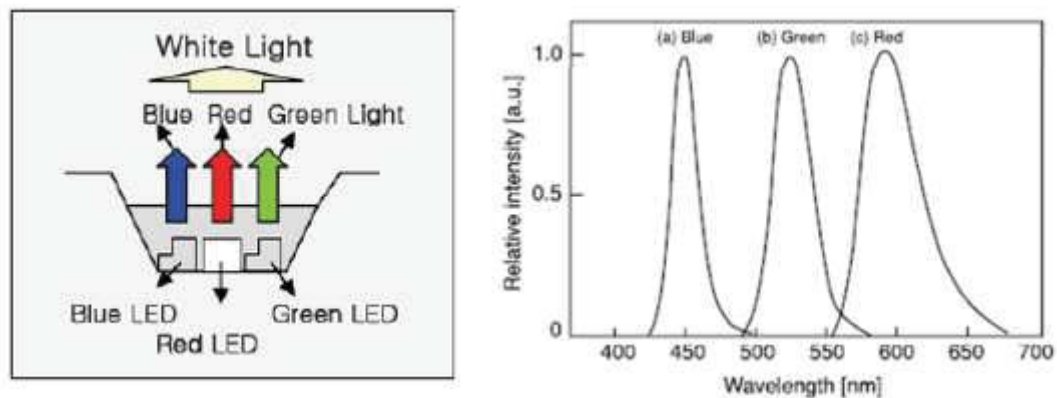


Figura 1-35: Características del LED blanco tipo RGB (fuente: Project: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs))

Como se muestra en la Figura 1-35, este Led consta de tres distintos emisores, el led rojo, el azul y el verde que combinados proporcionan la luz blanca

Es de mayor costo y complejidad que el LED fosforescente, sin embargo su velocidad de conmutación es mayor debido a los cortos tiempos de caída que proporcionan los leds.

1 Aspectos generales sobre posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

La velocidad de transmisión de datos puede mejorar si se filtra la componente azul de la señal recibida permitiendo obtener velocidades de 100 [Mbps] con modulación OOK.

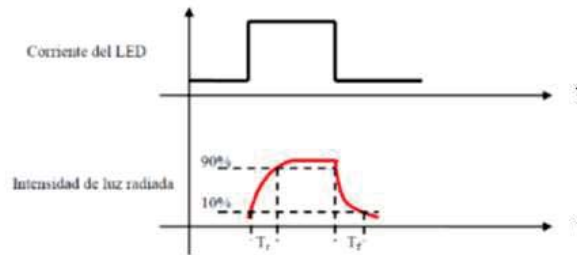


Figura 1-36: Intensidad de luz radiada por el LED en función de la corriente aplicada al LED (fuente: Morales N., *Diseño y simulación de las etapas de equalización para transmisión y recepción del sistema de comunicación por luz visible (VLC) con modulación OOK utilizando filtros digitales*)

La función del driver LED consiste en amplificar la corriente del LED lo que permite modular la señal OOK en intensidad tal como se muestra en la Figura 1-36. Así se entiende que el controlador no corta la corriente del LED, sino que sólo modifica su amplitud (de la corriente) de forma que esté por sobre o debajo de su umbral de conducción. De esta forma, el driver LED es nuestro convertidor eléctrico-óptico, permitiendo que el foco entregue la información al receptor a través del medio.

También se debe considerar que el LED de fósforo tiene un tiempo de respuesta que no debe ser superado, es decir, si la velocidad de conmutación es mayor que el tiempo de respuesta del LED, simplemente habrá un error.

1.3.2 Receptor

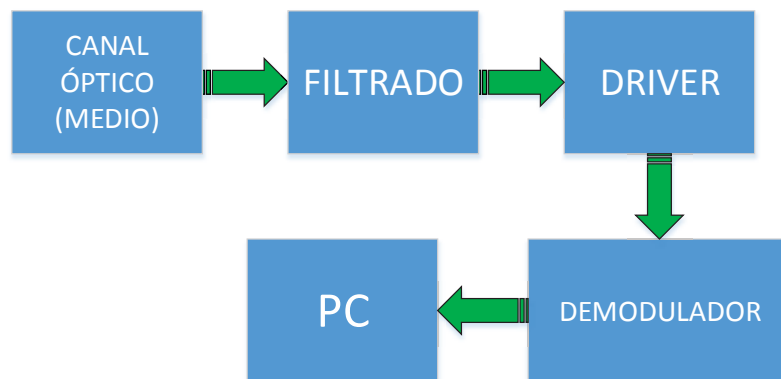


Figura 1-37: Etapa de recepción del sistema (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 1-37 muestra la etapa de recepción del sistema de transmisión inalámbrico óptico. En el caso del lado receptor, la información que viaja por el medio pasa por un filtro para que sólo deje pasar la longitud de onda correspondiente a la luz azul.

Filtro azul

Corresponde a un filtro pasa banda que transmite luz en una región espectral estrecha, bien definida, mientras rechaza otra radiación no deseada. La Figura 1-38 muestra el filtraje de la señal receptionada, este filtro crea una banda de paso que permite pasar una longitud de onda determinada rechazando a las demás.

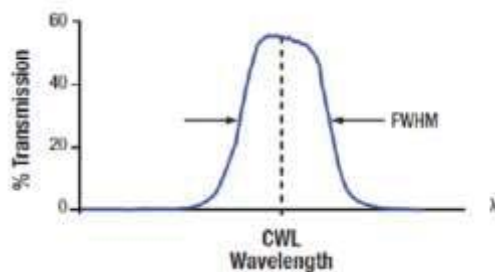


Figura 1-38: Filtro pasa banda

Donde:

CWL: Longitud de onda central

FWHM: Banda de paso

Fotodetector

Corresponde a los dispositivos que transforman la intensidad luminosa en una señal eléctrica. Los fotodetectores más utilizados son los fotodiodos, éstos son adecuados para un sistema de comunicaciones e alta velocidad, debido fundamentalmente, al escaso ancho de banda.

Fotorresistencia LDR (Light Dependent Resistor), permite detectar la presencia de luz en el entorno, se compone de una resistencia que cambia su valor dependiendo de la cantidad de luz que esté incidiendo sobre su superficie. Cuanta más luz reciba, menor es su resistencia. Su tiempo de respuesta típico está en el orden de una décima de segundo.

Existen dos tipos de fotodiodos:

Fotodiodo PIN (Positive-Intrinsic-Negative), trabajan con principios similares a los LED, pero en sentido contrario. La luz entra al diodo por una ventana muy pequeña y es absorbida por el material intrínseco, el cual agrega la energía suficiente para lograr que los electrones se muevan de la banda de valencia a la banda de conducción y se generen portadores de carga eléctrica que permiten que una corriente fluya a través del diodo.

Fotodiodo Avalancha APD (Avalanche Photodiode), son dispositivos similares a los fotodiodos PIN, pero proporciona ganancia a través de un proceso de amplificación: un fotón que actúa en el dispositivo suelta muchos electrones, debido al gran campo eléctrico generado por la polarización inversa, los electrones adquieren velocidades muy altas y al chocar con otros electrones de otros átomos, hacen que estos se ionicen. Estos átomos ionizan a otros átomos, desencadenando un efecto de avalancha de corriente fotoeléctrica.

1.4 Unidades empleadas para la medición de la luz

Las fuentes de luz proyectan su flujo luminoso con distinta intensidad según la dirección en el espacio. La intensidad con la que se proyecta la luz en una determinada dirección se denomina intensidad luminosa.

1.4.1 Intensidad luminosa

Se define como la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por ángulo sólido. La unidad en que se mide en el S.I. es la candela [cd].

1.4.2 Flujo luminoso

Es una medida de la potencia luminosa emitida por la fuente.

Se puede interpretar el lumen de forma menos rigurosa como una medida de la "cantidad" total de luz visible en un ángulo determinado, o emitida por una fuente dada.



Figura 1-39: Flujo luminoso (fuente: <http://www.velamym.com>)

Su unidad de medida es el lumen [lm] en el S.I.

Equivale a toda la emisión que produce una fuente.

Se usa en la fotometría como medida de la luminancia, tomando en cuenta las diferentes longitudes de onda según la función de luminosidad, un modelo estándar de la sensibilidad del ojo humano a la luz.

Una iluminancia de 1[lx] correspondería a la iluminación de una superficie de 1[m] x 1[m] con un flujo uniforme de 1[lm] como se aprecia en la Figura 3-48.



Figura 1-40: Iluminancia (fuente: <http://www.velamym.com>)

El lux [lx] equivale a un lumen por metro cuadrado ($1 \text{ [lx]} = 1 \text{ [lm/m}^2\text{]}$).

Indica qué cantidad de flujo recibe una superficie concreta.

Se diferencia del lumen porque el lux toma en cuenta la superficie sobre la que el flujo luminoso se distribuye.

1.5 Propuesta

Para el diseño de un sistema de posicionamiento de interiores vía Li-Fi se propone utilizar detección de posición por proximidad, ya que dependiendo de donde se encuentre el usuario dentro del espacio de algún transceptor es la ubicación que éste tendrá. Para el diseño de un sistema de comunicación de interior vía Li-Fi se propone utilizar la configuración del enlace de OWC del tipo LOS dirigida, dado que es una de las más simples de implementar y dado el espacio entre un transceptor y otro no habría interferencia de señales de comunicación. Respecto a la modulación del sistema de comunicación vía Li-Fi, se propone utilizar la modulación de la intensidad de la señal con detección directa de ésta. Se modulará la amplitud de la señal de luz la cual permitirá aumentar el volumen de una señal de audio, la cual será recepcionada por el usuario mediante un dispositivo electrónico llamado LDR, el cual se componen de una resistencia que cambia de valor dependiendo de la cantidad de luz que incide sobre este dispositivo.

2 Diseño de un sistema de posicionamiento en interiores vía Li-Fi

El sistema de posicionamiento en interiores a implementar hace uso de la luz infrarroja, en donde este sistema permite la detección de algún posible receptor. El sistema en sí consta de dos transeptores y un usuario los cuales tienen la capacidad de transmitir y recibir códigos infrarrojos creando un sistema bidireccional. Los códigos a utilizar en el espectro infrarrojo se basan en el protocolo de comunicación NEC, para la comunicación mediante este protocolo con Arduino hay librerías que ayudan a realizar dicha comunicación [15-16].

2.1 Protocolo NEC

El protocolo NEC utiliza pulsos a distancia para la transmisión de un código [17]. Cada ráfaga de pulsos tiene una duración de 562.5 [µs] a una frecuencia de 38 [kHz]. Para transmitir los bits correspondientes al código, lo hace de la siguiente manera:

- **0 lógico:** Envía un pulso de 562.5 [µs], seguido de un espacio de 562.5 [µs] de duración, con un tiempo de transmisión de 1.125 [ms].

- **1 lógico:** Envía un pulso de 562.5 [µs] seguido de un espacio de 1.6875 [ms] de duración, con un tiempo de transmisión de 2.25 [ms].

Al pulsar una tecla del mando, el código se compone de la siguiente cadena de pulsos:

- 1- Una ráfaga de pulsos de 9 [ms]
- 2- Un espacio 4.5 [ms]
- 3- La dirección para el dispositivo receptor (8 bits)
- 4- El inverso lógico de la dirección (8 bits)
- 5- El comando (8 bits)
- 6- El inverso lógico del comando (8 bits)
- 7- Un pulso de 562.5 [µs] para indicar el final de la transmisión del mensaje.

2 Diseño de un sistema de posicionamiento en interiores vía Li-Fi

La Figura 2-1 ilustra perfectamente el mensaje transmitido en la pulsación de una tecla de un mando a distancia para una dirección 00000000b y un comando 10110101b donde el envío de los cuatro bytes de datos se realiza enviando primero los bits menos significativos.

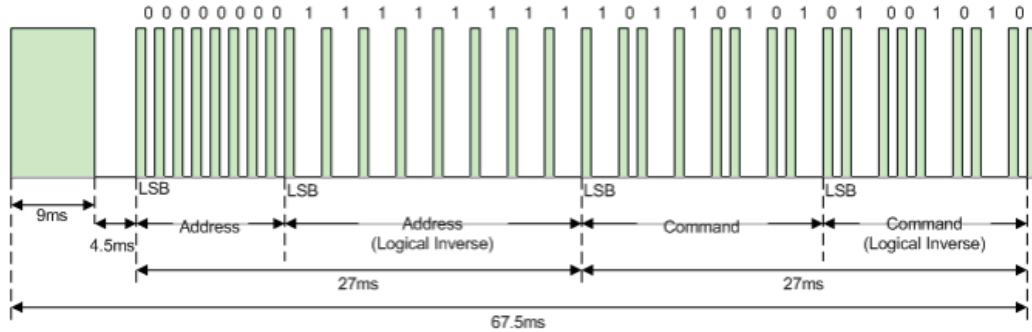


Figura 2-1: Código transmitido mediante el protocolo NEC (fuente: <https://electronicavm.net>)

2.2 Detección de la posición por proximidad

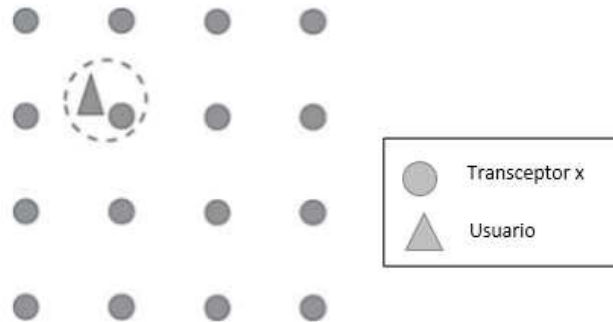


Figura 2-2: Detección de la posición por proximidad (fuente: S. Arnon, Visible Light communication)

La Figura 2-2 muestra que la detección de la posición del usuario está dada por la proximidad que éste tiene con el transceptor x, el cual en este proyecto puede ser el transceptor 1 o 2. Cada transceptor no interfiere con su más próximo transceptor como lo muestra la Figura 2-2 con el círculo con líneas discontinuas.

2.3 Implementación

El sistema de posicionamiento en interiores consta de dos transceptores separados espacialmente los cuales cumplen la función de transmitir códigos infrarrojos denominados códigos de posicionamiento para detectar proximidad con un posible usuario. El usuario es un transceptor en movimiento el cual dependiendo de la posición espacial en la que se encuentre emite un código de conexión, dado que dependiendo del código de posicionamiento recepcionado y reconocido por este usuario es que emite el código de conexión que permite al transceptor 1 o 2, dado el caso, reaccionar a tal señal y dar una señal de que el usuario está posicionado en el espacio del transceptor 1 o 2.

La Figura 2-3 muestra un esquema del sistema de posicionamiento en interiores donde las flechas rojas que salen de los transceptores 1 y 2 son los códigos de posicionamiento correspondientes a cada transceptor. El usuario responde al código de posicionamiento transmitiendo un código de conexión el cual depende del espacio en el que se encuentre posicionando.

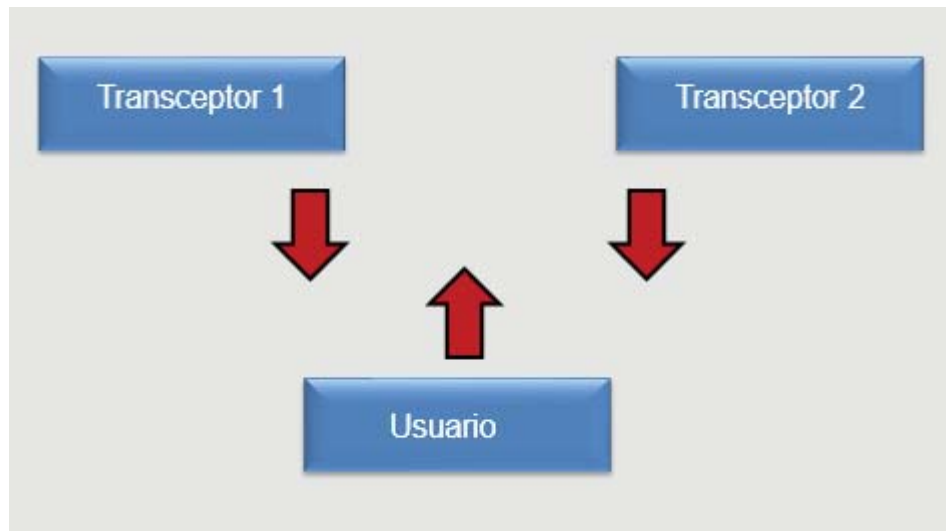


Figura 2-3: Diagrama en bloques del sistema de posicionamiento (elaborado por: Pablo Caro)

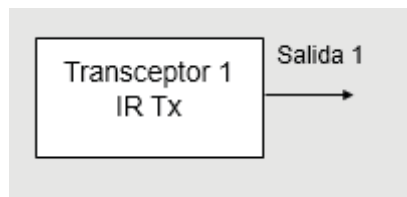


Figura 2-4: Diagrama en bloques del transceptor 1 IR Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-4 muestra el diagrama en bloques del transceptor 1 IR Tx el cual corresponde al bloque del transceptor 1 que transmite el código infrarrojo de posicionamiento denotado por la salida 1.

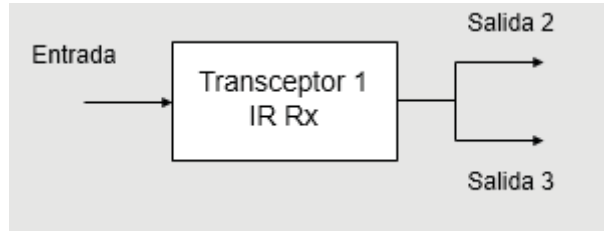


Figura 2-5: Diagrama en bloques del transceptor 1 IR Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-5 muestra el diagrama en bloques del transceptor 1 IR Rx el cual recibe el código de conexión que emite el usuario, desglosado más adelante. Este código de conexión provoca dos salidas simultáneas que corresponden al LED rojo y al LED amarillo respectivamente del sistema 1.

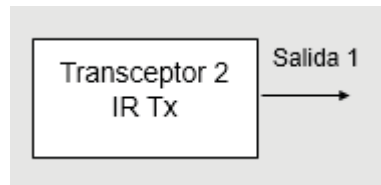


Figura 2-6: Diagrama en bloques del transceptor 2 IR Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-6 muestra el diagrama en bloques del transceptor 2 IR Tx el cual corresponde al bloque del transceptor 2 que transmite el código infrarrojo de posicionamiento denotado por la salida 1.

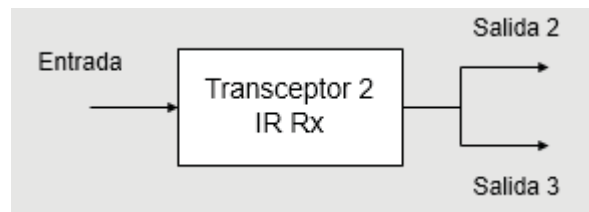


Figura 2-7: Diagrama en bloques del transceptor 2 IR Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-7 muestra el diagrama en bloques del transceptor 2 IR Rx el cual recepciona el código de conexión que emite el usuario, desglosado más adelante. Este código de conexión provoca dos salidas simultaneas que corresponden al LED rojo y al LED azul respectivamente del sistema 2.

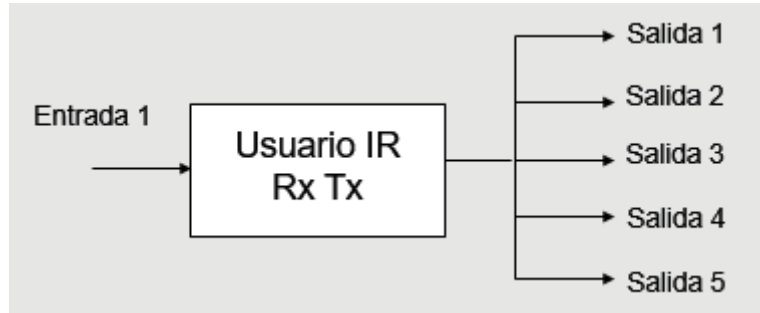


Figura 2-8: Diagrama en bloques del usuario IR Rx Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-8 muestra el diagrama en bloques del usuario IR Rx Tx el cual recepciona el código de posicionamiento emitido por el sistema 1 o 2 dependiendo de la posición del usuario. La salida 1 que corresponde al LED rojo siempre se activará ante cualquier señal infrarroja, las salidas 2 y 3 que corresponde a los LED amarillo y azul respectivamente se activarán de acuerdo al código de posicionamiento que recepcionen del sistema en el que se encuentren espacialmente. La salida 4 es un display de 7 segmentos el cual muestra con un dígito el transceptor en el que se encuentra el usuario, 1 o 2. Cuando el usuario no está posicionado en ninguno de los dos transceptores, este display se apaga. La salida 5 es la emisión del código de conexión que debe recepcionar el transceptor 1 o 2.

2.4 Diagramas electrónicos del sistema de posicionamiento en interiores

2.4.1 Transceptor 1

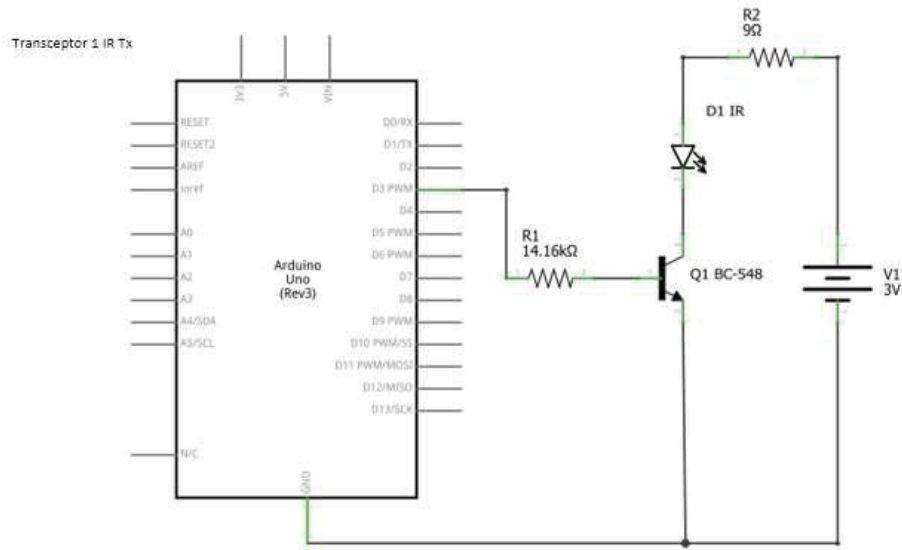


Figura 2-9: Transceptor 1 IR Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-9 muestra el circuito del transceptor 1 IR Tx el cual consta de un Arduino Uno que cumple la función de transmitir el código de posicionamiento por el PIN digital 3 a través de la base del transistor Q1 del tipo BC-548 NPN que amplifica la señal de la base hasta en 420 veces. Cada PIN digital de Arduino proporciona una corriente máxima de 40 [mA] la cual es insuficiente para transmitir un código infrarrojo a una distancia mayor a 2 metros por lo que se dispone del transistor alimentado de forma externa por una fuente de 3[V] que permite proporcionar al LED infrarrojo un peak de 100 [mA] lo que en forma experimental permite aumentar la distancia de transmisión de la señal infrarroja.

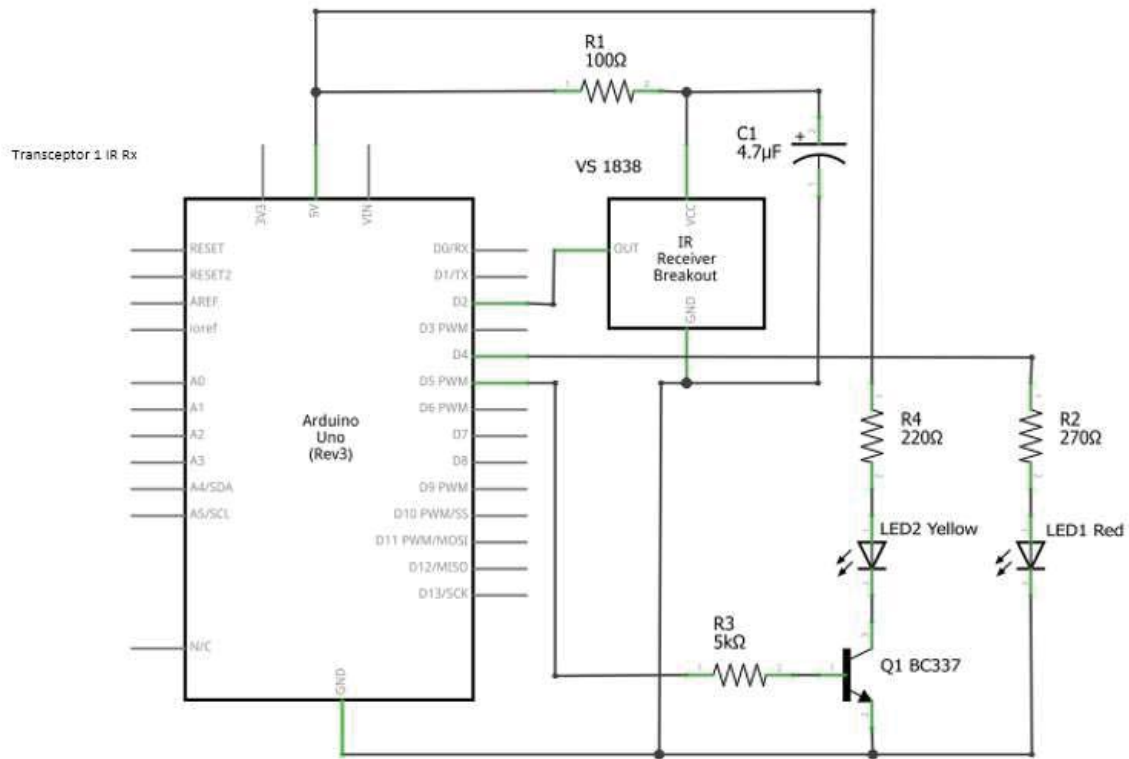


Figura 2-10: Transceptor 1 IR Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-10 muestra el circuito del sistema 1 IR Rx que consta de un Arduino Uno independiente del Arduino Uno del sistema 1 IR Tx. Este Arduino permite procesar el código de conexión que emite el usuario al encontrarse posicionado con el transceptor 1. El diagrama del circuito muestra un sensor receptor de infrarrojo del tipo VS 1838 que permite recibir señales infrarrojas de 38 [kHz].

2.4.2 Transceptor 2

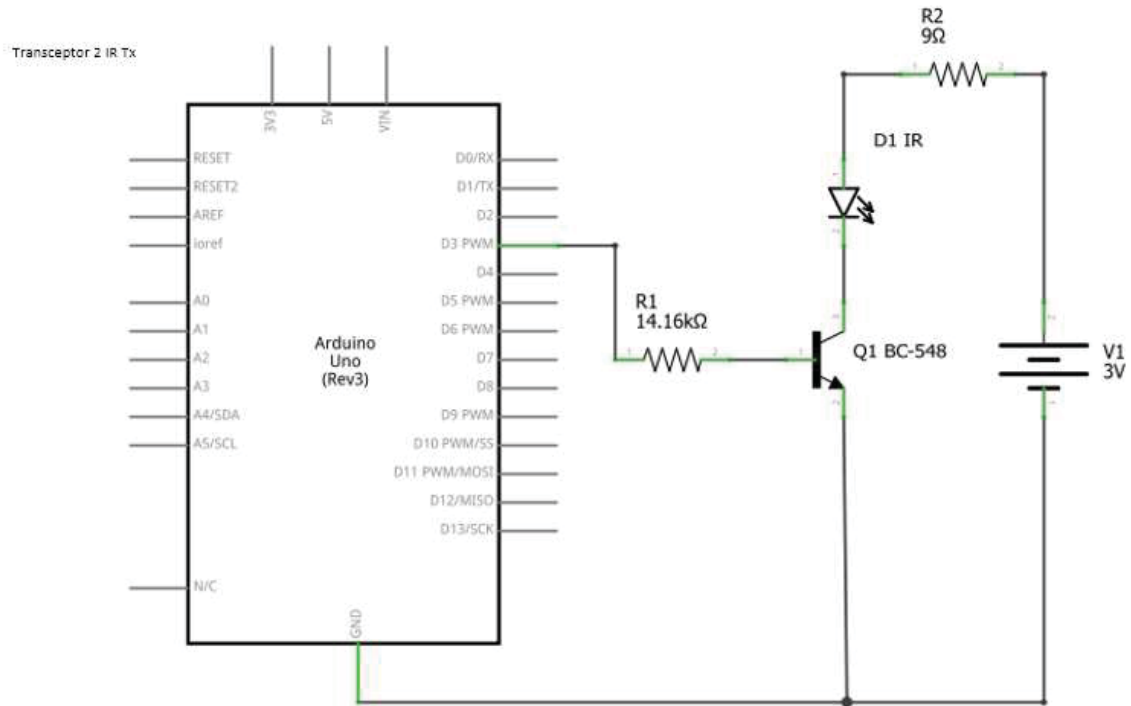


Figura 2-11: Sistema 2 IR Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-11 muestra el esquema del transceptor 2 IR Tx el cual se encarga de transmitir el código de posicionamiento del transceptor 2. Esta señal es amplificada por el transistor BC-548 que permite aumentar la distancia de alcance de la señal infrarroja.

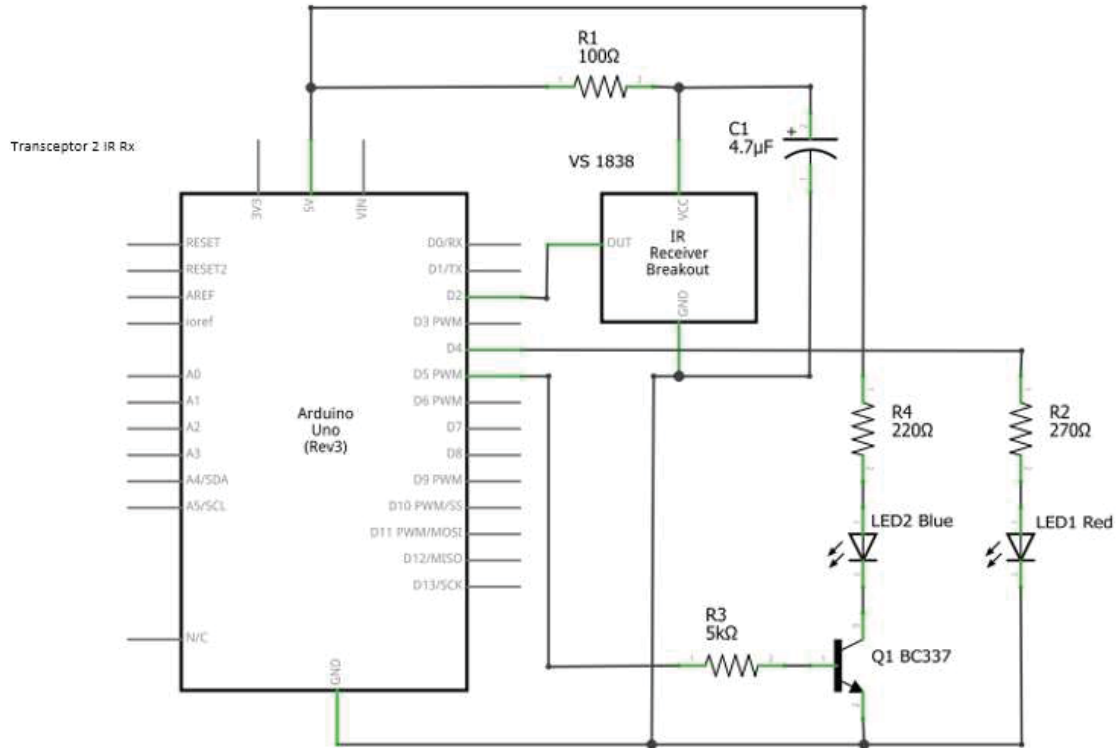


Figura 2-12: Transceptor 2 IR Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-12 muestra el circuito del transceptor 2 IR Rx que consta de un Arduino Uno independiente del Arduino Uno del transceptor 2 IR Tx. Este Arduino permite procesar el código de conexión que emite el usuario al encontrarse posicionado con el transceptor 2. El transceptor consta de un sensor de infrarrojo VS 1838 y dos LEDs, donde el LED rojo se enciende al detectar cualquier señal infrarroja de 38 [kHz] y el LED azul se activa solo al detectar el código de conexión correcto que emite el usuario.

2.4.3 Usuario

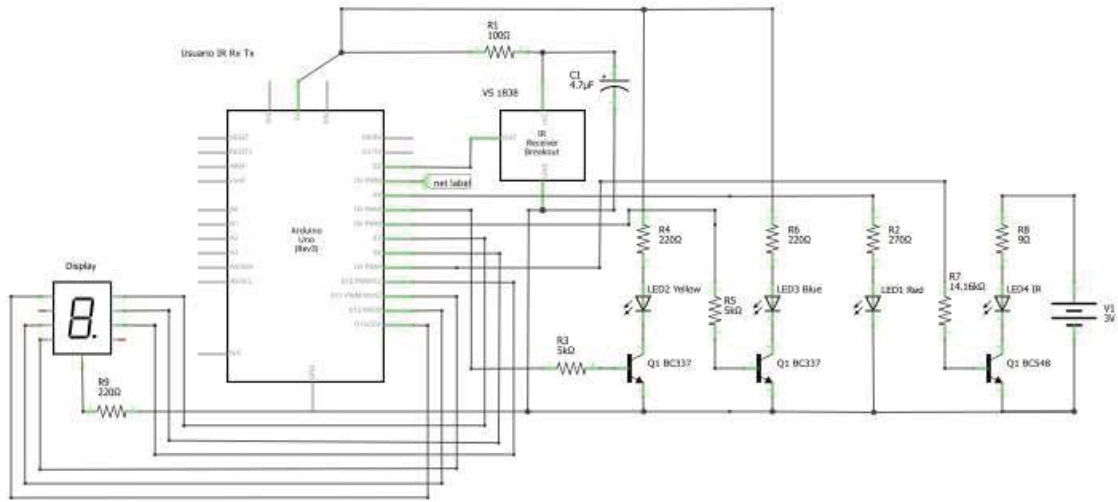


Figura 2-13: Usuario IR Rx Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 2-13 muestra el circuito electrónico del usuario el cual consta de un módulo receptor de señales infrarrojas y un módulo transmisor de infrarrojo. Dichas señales son procesadas por un solo Arduino, el cual para el caso experimental permite mejor movilidad del sistema en sí. Dado que el proyecto consta de dos transceptores fijos, es la disposición del LED amarillo y del LED azul. El LED amarillo responde al código de posicionamiento del transceptor 1 y el LED azul al del transceptor 2, el LED rojo permite darse cuenta de que el usuario está recepcionando señales infrarrojas que pueden corresponder a códigos de posicionamiento o a códigos que no han sido bien recepcionados. El LED infrarrojo es el encargado de transmitir al canal de comunicación, el aire, la señal óptica del código de conexión, donde está señal es amplificada por el transistor Q1 del tipo BC-548 NPN alimentado de forma externa por una fuente de 3 [V]. Cabe destacar que este circuito dispone de un display de 7 segmentos el cual permite ver el sistema del que es recepcionado el código de posicionamiento. Cuando no se recibe ningún código o el usuario no se encuentra posicionado en ninguno de los sistemas este display se apaga.

2.5 Conclusiones

Mediante el diseño del sistema de posicionamiento se pudo lograr un sistema bastante preciso. La amplificación de la señal infrarroja permitió aumentar la distancia de recepción de dicha señal por el usuario. La utilización del dispositivo electrónico VS 1838, el que consta de bastante electrónica integrada, ayudó de manera satisfactoria en la recepción de la señal emitida por el transceptor. Antes de contar con el VS 1838 la detección de la señal infrarroja era demasiado baja, teniendo que acercarse al usuario al transceptor a una distancia de centímetros para que la señal infrarroja emitida por éste fuera recepcionada satisfactoriamente por el usuario dado que

2 Diseño de un sistema de posicionamiento en interiores vía Li-Fi

con el aumento de la distancia entre usuario y transceptor la señal infrarroja era recibida con demasiado ruido haciendo casi imposible de procesar.

3 Diseño de un sistema de comunicación en interiores vía Li-Fi

El sistema de comunicación en interiores hace uso de la modulación de intensidad con detección directa (Intensity Modulation / Direct Detection, IM/DD) donde la información a transmitir es modulada directamente en la potencia óptica que emite en LED en el instante, recuperándose la información transmitida por el canal por detección directa de un fotoreceptor. Esta señal es, posteriormente, amplificada y transmitida al usuario por un altavoz pequeño.

3.1 Implementación

El sistema de comunicación en interiores consta de dos transceptores separados espacialmente los cuales cumplen la función de transmitir información por luz visible en forma unidireccional a un usuario móvil.

La Fig. 3-1 muestra un esquema del sistema de comunicación en interiores donde las flechas blancas que salen de los transceptores 1 y 2 es la información correspondiente a cada transceptor. El usuario recibe esta información en forma de luz visible y la convierte en una señal eléctrica que es amplificada y transformada a una señal audible.

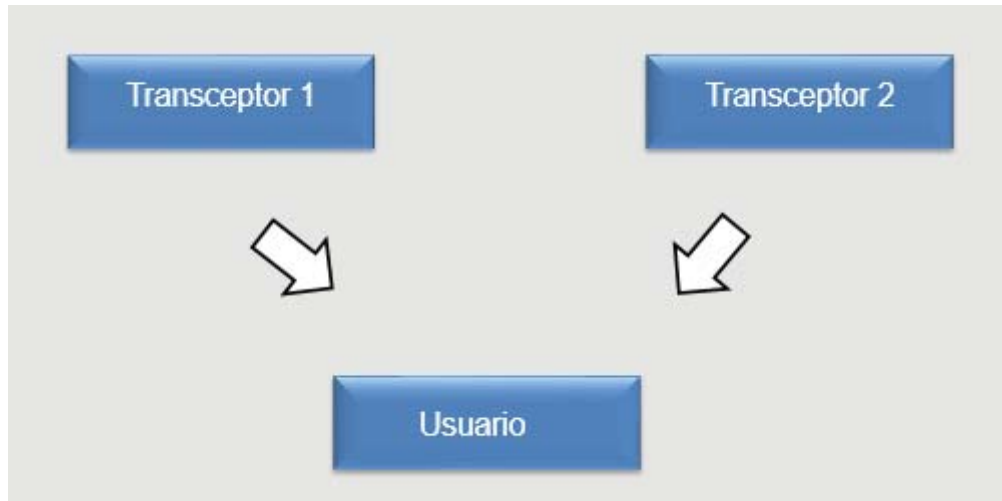


Figura 3-1: Sistema de comunicación en interiores (elaborado por: Pablo Caro)

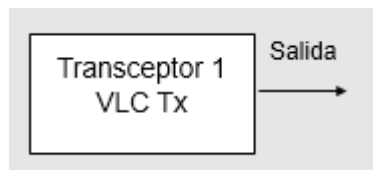


Figura 3-2: Diagrama en bloques del transceptor 1 VLC Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 3-2 muestra el diagrama de bloques del transceptor 1 VLC Tx el que emite una señal óptica, donde un LED blanco cambia de intensidad de acuerdo a la señal eléctrica que debe transmitir.

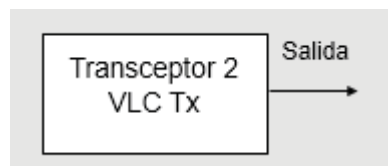


Figura 3-3: Diagrama en bloques del transceptor 2 VLC Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 3-3 muestra el diagrama de bloques del transceptor 2 VLC Tx que transmite una señal en forma de luz visible, donde el LED blanco cambia de intensidad de acuerdo a la señal eléctrica que debe transmitir.

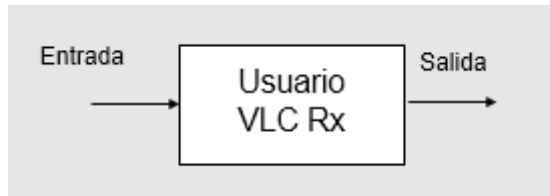


Figura 3-4: Diagrama en bloques del usuario VLC Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 3-4 muestra el diagrama en bloques del usuario VLC Rx el cual recibe la señal de audio transmitida por luz visible en la entrada. Su salida corresponde a la señal de audio audible en un parlante de 8[Ω] [W].

3.2 Diagramas electrónicos del sistema de comunicación en interiores

3.2.1 Transceptor 1

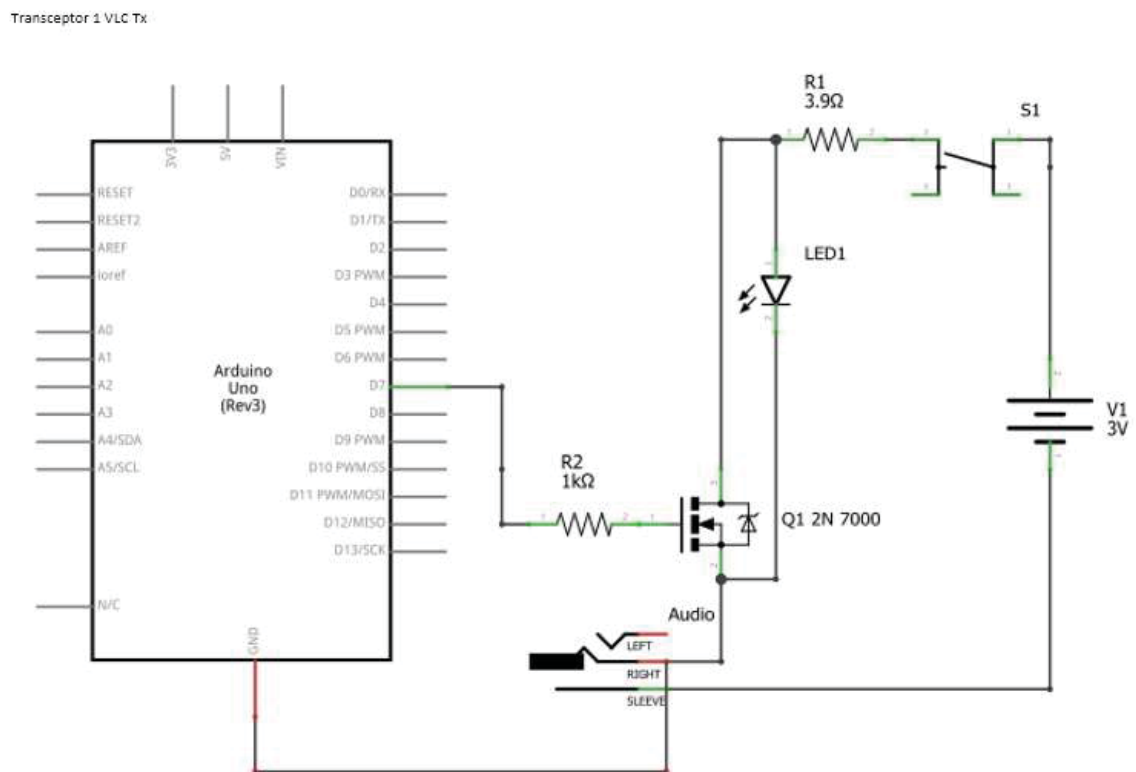


Figura 3-5: Transceptor 1 VLC Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 3-5 muestra el circuito del transceptor 1 VLC Tx el cual transmite la señal de audio por un enlace de luz visible con el usuario.

3.2.2 Transceptor 2

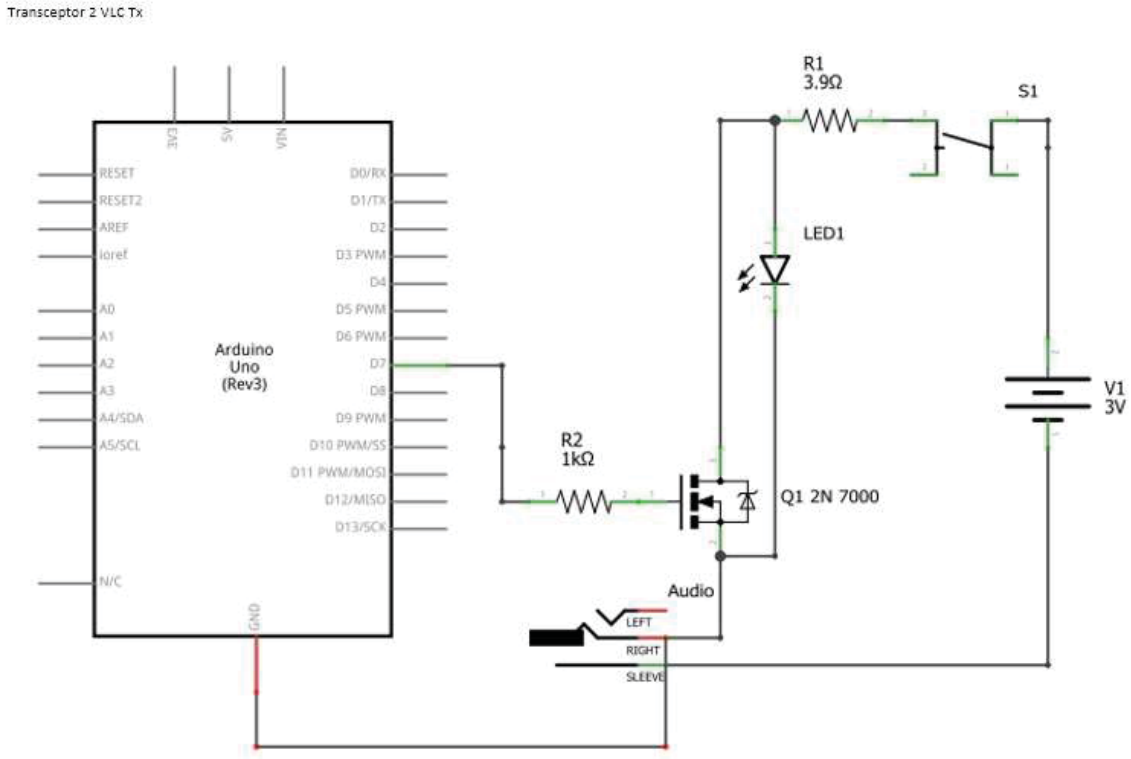


Figura 3-6: Transceptor 2 VLC Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 3-6 muestra el circuito del transceptor 2 VLC Tx el cual transmite la señal de audio por un enlace de luz visible con el usuario.

3.2.3 Usuario

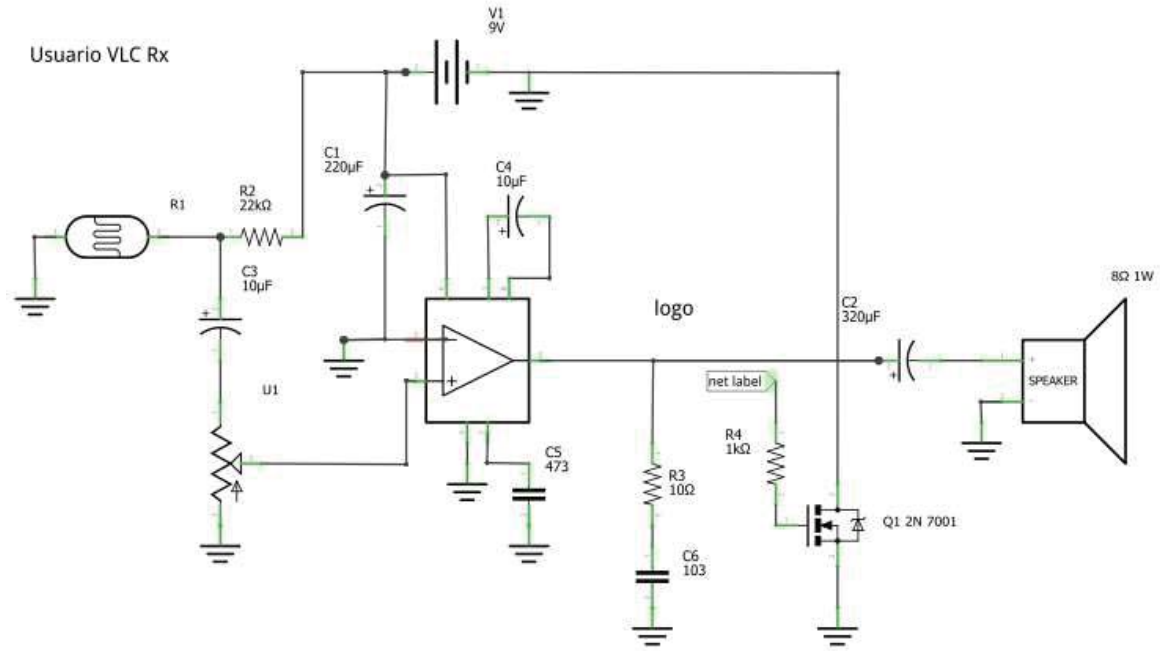


Figura 3-7: Usuario VLC Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 3-7 muestra el diagrama electrónico del usuario VLC Rx el cual recibe la señal que emite uno de los dos transceptores fijos por luz visible. El dispositivo LDR permite detectar las variaciones de intensidad del LED de los s transceptores 1 o 2 dependiendo del caso, donde la señal es amplificada por un amplificador del tipo LM 386. La señal amplificada es traspasada a un altavoz de 8[Ω] 1[W] de potencia.

3.2.4 Conclusiones

El diseño del sistema de comunicación en interiores vía Li-Fi se vio beneficiado con el empleo de una ampollita LED de mayor tamaño que un LED convencional de 5 [mm], ya que la ampollita LED a utilizar lograba una potencia luminosa de 45 lúmenes lo cual ayudó enormemente a que la distancia entre transceptor y usuario aumentará sin la adición de tanto ruido del canal de comunicación. El diseño de la recepción de la señal luminosa y su posterior transformación a una señal de audio se vio potenciada con el dispositivo electrónico LM 386, ya que, al ser este dispositivo de regular utilización, su configuración para una señal de audio no fue tan complicada de implementar. Uno de los inconvenientes suscitados al momento de la

3 Diseño de un sistema de comunicación en interiores vía Li-Fi

implementación de la etapa de recepción de la señal de audio fue la de mucho ruido externo al momento de dejar de recibir la señal de luz por parte del transceptor, la cual fue rápidamente detectada, dado que fuentes luminosas externas eran detectadas por el dispositivo LDR lo cual generada una señal molesta al oído.

4 Diseño de un sistema de posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

El sistema completo integrando el sistema de posicionamiento y el de comunicación en interiores tiene como finalidad transmitir información de acuerdo a la posición de los transceptores 1 o 2 en la que se encuentre el usuario.

4.1 Diagrama del sistema de posicionamiento por luz infrarroja y comunicación por luz visible

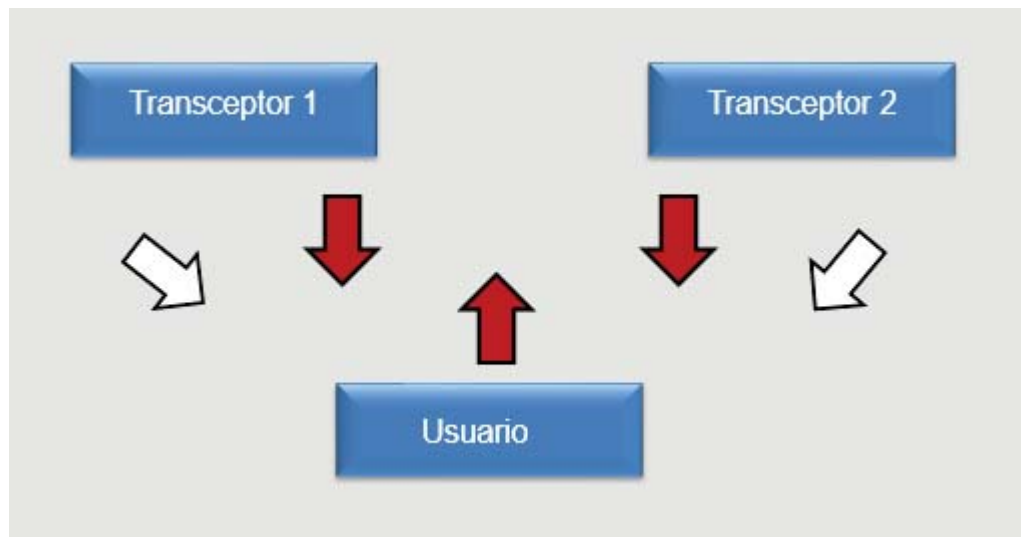


Figura 4-1: Diagrama del sistema de posicionamiento por luz infrarroja y comunicación por luz visible (elaborado por: Pablo Caro)

En la Figura 4-1 el transceptor 1 y el transceptor 2 mantienen comunicación con el usuario en forma bidireccional lo que corresponde al sistema de posicionamiento por luz

infrarroja (flechas rojas en la Figura 4-1). Los transceptores 1 y 2 no se interfieren entre sí, dado que mantienen una distancia de separación espacial que evita dicha interconexión entre estos dos transceptores y donde cada uno es independiente del otro. Estos transceptores son fijos.

Los transceptores 1 y 2 al realizar la comunicación por luz visible (flechas blancas en la Figura 4-1) se establece ésta en forma unidireccional con el usuario, donde al igual que el posicionamiento por luz infrarroja los dos transceptores mantienen espacios dedicados.

El usuario es un transceptor en movimiento el cual dependiendo de la posición espacial en la que se encuentre emite un código de conexión que depende del código de posicionamiento. Cuando el código de posicionamiento no es conocido por el usuario, éste no emite código de conexión, dado que dependiendo del código de posicionamiento recepcionado y reconocido por este usuario es que emite el código de conexión que permite al transceptor 1 o 2, dado el caso, reaccionar a tal señal y emitir la información por luz visible.

4.2 Diagrama en bloques del transceptor 1

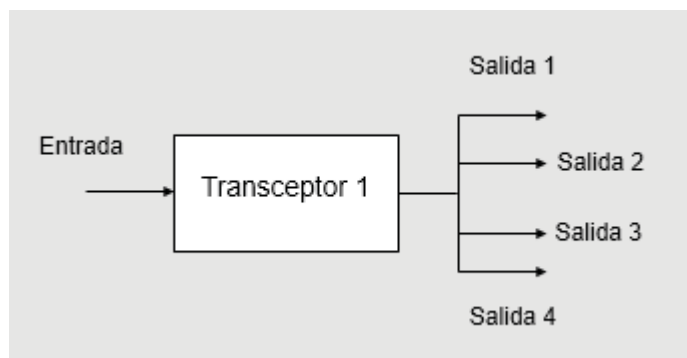


Figura 4-2: Diagrama en bloques del transceptor 1 (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 4-2 muestra el diagrama de bloques del transceptor 1 el cual consta de una entrada y cuatro salidas. La salida 1 corresponde al código infrarrojo de posicionamiento, la salida 2 es la que corresponde al LED rojo y ésta se hace presente al captar cualquier señal infrarroja que llegue al transceptor 1. Por el contrario, la salida 3 solo se hace presente al recepcionar de entrada el código de posicionamiento correcto, el cual activará dicha salida. la salida 4 es el audio emitido por luz, donde el LED blanco cambia de intensidad de acuerdo a la señal eléctrica que debe transmitir.

4.3 Diagrama en bloques del transceptor 2

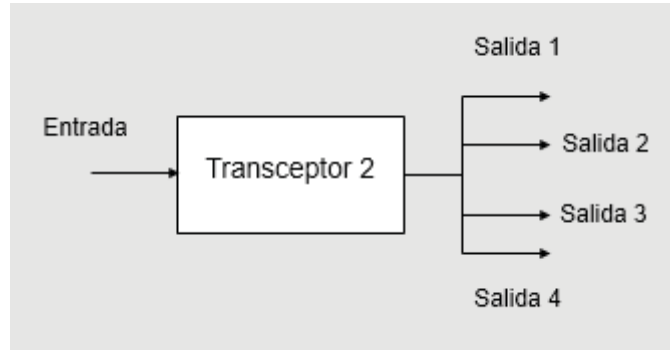


Figura 4-3: Diagrama en bloques del transceptor 2 (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 4-3 muestra el diagrama de bloques del transceptor 2 que, al igual que el transceptor 1, consta de una entrada y cuatro salidas. La salida 1 corresponde al código infrarrojo de posicionamiento, la salida 2 es la que corresponde al LED rojo y ésta se hace presente al captar cualquier señal infrarroja que llegue al transceptor 1. Por el contrario, la salida 3 solo se hace presente al recepcionar de entrada el código de posicionamiento correcto, el cual activará dicha salida. la salida 4 es el audio emitido por luz, donde el LED blanco cambia de intensidad de acuerdo a la señal eléctrica que debe transmitir.

4.4 Diagrama en bloques del usuario

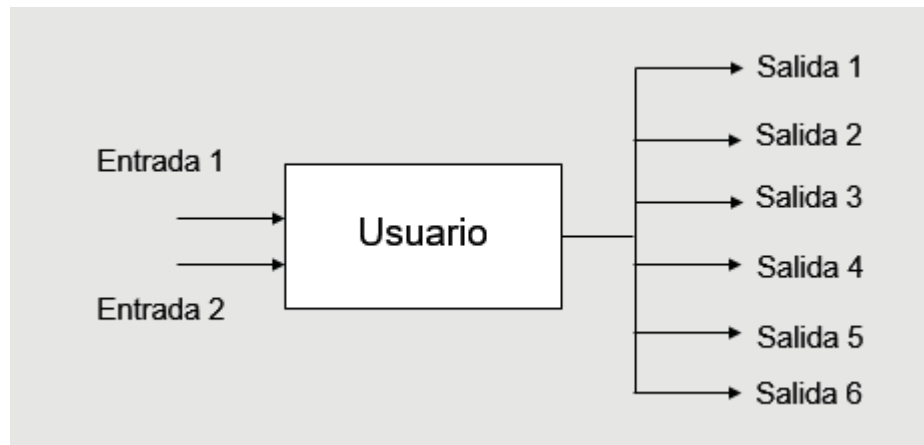


Figura 4-4: Diagrama en bloques del usuario (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 4-4 muestra el diagrama en bloques del usuario el cual consta de dos entradas, una de luz infrarroja y la otra de luz visible. La señal infrarroja de entrada al usuario, que

corresponde al código de posicionamiento que emite el transceptor 1 o 2 para detectar a dicho usuario, permite activar las primeras cinco salidas. La entrada 2 es la señal de luz visible que activa la salida 6. La salida 1 que corresponde al LED rojo siempre se activará ante cualquier señal infrarroja, las salidas 2 y 3 que corresponde a los LED amarillo y azul respectivamente se activarán de acuerdo al código de posicionamiento que recepcionen del transceptor en el que se encuentren espacialmente. La salida 4 es un display de 7 segmentos el cual muestra con un dígito el transceptor en el que se encuentra el usuario, 1 o 2. Cuando el usuario no está posicionado en ninguno de los dos transceptores, este display se apaga. La salida 5 es la emisión del código de conexión que debe recepcionar el transceptor 1 o 2.

4.5 Conclusiones

Al conjugar los sistemas de posicionamiento y comunicación vía Li-Fi en un solo sistema se logró un sistema bastante robusto y con muchos dispositivos electrónicos utilizados entre ambos sistemas. Se logró que ambos sistemas no interfirieran uno con otro, ya que la señal infrarroja emitida por el transceptor se encontraba amplificada no interfería con la señal del transceptor cercano lo que permitió tener espacios sin interferencia para ambos transceptores. La señal de comunicación si bien podía ser captada por el usuario para ambos transceptores, se optó por bloquear la recepción de la señal de comunicación cuando existiese esta interferencia. Cabe destacar que si bien la señal infrarroja que es usada para el posicionamiento y la señal de luz visible que es usada para la comunicación se encontraban relativamente cercanas una con otra, no se vieron alteradas cuando ambos sistemas fueron conjugados en uno.

5 Pruebas del sistema de posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

5.1 Transceptor 1

La Figura 5.1 muestra el circuito montado en una protoboard del transceptor 1 IR Tx el cual transmite el código infrarrojo de posicionamiento del transceptor 1, en esta protoboard se encuentra, también montado, el circuito del transceptor 1 IR Rx el cual recibe el código infrarrojo de conexión. Este código de conexión provoca dos salidas simultáneas que corresponden al LED rojo y al LED amarillo respectivamente del transceptor 1.

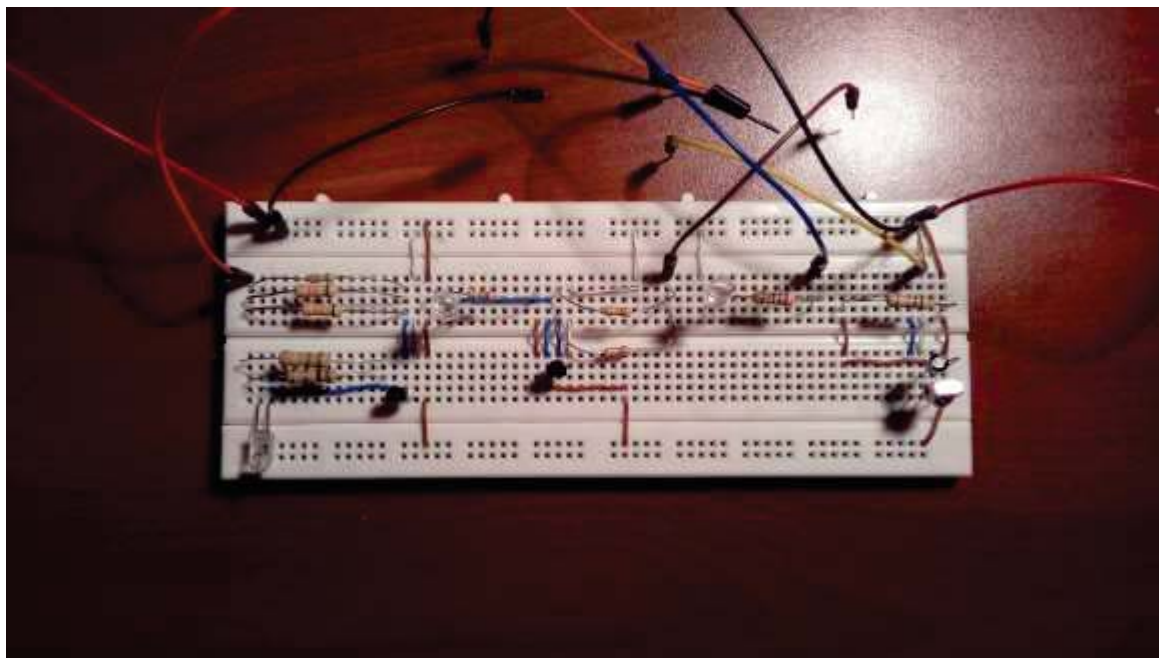


Figura 5-1: Transceptor 1 IR Tx y Transceptor 1 IR Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-2 muestra la señal captada en el osciloscopio del código de posicionamiento del transceptor 1

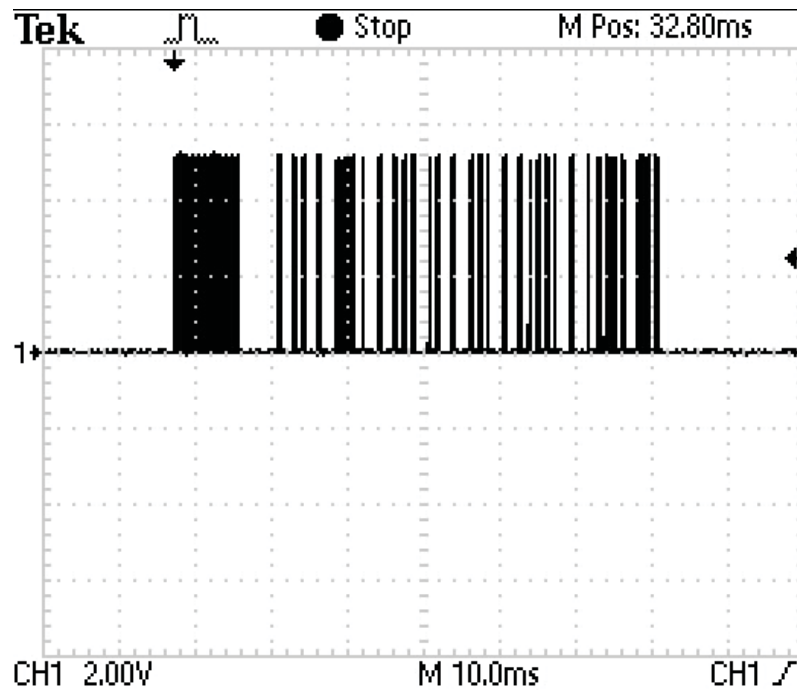


Figura 5-2: Señal infrarroja de posicionamiento del transceptor 1 (elaborado por: Pablo Caro)

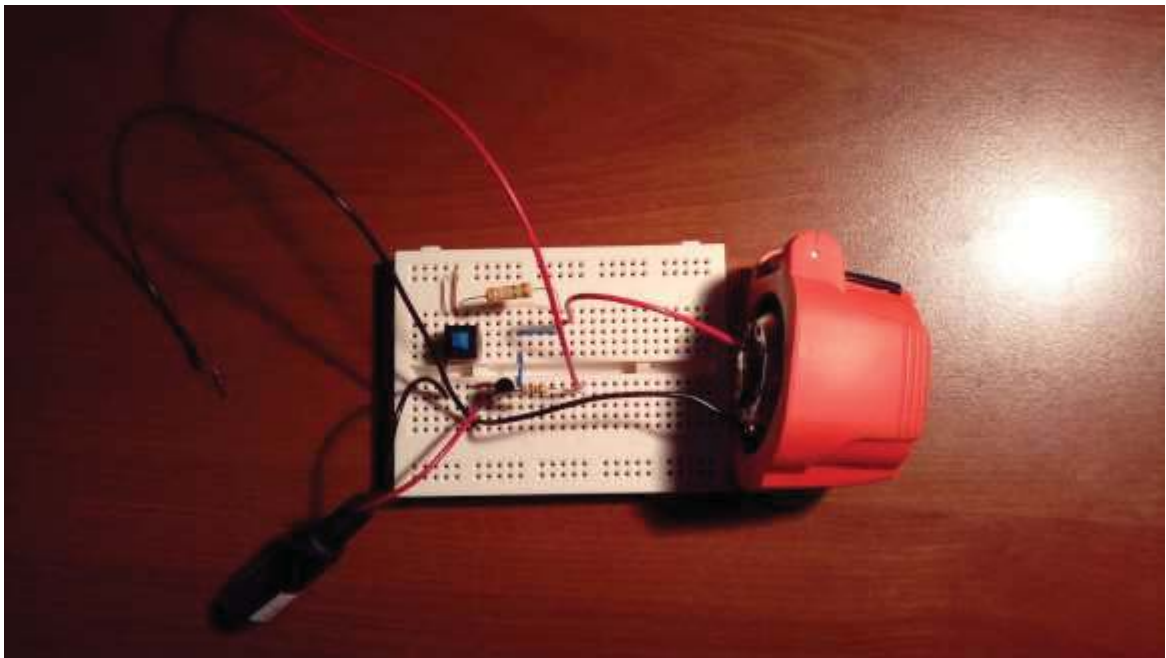


Figura 5-3: Transceptor 1 VLC Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-3 muestra el circuito montado en una protoboard del transceptor 1 VLC Tx el cual es el encargado de la comunicación por luz visible, donde el LED blanco cambia de intensidad de acuerdo a la señal eléctrica que debe transmitir.

5.2 Transceptor 2

La Figura 5.4 muestra el circuito montado en una protoboard del transceptor 2 IR Tx el cual transmite el código infrarrojo de posicionamiento del transceptor 2, en esta protoboard se encuentra, también montado, el circuito del transceptor 2 IR Rx el cual recibe el código infrarrojo de conexión. Este código de conexión provoca dos salidas simultáneas que corresponden al LED rojo y al LED azul respectivamente del transceptor 2.

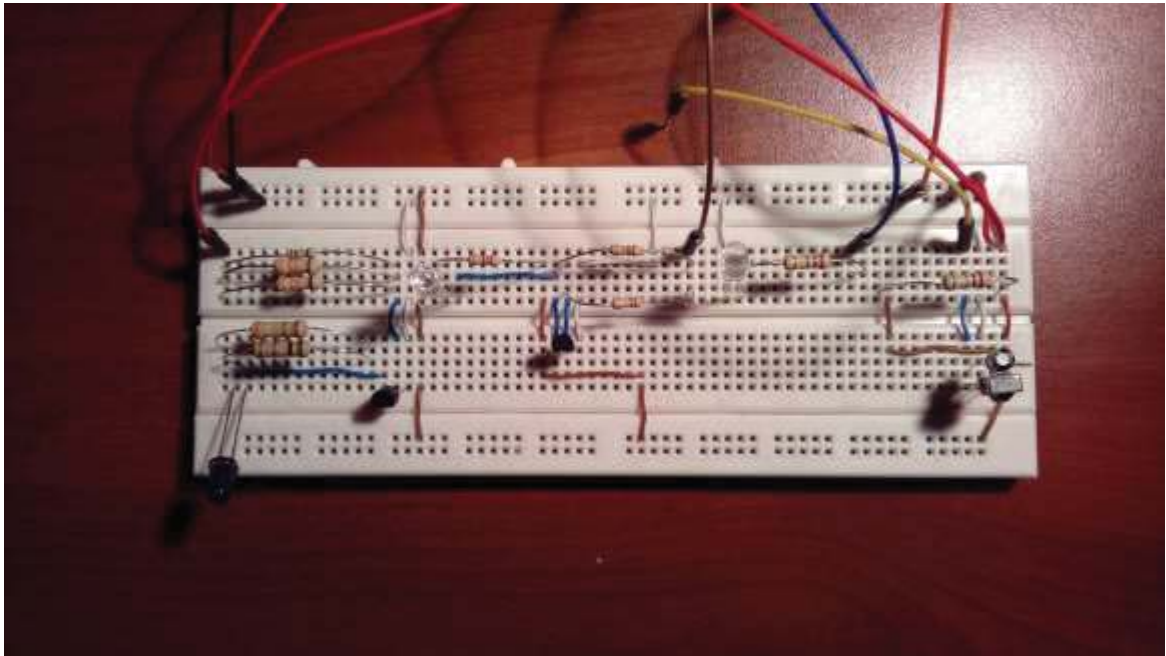


Figura 5-4: Transceptor 2 IR Tx y Transceptor 2 IR Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-5 muestra la señal captada por el osciloscopio del código de posicionamiento del transceptor 2

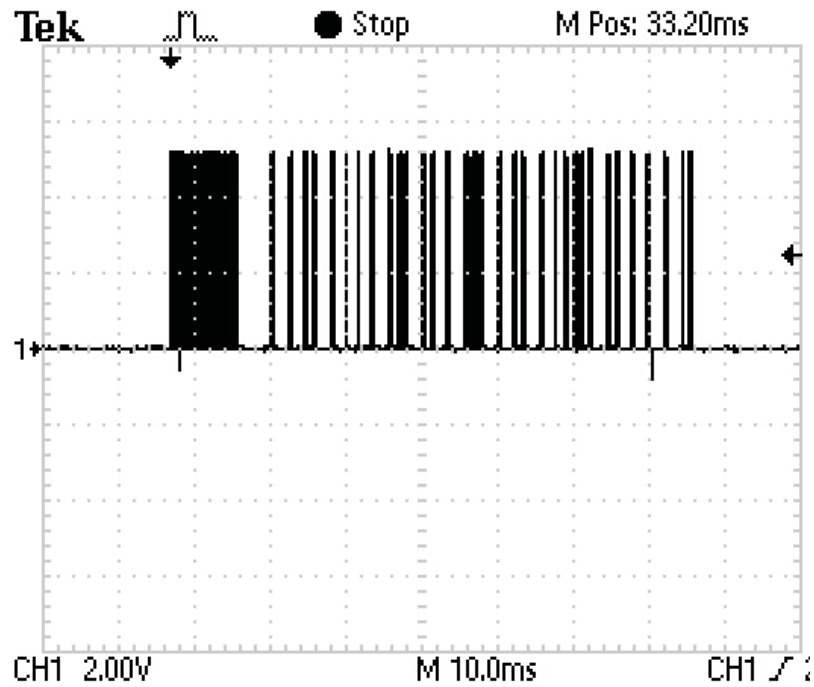


Figura 5-5: Señal infrarroja de posicionamiento del transceptor 2 (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-6 muestra el circuito montado en una protoboard del transceptor 2 VLC Tx el cual es el encargado de la comunicación por luz visible, donde el LED blanco cambia de intensidad de acuerdo a la señal eléctrica que debe transmitir.

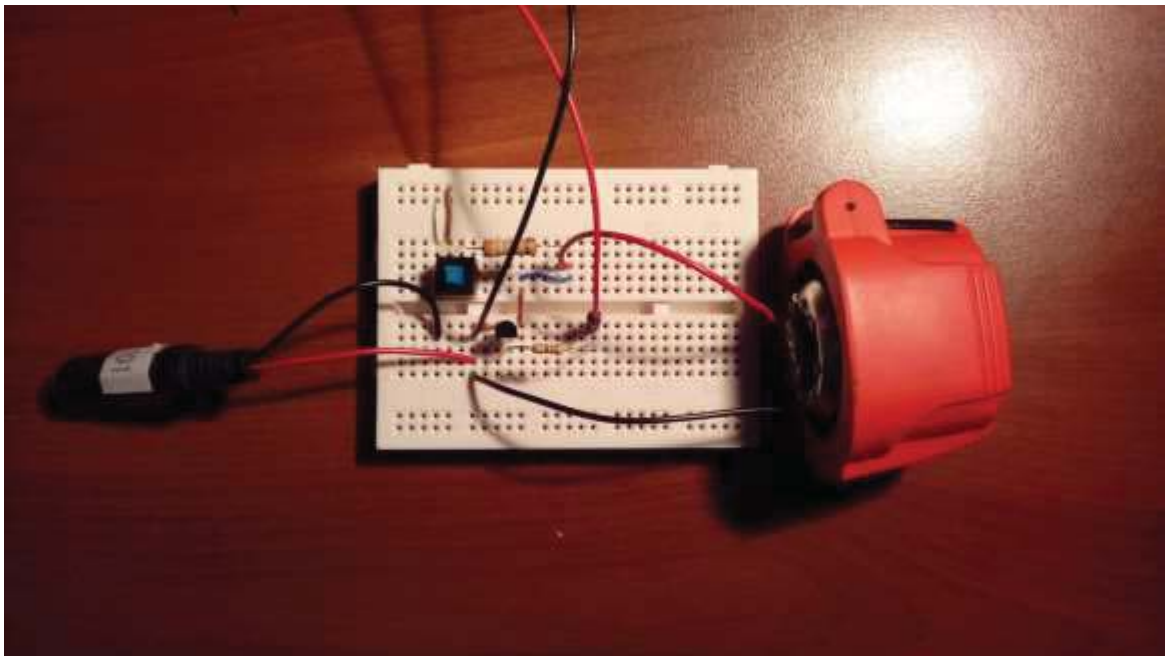


Figura 5-6: Transceptor 2 VLC Tx (elaborado por: Pablo Caro)

5.3 Transceptor usuario

La Fig. 5-7 muestra el circuito montado en una protoboard del transceptor usuario IR Rx Tx el cual recepciona el código de posicionamiento emitido por el transceptor 1 o 2 dependiendo de la posición del usuario. La salida corresponde al LED rojo siempre se activará ante cualquier señal infrarroja, las salidas que corresponde a los LED amarillo y azul se activarán de acuerdo al código de posicionamiento que recepcionen del transceptor en el que se encuentren espacialmente. Se muestra la posición en un display de 7 segmentos el cual muestra con un dígito el transceptor en el que se encuentra el usuario, 1 o 2. Cuando el usuario no está posicionado en ninguno de los dos transceptores, este display se apaga.

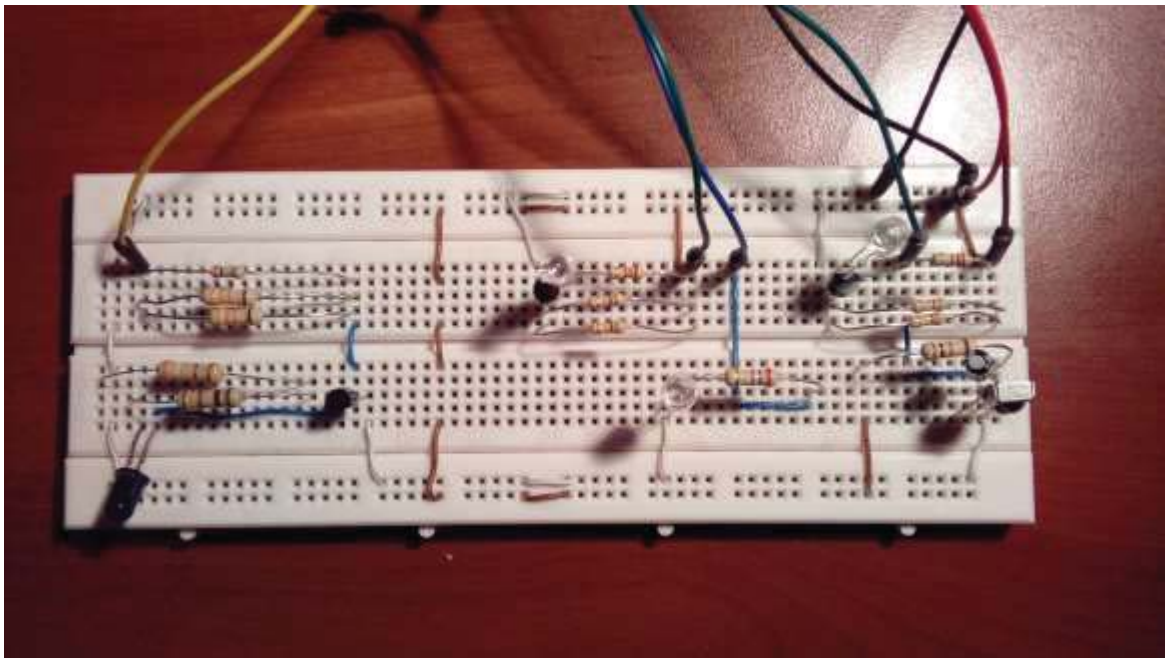


Figura 5-7: Transceptor usuario IR Rx Tx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-8 muestra el circuito montado en una protoboard del transceptor usuario VLC Rx el cual recepciona la señal de audio transmitida por luz visible. Su salida corresponde a la señal de audio audible en un parlante de 8[Ω] [W].

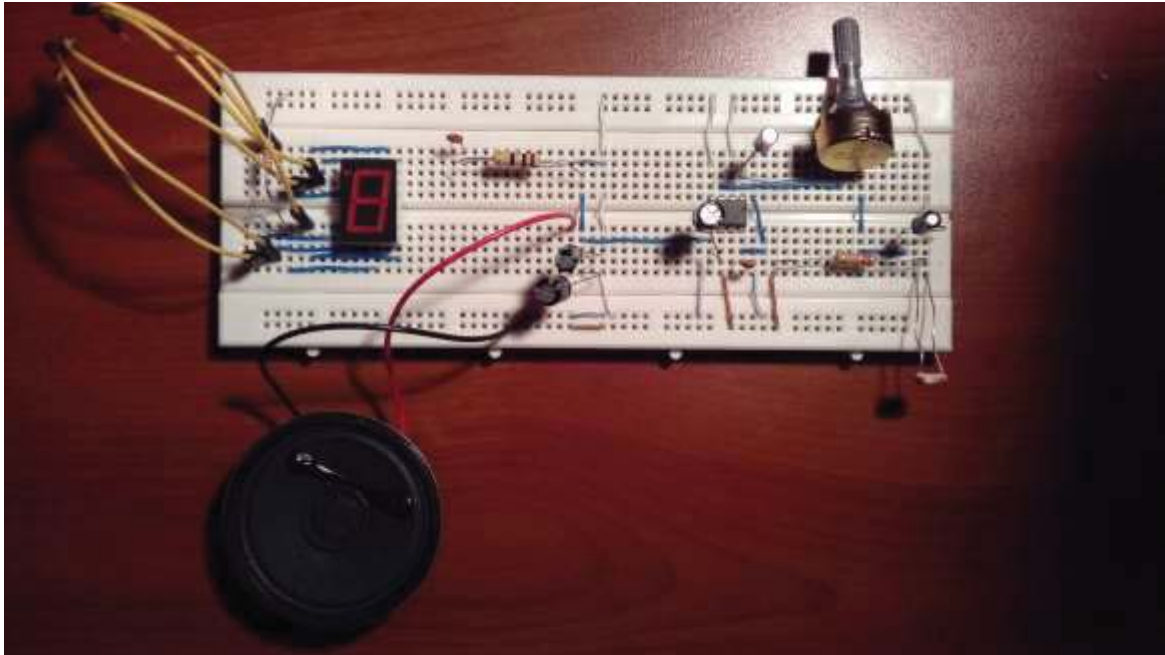


Figura 5-8: Transceptor usuario VLC Rx (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-9 muestra la señal captada por el osciloscopio del código de posicionamiento del transceptor 1 captado por el usuario.

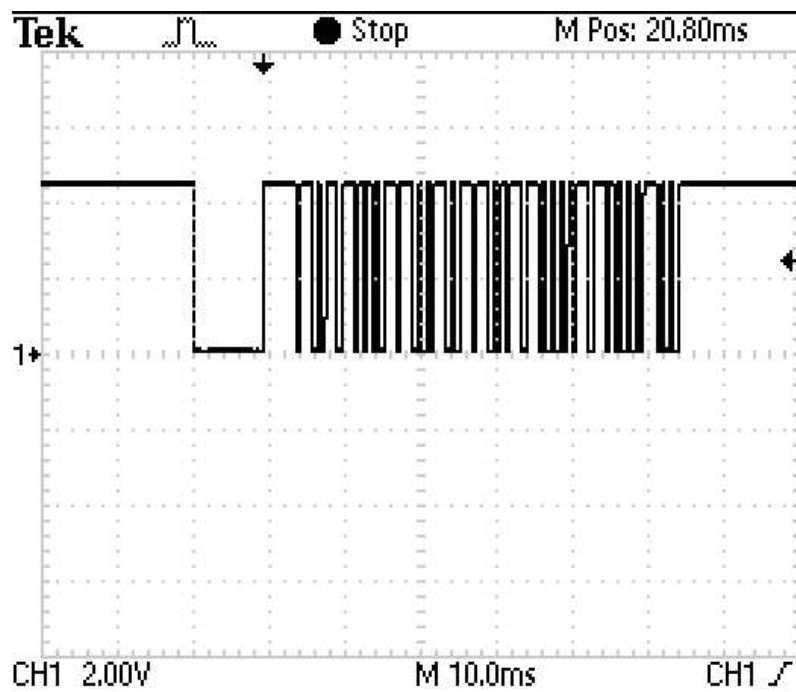


Figura 5-9: Señal infrarroja de posicionamiento del transceptor 1 receptionada por el usuario (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-10 muestra la señal captada por el osciloscopio del código de posicionamiento del transceptor 1 captado por el usuario.

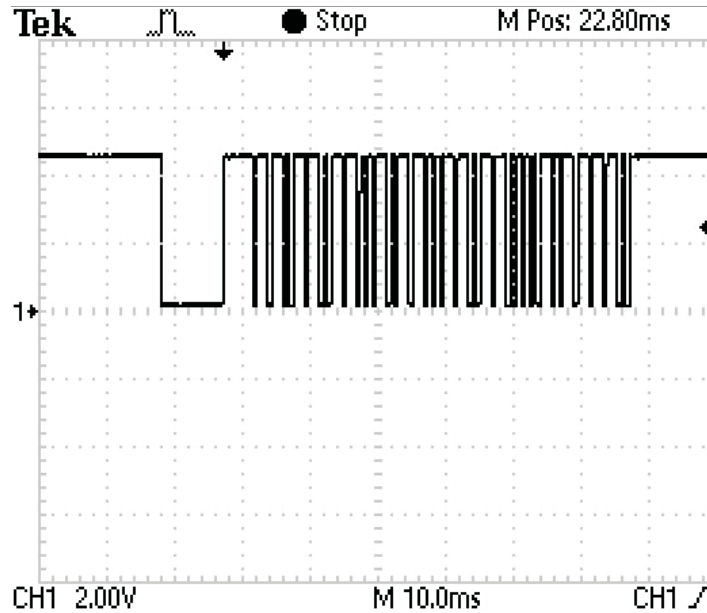


Figura 5-10: Señal infrarroja de posicionamiento del transceptor 2 receptionada por el usuario (elaborado por: Pablo Caro)

5.4 Comportamiento del sistema de posicionamiento y de comunicación vía Li-Fi

La Figura 5-11 muestra el LED encargado de transmitir la señal óptica en el sistema de comunicación por luz visible. Este LED tiene un flujo luminoso de 45 lúmenes con una distancia máxima de alcance de 40 metros con respecto a la luz, pero no así de la información que transmite, ya que a 40 metros la información llegaría muy distorsionada al usuario.



Figura 5-11: LED Transmisor de la señal en el sistema VLC (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-12 muestra al transceptor 1 en completo montaje transmitiendo posición por luz infrarroja e información por luz visible

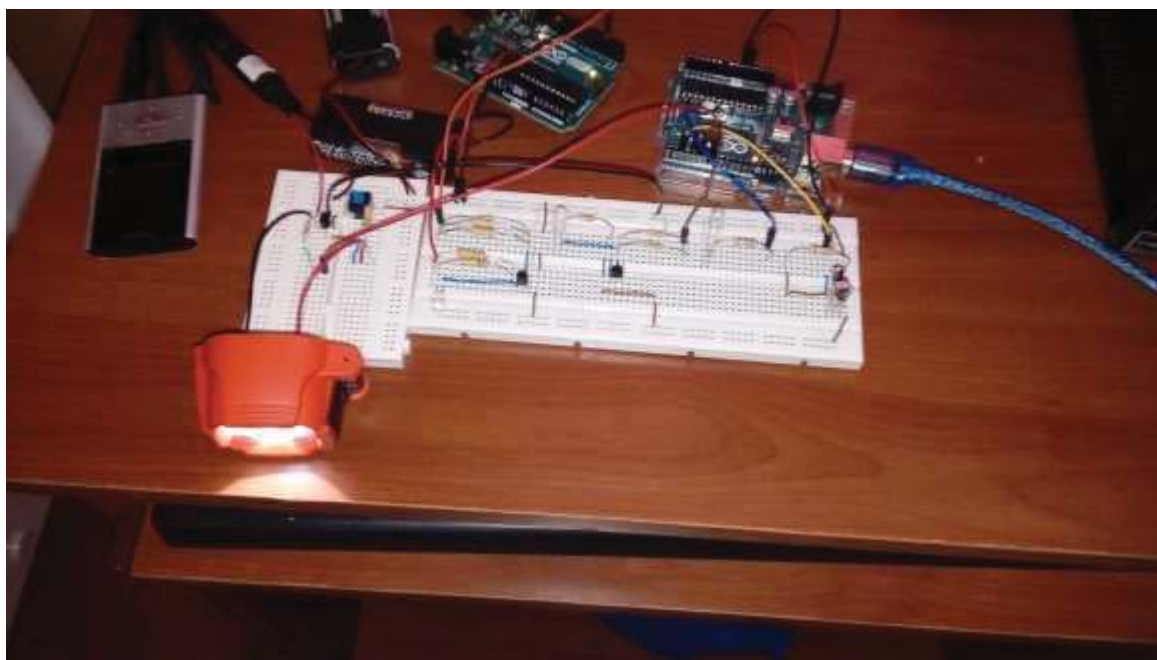


Figura 5-12: Transceptor 1 (elaborado por: Pablo Caro)

Pruebas del sistema de posicionamiento y comunicación en interiores vía Li-Fi

La Figura 5-13 muestra al transceptor 2 emitiendo el código de posición por luz infrarroja e información por luz visible.

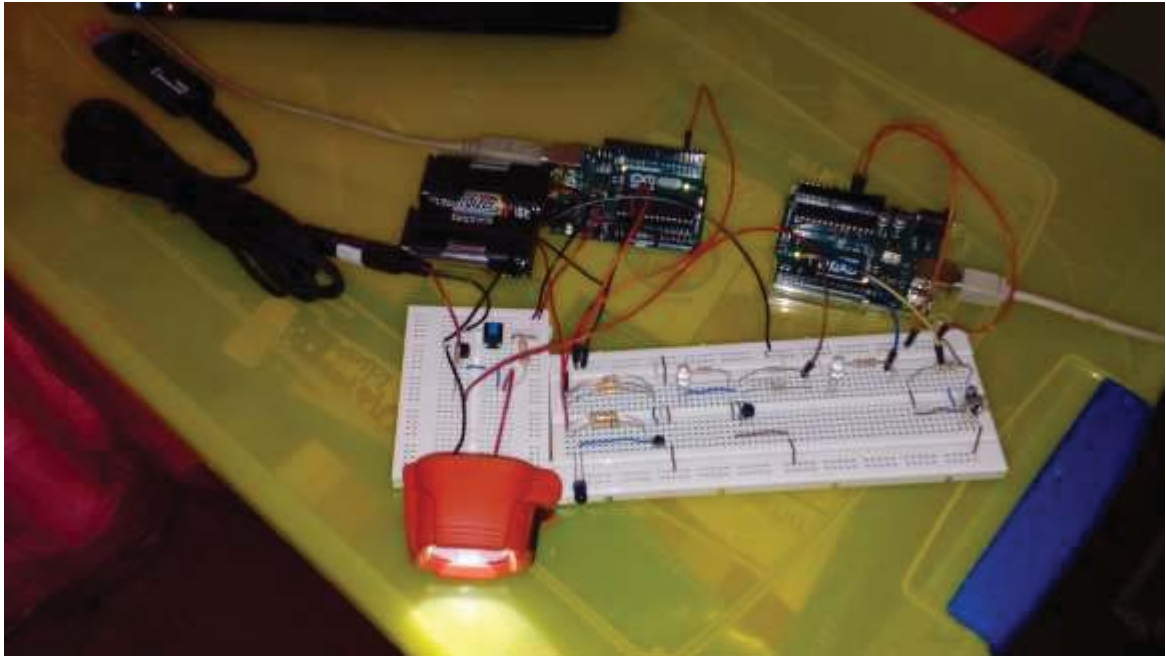


Figura 5-13: Transceptor 2 (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-14 muestra el encendido del display de 7 segmentos donde el número 1 indica que el transceptor usuario se encuentra posicionado en el espacio del transceptor 1.

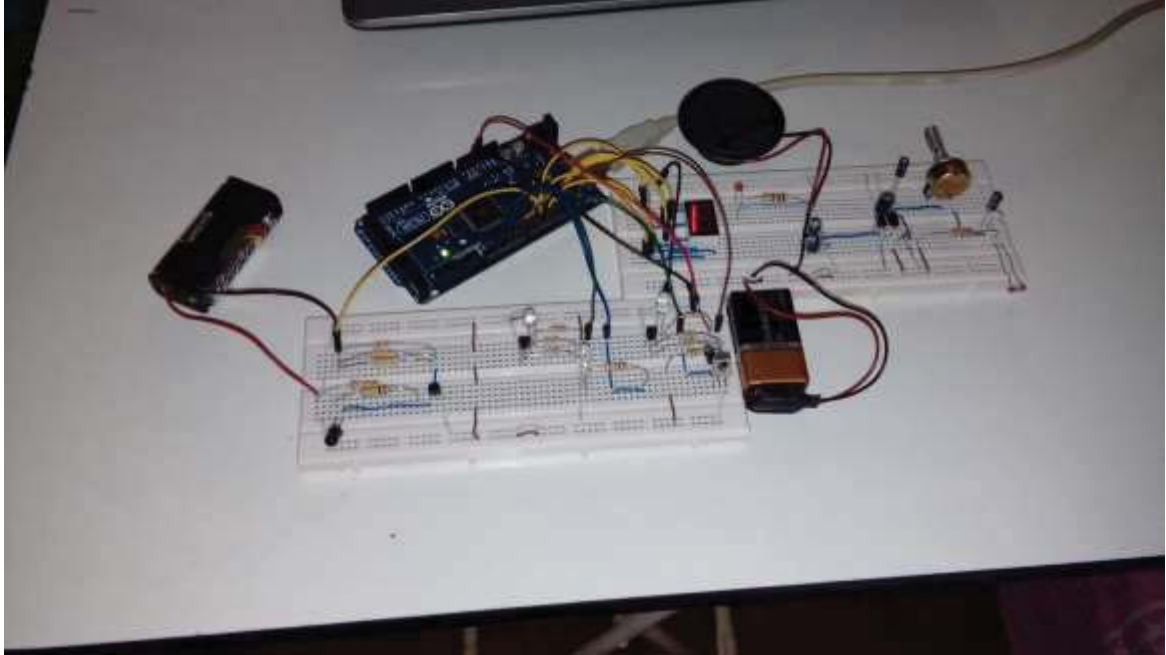


Figura 5-14: Transceptor usuario posicionado en el transceptor 1 (elaborado por: Pablo Caro)

La Figura 5-15 muestra el encendido del display de 7 segmentos donde el número 1 indica que el transceptor usuario se encuentra posicionado en el espacio del transceptor 1.

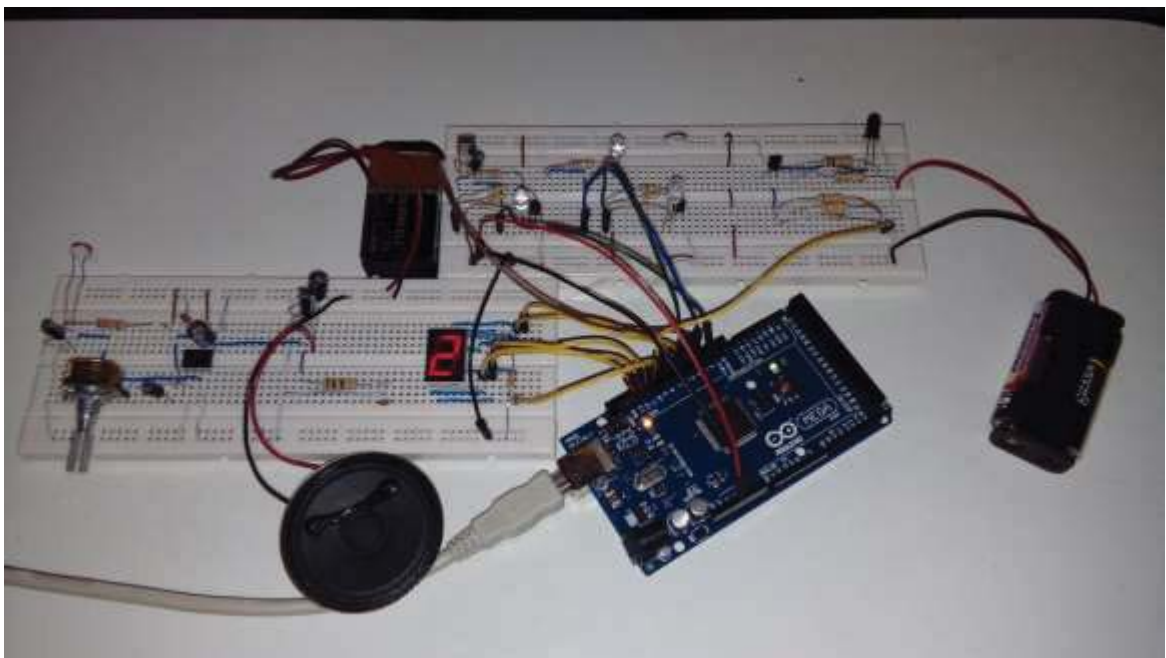


Figura 5-15: : Transceptor usuario posicionado en el transceptor 2 (elaborado por: Pablo Caro)

El siguiente enlace de internet direcciona a un vídeo demostrativo del sistema de posicionamiento por luz infrarroja funcionando en conjunto con el sistema de comunicación por luz visible, donde se puede observar claramente como el transceptor usuario recibe información diferente de acuerdo a la posición en la que se encuentre.

Enlace de internet: <https://1drv.ms/v/s!AnrFkIUpEmK4grBJFHOEr8pThtR3DQ>

5.5 Conclusiones

Las señales infrarrojas detectadas por el usuario son bien transmitidas por el transceptor y bien recibidas por el usuario. Cabe destacar que la señal infrarroja en sí usada y que se basa en el protocolo NEC jamás muestra una frecuencia de 38 [kHz], que es la frecuencia que detecta el dispositivo electrónico VS 1838, cada pulso tiene una serie de pulsos más pequeños que en conjunto tienen una frecuencia de 38 [kHz], por lo que es necesario configurar en forma correcta el osciloscopio para poder apreciar estos pulsos de 38 [kHz].

6 Discusiones y conclusiones

La tecnología infrarroja presenta una gran oportunidad de aplicar posicionamiento en interiores de forma exacta, rápida y sencilla, la cual en conjunto con un sistema de comunicación por luz visible permiten aplicaciones en entornos interiores muy útiles para la actualidad.

Respeto al proyecto en sí, un sistema de posicionamiento por luz infrarroja y comunicación por luz visible vía Li-Fi tiene gran cabida en el mercado actual, dado que la tecnología móvil ha avanzado mucho y permite una gran independencia y movilidad, permitiendo a un potencial usuario recibir información en tiempo real de su entorno de acuerdo a su localización lo que presenta grandes oportunidades de explotación en supermercados, centros comerciales, museos, bodegas, etc.

La utilización de un sistema de posicionamiento en conjunto con uno de comunicación para interiores es algo necesario y posible de realizar dado el creciente aumento y desarrollo de la tecnología móvil. En muchos casos de la vida real es necesario tener información del entorno, lo cual se puede lograr tener de forma rápida e inmediata. Un ejemplo muy común es cuando una persona visita un museo y éste entrega información que a veces no es tan sencilla de leer o acceder dado de sí hay mucho público o no, o por otro lado en supermercados donde se tiene una cantidad inmensa de productos que luchan por ser exhibidos. Un sistema de posicionamiento y comunicación por Li-Fi puede entregar un sinnúmero de ventajas para solucionar estos problemas, lo cual es posible realizar, pero necesita mejorar.

El proyecto en sí deja abierta la posibilidad de mejora en el aspecto de que se le puede integrar un detector de objetos el cual permite que el sistema se active solo cuando se detecte algún usuario, ahorrando con esto energía. También se puede mejorar la señal de audio modulándola y codificándola, logrando con esto una mejor resistencia al ruido y un mayor alcance. Otra mejora al proyecto puede ser la transmisión por luz visible de un archivo de imagen o de vídeo, lo que ampliaría enormemente el rango de uso que se le puede dar.

La utilización de Arduino en este proyecto abre la posibilidad de mejorar este sistema en aspectos del tipo de información que es capaz de transmitir, de la distancia y cantidad de usuarios que pueden conectarse al sistema sin que éste se vea afectado. Una mejora importante a realizar es la de interactuar con el sistema de comunicación creando una comunicación bidireccional, lo

que permitiría al usuario acceder a más información que requiera del entorno en el cual se encuentra.

Bibliografía

- [1] Federal Communications Commission. “Location-Based Services: An Overview of Opportunities and Other Considerations.” 2012.
- [2] Foursquare, «About Foursquare,» [Online]. Available: <http://foursquare.com/about>, 2013.
- [3] Kavehrad, Mohsen. “Sustainable energy-efficient wireless applications using light”. *IEEE Communications Magazine*, 2010, vol. 48, no 12, p. 66-73.
- [4] Kavehrad, Mohsen. “Optical wireless applications: A solution to ease the wireless airwaves spectrum crunch”. En *SPIE OPTO*. International Society for Optics and Photonics, 2013. p. 86450G-86450G-7.
- [5] Liu, Hui, et al. “Survey of wireless indoor positioning techniques and systems”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2007, vol. 37, no 6, p. 1067-1080.
- [6] Hong, Hong; Ren, Yi; Wang, Chenxu. “Information illuminating system for healthcare institution. En *Bioinformatics and Biomedical Engineering*”, 2008. *ICBBE 2008. The 2nd International Conference on*. IEEE, 2008. p. 801-804.
- [7] Maldonado Puente, Santiago Alberto; Morales Cueva, Byron Alexander. “Diseño e implementación de un modulador y demodulador OOK para comunicación por luz visible (VLC) utilizando la tarjeta FPGA CYCLONE III de ALTERA”. 2013. Tesis de Licenciatura, p.121.
- [8] Morales Nieto, Christian Roberto. Diseño y simulación de las etapas de ecualización para transmisión y recepción del sistema de comunicación por luz visible (VLC) con modulación OOK utilizando filtros digitales. 2013. Tesis de Licenciatura, p. 123.
- [9] Arnon, Shlomi. “*Visible light communication*”. Cambridge University Press, 2015.

-
- [10] Panta, Kusha; Armstrong, Jean. "Indoor localisation using white LEDs". *Electronics letters*, 2012, vol. 48, no 4, p. 228-230.
- [11] Tanaka, Toshiya; Haruyama, Shinichro. "New position detection method using image sensor and visible light LEDs". En *Machine Vision, 2009. ICMV'09. Second International Conference on*. IEEE, 2009, p. 150-153.
- [12] Lee, Yong Up; Kavehrad, "Mohsen. Two hybrid positioning system design techniques with lighting LEDs and ad-hoc wireless network." *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, vol. 58, no 4, p. 58.
- [13] Sarbazi, Elham; UYSAL, Murat. "PHY layer performance evaluation of the IEEE 802.15. 7 visible light communication standard". En *Optical Wireless Communications (IWOW), 2013 2nd International Workshop on*. IEEE, 2013. p. 35-39.
- [14] Dimitrov, Svilen; Haas, Harald. "*Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi*". Cambridge University Press, 2015.
- [15] «ardubasic,» [Online]. Available: <http://ardubasic.wordpress.com/2013/07/14/comunicacion-por-infrarrojos/>. 2013.
- [16] «curso arduino mega,» [Online]. Available: <http://cursoarduinomega.blogspot.cl/2015/04/ir-remote-control-with-infrared-reveiver.html>. 2015.
- [17] «electronicavm,» [Online]. Available: <http://electronicavm.net/2011/09/20/recepcion-ir-con-arduino-protocolo-nec/>. 2011.

A Apéndice

Listado -1: Sketch Transceptor 1 IR Tx

```
1 #include <IRremote.h>
2 //Activación librería IRremote
3 IRsend irsend;
4 //Sensor infrarrojo activado
5
6 void setup()
7 {
8   Serial.begin(9600);
9   //Se activa la comunicación serial
10 }
11
12 void loop()
13 {
14   irsend.sendNEC(0xB1966184, 32);
15   //Transmisión del código infrarrojo
16   Serial.println("Enviado");
17   //Impresión en pantalla
18   delay(2000);
19   //Espera de 2 segundos
20 }
```

Listado -2: Sketch Transceptor 1 IR Rx

```
1 #include <IRremote.h>
2 //Activación librería IRremote
3 int ReceptorIR=2;
4 //Sensor conectado al PIN 2
5 int ledPin=4;
6 //LED conectado al pin 4
7 int ledYellow=5;
8 //LED conectado al pin 5
9 int switchAudio=7;
10 //Switch conectado al pin 7
11
12 IRrecv irrecv(ReceptorIR);
13 //Sensor infrarrojo activado
14 decode_results Codigo;
15
16 void setup()
17 {
18   Serial.begin(9600);
19   //Se activa la comunicación serial
20   irrecv.enableIRIn();
21   //Se activa el sensor infrarrojo
22   pinMode(ledPin, OUTPUT);
23   //Pines 4, 5 y 7 establecidos como salidas
```

```

24   pinMode(ledYellow, OUTPUT);
25   pinMode(switchAudio, OUTPUT);
26   }
27
28   void loop()
29   {
30     if (irrecv.decode(&Codigo))
31     {
32       Serial.print("0x");
33       Serial.println(Codigo.value, HEX);
34       //Código recepcionado transformado a hexadecimal
35       digitalWrite(ledPin, HIGH);
36       //Pin 4 en nivel alto
37       delay(10);
38       digitalWrite(ledPin, LOW);
39       //Pin 5b en nivel bajo
40       irrecv.resume();
41       //Reinicia receptor infrarrojo
42       if(Codigo.value==0x72C8CD04)
43       {
44         Serial.println("Enlace con LED 1");
45         digitalWrite(ledYellow, HIGH);
46         //Pin 5 en nivel alto
47         digitalWrite(switchAudio, LOW);
48         //Pin 7 en nivel alto
49         delay(10);
50         digitalWrite(ledYellow, LOW);
51         //Pin 5 en nivel bajo
52       }
53     }
54     if(Codigo.value!=0x72C8CD04 && Codigo.value==0xBFA12A36)
55     {
56       digitalWrite(switchAudio, HIGH);
57       //Pin 7 en nivel alto
58     }
59   }

```

Listado-3: Sketch Transceptor 2 IR Tx

```

1   #include <IRremote.h>
2   //Activación librería IRremote
3   IRsend irsend;
4   //Sensor infrarrojo activado
5
6   void setup()
7   {
8     Serial.begin(9600);
9     //Se activa la comunicación serial
10  }
11
12  void loop()
13  {
14    irsend.sendNEC(0xDB2CD85E, 32);
15    //Transmisión del código infrarrojo
16    Serial.println("Enviado");
17    //Impresión en pantalla
18    delay(2000);
19    //Espera de 2 segundos
20  }

```

Listado-4: Sketch Transceptor 2 IR Rx

```

1   #include <IRremote.h>
2   //Activación librería IRremote
3   int ReceptorIR=2;
4   //Sensor conectado al Pin 2

```

```

5  int ledPin=4;
6  //LED conectado al pin 4
7  int ledBlue=5;
8  //LED conectado al pin 5
9  int switchAudio=7;
10 //Switch conectado al pin 7
11
12 IRrecv irrecv(ReceptorIR);
13 //Sensor infrarrojo activado
14 decode_results Codigo;
15
16 void setup()
17 {
18   Serial.begin(9600);
19   //Se activa la comunicación serial
20   irrecv.enableIRIn();
21   //Se activa el sensor infrarrojo
22   pinMode(ledPin, OUTPUT);
23   //Pines 4, 5 y 7 establecidos como salidas
24   pinMode(ledBlue, OUTPUT);
25   pinMode(switchAudio, OUTPUT);
26 }
27
28 void loop()
29 {
30   if (irrecv.decode(&Codigo))
31   {
32     Serial.print("0x");
33     Serial.println(Codigo.value, HEX);
34     //Código recepcionado transformado a hexadecimanal
35     digitalWrite(ledPin, HIGH);
36     //Pin 4 en nivel alto
37     delay(10);
38     digitalWrite(ledPin, LOW);
39     //Pin 5 en nivel bajo
40     irrecv.resume();
41     //Reinicia receptor infrarrojo
42     if(Codigo.value==0xBF12A36)
43     {
44       Serial.println("Enlace con LED 1");
45       digitalWrite(ledBlue, HIGH);
46       //Pin 5 en nivel alto
47       digitalWrite(switchAudio, LOW);
48       //Pin 7 en nivel bajo
49       delay(10);
50       digitalWrite(ledBlue, LOW);
51       //Pin 5 en nivel bajo
52     }
53   }
54   if(Codigo.value!=0xBF12A36 && Codigo.value==0x72C8CD04)
55   {
56     digitalWrite(switchAudio, HIGH);
57     //Pin 7 en nivel alto
58   }
59 }

```

Listado-5: Sketch Usuario

```

1  #include <IRremote.h>
2  //Activación librería IRremote
3  int ReceptorIR=2;
4  //Sensor conectado al pin 2
5  int ledPin=4;
6  //LED conectado al pin 4
7  int ledYellow=5;
8  //LED conectado al pin 5
9  int ledBlue=6;
10 //LED conectado al pin 6
11 int ledA=7;

```

```

12 //Display 7 segmentos conectado a los pines 7, 8, 10, 11, 12 y 13
13 int ledB=8;
14 int ledC=10;
15 int ledD=11;
16 int ledE=12;
17 int ledG=13;
18
19 IRrecv irrecv(ReceptorIR);
20 //Sensor infrarrojo activado
21 decode_results Codigo;
22 IRsend irsend;
23
24 void setup()
25 {
26   Serial.begin(9600);
27   //Se activa comunicación serial
28   irrecv.enableIRIn();
29   pinMode(ledPin, OUTPUT);
30   //Pines 4, 5 y 6 establecidos como salida
31   pinMode(ledYellow, OUTPUT);
32   pinMode(ledBlue, OUTPUT);
33   pinMode(ledA, OUTPUT);
34   //Pines 7, 8, 10, 11, 12 y 13 establecidos como salida
35   pinMode(ledB, OUTPUT);
36   pinMode(ledC, OUTPUT);
37   pinMode(ledD, OUTPUT);
38   pinMode(ledE, OUTPUT);
39   pinMode(ledG, OUTPUT);
40 }
41
42 void loop()
43 {
44   if (irrecv.decode(&Codigo))
45   {
46     Serial.print("0x");
47     Serial.println(Codigo.value, HEX);
48     //Código recepcionado transformado a hexadecimal
49     digitalWrite(ledPin, HIGH);
50     //Pin 4 en nivel alto
51     delay(10);
52     digitalWrite(ledPin, LOW);
53     //Pin 4 en nivel bajo
54     digitalWrite(ledA, LOW);
55     //Display apagado
56     digitalWrite(ledB, LOW);
57     digitalWrite(ledC, LOW);
58     digitalWrite(ledD, LOW);
59     digitalWrite(ledE, LOW);
60     digitalWrite(ledG, LOW);
61     irrecv.resume();
62     if(Codigo.value==0xB1966184)
63     {
64       Serial.println("Posicionado en LED 1");
65       digitalWrite(ledYellow, HIGH);
66       //Pin 5 en nivel alto
67       delay(10);
68       digitalWrite(ledYellow, LOW);
69       //Pin 5 en nivel bajo
70       digitalWrite(ledBlue, LOW);
71       //Pin 6 en nivel bajo
72       sendIR();
73     }
74     if(Codigo.value==0xDB2CD85E)
75     {
76       Serial.println("Posicionado en LED 2");
77       digitalWrite(ledYellow, LOW);
78       //Pin 5 en nivel bajo
79       digitalWrite(ledBlue, HIGH);
80       //Pin 6 en nivel bajo
81       delay(10);
82       digitalWrite(ledBlue, LOW);

```

```
83 //Pin 6 en nivel bajo
84 sendIR2();
85 }
86 if(Codigo.value!=0xB1966184 && Codigo.value==0xDB2CD85E)
87 {
88     digitalWrite(switchAudio, HIGH);
89     //Pin 3 en nivel alto
90     delay(10);
91     //Display muestra "-" indicando que hay dos señales interfiriendo
92     digitalWrite(ledA, LOW);
93     digitalWrite(ledB, LOW);
94     digitalWrite(ledC, LOW);
95     digitalWrite(ledD, LOW);
96     digitalWrite(ledE, LOW);
97     digitalWrite(ledG, HIGH);
98     delay(20);
99     irrecv.enableIRIn();
100 }
101 }
102 }
103
104 void sendIR()
105 {
106     irsend.sendNEC(0x72C8CD04, 32);
107     Serial.println("Enviado codigo 1");
108     digitalWrite(ledA, LOW);
109     //Display muestra número "1"
110     digitalWrite(ledB, HIGH);
111     digitalWrite(ledC, HIGH);
112     digitalWrite(ledD, LOW);
113     digitalWrite(ledE, LOW);
114     digitalWrite(ledG, LOW);
115     delay(20);
116     irrecv.enableIRIn();
117 }
118
119 void sendIR2()
120 {
121     irsend.sendNEC(0xBFAl2A36, 32);
122     Serial.println("Enviado codigo 2");
123     digitalWrite(ledA, HIGH);
124     //Display muestra número "2"
125     digitalWrite(ledB, HIGH);
126     digitalWrite(ledC, LOW);
127     digitalWrite(ledD, HIGH);
128     digitalWrite(ledE, HIGH);
129     digitalWrite(ledG, HIGH);
130     delay(20);
131     irrecv.enableIRIn();
132 }
```