



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**EXPERIMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIFI EN
APLICACIONES DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES PARA
APARATOS MÓVILES**

**Trabajo de Titulación para optar al título de:
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Autor:
Alex Fernando Quille Vega**

**Tutor:
Ph.D. Leonardo Fabián Rentería Bustamante**

Riobamba, Ecuador. 2022

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, **Alex Fernando Quille Vega**, con cédula de ciudadanía **0250004637**, autor del trabajo de investigación titulado: certifico que **“EXPERIMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIFI EN APLICACIONES DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES PARA APARATOS MÓVILES”**, a producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 24 de marzo de 2022.



Alex Fernando Quille Vega
C.I: 0250004637

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**EXPERIMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIFI EN APLICACIONES DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES PARA APARATOS MÓVILES**”, presentado por **Alex Fernando Quille Vega**, con cédula de identidad número **0250004637**, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 24 de marzo de 2022

Ph.D. Luis Patricio Tello Oquendo
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firmado electrónicamente por:
**LUIS PATRICIO
TELLO OQUENDO**

Firma

Mgs. José Luis Jinez Tapia
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firmado electrónicamente por:
**JOSE LUIS JINEZ
TAPIA**

Firma

Dr. Klever Hernán Torres Rodríguez
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firmado electrónicamente por:
**KLEVER HERNAN
TORRES
RODRIGUEZ**

Firma

Ph.D. Leonardo Fabián Rentería Bustamante
TUTOR



Firmado electrónicamente por:
**LEONARDO FABIAN
RENERIA
BUSTAMANTE**

Firma

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**EXPERIMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIFI EN APLICACIONES DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES PARA APARATOS MÓVILES**”, presentado por **Alex Fernando Quille Vega**, con cédula de identidad número **0250004637**, bajo la tutoría de **Ph.D. Leonardo Fabián Rentería Bustamante**; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 24 de marzo de 2022

Presidente del Tribunal de Grado
Ph.D. Luis Patricio Tello Oquendo


Firmado electrónicamente por:
LUIS PATRICIO
TELLO OQUENDO
Firma

Miembro del Tribunal de Grado
Mgs. José Luis Jinez Tapia


Firmado electrónicamente por:
JOSE LUIS JINEZ
TAPIA
Firma

Miembro del Tribunal de Grado
Dr. Klever Hernán Torres Rodríguez


Firmado electrónicamente por:
KLEVER HERNAN
TORRES
RODRIGUEZ
Firma



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **QUILLE VEGA ALEX FERNANDO** con CC: **0250004637**, estudiante de la Carrera **ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**EXPERIMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIFI EN APLICACIONES DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES PARA APARATOS MÓVILES**", cumple con el 18 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **Urkund**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 07 de marzo de 2022



Firmado electrónicamente por:
**LEONARDO FABIAN
RENTERIA
BUSTAMANTE**

PhD. Leonardo Renteria
TUTOR (A)

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado primero a Dios, a mi esfuerzo y primordialmente el de mi madre Enma Vega por haberme entregado su apoyo incondicional en mi formación académica.

Mi madre, por ser la inspiradora en cada uno de los pasos dados en este trayecto, por su sacrificio y confianza brindada para llegar a cumplir esta meta tan anhelada con esfuerzo y perseverancia.

Para mi amada Analía por ser mi apoyo incondicional, aquella motivación en mi vida para encaminarme al éxito, fue el ingrediente perfecto para poder lograr alcanzar esta dichosa y muy merecida victoria en la vida; el poder haber culminado mis estudios universitarios.

Alex Fernando Quille Vega

AGRADECIMIENTO

“No necesitamos magia para cambiar el mundo porque ya tenemos ese poder en nuestro interior: tenemos el poder de imaginar un mundo mejor”.

J.K Rowling

Agradezco a Dios, a mi madre Enma Vega por brindarme el apoyo a través de su trabajo, esfuerzo y confianza; para de esta manera permitirme concluir mis estudios de tercer nivel. A mi hermana Jennifer Quille por su aliento y ánimo de seguir adelante.

A mi novia y compañera de vida Analía Tovar por su amor, consejos, ánimo y apoyo constante.

Al PhD. Leonardo Rentería; por su confianza, apoyo, orientación y ser quien me guíe en este proyecto; por su preocupación, necesaria para obtener excelentes resultados académicos.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, donde me forme como profesional. Luego de años de esfuerzo, sacrificio y dedicación llegó el día que miro atrás el camino recorrido por sus aulas. Y gracias a sus docentes que me brindaron los conocimientos necesarios para así llegar a culminar mis estudios.

Alex Fernando Quille Vega

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	10
INDICE DE FIGURAS	11
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.3 GENERAL	17
1.2.4 ESPECIFICOS	17
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Inicios de la tecnología LiFi	18
2.2 Proyectos que conllevan la tecnología LiFi.....	18
2.3 Funcionalidad respecto a la tecnología LiFi.....	18
2.4 Factibilidad del uso de la tecnología LiFi en la localización en interiores.....	19
2.5 Proyectos de enfoque para el beneficio de un sistema de localización en tiempo real en interiores, diseñado para mejorar la experiencia del usuario.....	22
CAPITULO III. METODOLOGÍA	23
3.1 Operacionalización de variables.....	24
3.1.1 Variable Independiente.....	25
3.1.2 Variable Dependiente	25
3.2 Población para el proyecto.	25
3.3 Muestra para el proyecto	25
3.4 Diagrama de flujo del proyecto de investigación	26
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1 RESULTADOS	27
4.1.1 Prototipo y modulación usados para la experimentación LiFi en la localización de un aparato móvil en interiores.	27
4.1.2 Diagramas de las trayectorias y pruebas realizadas.....	28
4.1.1.1 Trayectoria 1	29
4.1.1.2 Trayectoria 2.....	32
4.1.1.3 Trayectoria 3.....	35
4.1.3 Error de posicionamiento	38
4.2 DISCUSIÓN.....	38
4.2.1 Inicios del experimento	38
4.2.2 Pruebas para construcción del foco led	38

4.2.3 Pruebas de dispersión de luz del foco led en conjunto al escenario de experimentación.....	39
4.2.4 Pruebas para la colocación de los focos led con matrices de 2x2	39
4.2.5 Construcción de la maqueta de pruebas para la tecnología LiFi	39
4.2.6 Construcción del aparato móvil.....	39
4.2.7 Método de visualización de datos para la posición del aparato móvil	40
4.2.8 Método de alimentación para el aparato móvil y el receptor LiFi.....	40
4.2.9 Método de análisis para el error de posicionamiento	40
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
5.1 CONCLUSIONES.....	40
5.2 RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFIA	42
ANEXOS	44
1. HARDWARE, SOFTWARE USADO EN LA IMPLEMENTACIÓN PARA EL PROTOTIPO DEL PROYECTO	44
1.1 Diodos LED de alto brillo color blanco	44
1.2 Servidor WebSocket.....	45
1.3 Plataforma de programación Arduino	45
1.4 ESP32 Wifi y Bluetooth en un solo chip.....	46
1.4.1 Conectividad inalámbrica.....	46
1.4.2 ESP-WROOM-32 Tablero de desarrollo de 38 PIN PINOUT.....	46
1.5 Sensor Digital de Intensidad de Luz con Foto Resistencia LDR y controlador LM393	46
1.6 Arduino nano para el aparato móvil	47
1.7 Controlador dual de motores Pololu TB6612FNG puente H	48
1.8 Sensor reflectivo Pololu QTR-8RC.....	48
1.9 Regulador de voltaje LM7805	49
1.10 Batería de polímero de litio	49
1.11 Arduino pro mini para cada dispositivo transmisor LiFi.....	50
1.12 FT232RL Módulo adaptador USB a Serial	50
2. Evidencia del desarrollo del proyecto de investigación para el prototipo LiFi y Aparato Móvil	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Codificaciones para las posiciones de los nodos LiFi	23
Tabla 2 Operacionalización de variables.....	24
Tabla 3 Población para el proyecto	25
Tabla 4 Muestra para el proyecto	25
Tabla 5 Pruebas realizadas en 3 trayectorias	38

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Espectro visible por el ojo humano (Luz)	19
Figura 2 Esquematzación del prototipo base para el sistema basado en la tecnología LiFi con la localización en interiores de un aparato móvil, realizado en Microsoft Visio	20
Figura 3 Esquematzación de una red LiFi en interiores.....	20
Figura 4 (a) Diagrama del canal LiFi. (b) Ilustración del canal VLC de espacio libre interior	21
Figura 5 (a) Demostración de CCI. (b) Partición estática de recursos. (c) Reutilización de frecuencia fraccionada. (d) Coordinación de interferencias con transmisores y receptores de diversidad angular. (e) Transmisión conjunta multipunto cooperativa	22
Figura 6 Diagrama de flujo del proyecto basado en la tecnología LiFi, realizado en Microsoft Visio.....	26
Figura 7 Esquematzación final del funcionamiento del prototipo LiFi.....	27
Figura 8 Ejemplificación de la modulacón usada en los dispositivos LiFi con el primer código 110 00001, realizado en Matlab.....	28
Figura 9 Gráfico realizado en Matlab de la trayectoria 1 dada por el investigador	29
Figura 10 Prueba 1 – Trayectoria 1, realizado en Matlab	29
Figura 11 Prueba 2 – Trayectoria 1, realizado en Matlab	30
Figura 12 Prueba 3 – Trayectoria 1, realizado en Matlab	30
Figura 13 Prueba 4 – Trayectoria 1, realizado en Matlab	31
Figura 14 Prueba 5 – Trayectoria 1, realizado en Matlab	31
Figura 15 Gráfico realizado en Matlab de la trayectoria 2 dada por el investigador	32
Figura 16 Prueba 1 – Trayectoria 2, realizado en Matlab	32
Figura 17 Prueba 2 – Trayectoria 2, realizado en Matlab	33
Figura 18 Prueba 3 – Trayectoria 2, realizado en Matlab	33
Figura 19 Prueba 4 – Trayectoria 2, realizado en Matlab	34
Figura 20 Prueba 5 – Trayectoria 2, realizado en Matlab	34
Figura 21 Gráfico realizado en Matlab de la trayectoria 3 dada por el investigador	35
Figura 22 Prueba 1 – Trayectoria 3, realizado en Matlab	35
Figura 23 Prueba 2 – Trayectoria 3, realizado en Matlab	36
Figura 24 Prueba 3 – Trayectoria 3, realizado en Matlab	36
Figura 25 Prueba 4 – Trayectoria 3, realizado en Matlab	37
Figura 26 Prueba 5 – Trayectoria 3, realizado en Matlab	37
Figura 27 Diodo LED de alto brillo color blanco.....	45
Figura 28 Servidor WebSocket.....	45
Figura 29 ESP-WROOM-32 Tablero de desarrollo de 38 PIN PINOUT	46
Figura 30 Sensor Digital de Intensidad de Luz con Foto Resistencia LDR y controlador LM393	47
Figura 31 Arduino nano PINOUT	48
Figura 32 Controlador dual de motores Pololu TB6612FNG puente H.....	48
Figura 33 Sensor reflectivo Pololu QTR-8RC	49
Figura 34 Regulador de voltaje LM7805	49

Figura 35 LiPo 800mAh 7.4V	49
Figura 36 LiPo 550mAh 7.4V	50
Figura 37 Arduino pro mini PINOUT	50
Figura 38 FT232RL Módulo adaptador USB a Serial.....	51
Figura 39 Pruebas de modulación con un diodo led de alto brillo	52
Figura 40 Primer código transmitido, visualizado en el serial de Arduino	52
Figura 41 Modulación para 4 diodos led de alto brillo.....	52
Figura 42 PCB física para fabricación del foco led.....	52
Figura 43 Foco led para el transmisor LiFi	52
Figura 44 Pruebas con acrílico de foco led convencional	52
Figura 45 Prueba de dispersión de luz de foco led sin acrílico	53
Figura 46 Circuito físico para el receptor LiFi.....	53
Figura 47 Primer prototipo de aparato móvil	53
Figura 48 Pruebas de recepción con acrílico en el foco led	53
Figura 49 Montaje de la primera maqueta de experimentación	54
Figura 50 Fabricación de acrílicos tipo ojo de buey para focos led	54
Figura 51 Pruebas de transmisión y recepción con el primer escenario de pruebas	54
Figura 52 Fabricación de 16 focos para la experimentación	54
Figura 53 Pruebas con modo de transmisión maestro – esclavo	54
Figura 54 Escenario de pruebas final para el posicionamiento	54
Figura 55 Pruebas con la primera matriz de focos de 2x2 sin acrílicos	55
Figura 56 Resultados con el servidor web socket de una de las posiciones en la primera matriz de focos led.....	55
Figura 57 Pruebas de movimiento y velocidad del robot seguidor de línea.....	55
Figura 58 Encendido de los 16 focos led sin acrílicos y con un dispositivo independiente para la modulación de cada foco	55
Figura 59 Pruebas con dos matrices de focos, 8 focos led	56
Figura 60 Primera trayectoria dada por el investigador para la experimentación	56
Figura 61 Segunda trayectoria dada por el investigador para la experimentación.....	56
Figura 62 Tercera trayectoria dada por el investigador para la experimentación	56
Figura 63 Foco led modelado en 3D	56
Figura 64 PCB para la construcción del foco led	56
Figura 65 Simulación del foco led.....	57
Figura 66 Robot seguidor de línea modelado en 3D	57
Figura 67 PCB para la construcción del robot seguidor de línea	57
Figura 68 Simulación del robot seguidor de línea.....	57
Figura 69 Servidor WebSocket con posición en tiempo real e historial de datos del posicionamiento del aparato móvil.....	58
Figura 70 Prototipo final del aparato móvil en conjunto al receptor LiFi.....	58

RESUMEN

Dentro de las comunicaciones ópticas inalámbricas se encuentra la tecnología LiFi, basada en el protocolo IEEE 802.15.7, su funcionamiento se destaca por utilizar la luz visible para enviar la información hacia un receptor encargado de transformar las variaciones de la misma en señales digitales. Con el nuevo desarrollo de esta tecnología el investigador experimentó el LiFi en aplicaciones de localización en interiores para aparatos móviles en conjunto a un prototipo físico, que ayudó en la obtención de datos y resultados.

La investigación se la realizó mediante el método experimental, en primera instancia se llevó a cabo una recopilación bibliográfica y un estudio sobre de la tecnología LiFi. Luego se desarrolló el diseño base de un prototipo móvil y finalmente, se realizó el montaje del escenario de pruebas basado en la tecnología LiFi con 16 transmisores led utilizando codificación binaria con 3 bits de sincronismo y 5 bits de datos. El receptor LiFi está basado en el módulo ESP32 junto con un sensor de luz LDR el cual decodifica la señal recibida para determinar la posición del móvil en tiempo real. Finalmente se procedió a verificar la viabilidad del funcionamiento del prototipo realizando repeticiones del experimento con diferentes trayectorias.

Los resultados fueron analizados gráficamente mediante un mapa de calor de acuerdo a la frecuencia de repetición de la posición del móvil. La variabilidad de cada repetición se visualizó por la intensidad de color; entre más claro sea el color, mayor frecuencia de repetición y entre más oscuro el color, menor frecuencia de repetición, así como el color negro se utiliza para frecuencias de repetición nulas.

Palabras claves: LiFi, luz led, posicionamiento, código binario, sincronismo.

ABSTRACT

Within wireless optical communications it is found LiFi technology, based on the IEEE 802.15.7 protocol, its operation stands out for using visible light to send information to a receiver in charge of transforming the variations of the same digital signals. With the new development of this technology, the researcher experimented LiFi in indoor location applications for mobile devices together with a physical prototype, which helped obtaining data and results.

The research was carried out through the experimental method, in first instance a bibliographical compilation and a study on LiFi technology were carried out. Then the base design of a mobile prototype was developed and finally, the assembly of the test scenario based on LiFi technology with 16 LED transmitters using binary coding with 3 synchronism bits and 5 data bits was carried out. The LiFi receiver is based on the ESP32 module together with an LDR light sensor which decodes the received signal to determine the position of the mobile in real time. Finally, the viability of the prototype's operation was verified by repeating the experiment with different trajectories.

The results were analyzed graphically through a heat map according to the frequency of the mobile's position repetition. The variability of each repetition was visualized in color intensity; the lighter the color, the higher the frequency of repetition and the darker the color, the lower the frequency of repetition, just as black is used for null frequencies of repetition.

Keywords: LiFi, led light, positioning, binary code, synchronism.



Firmado electrónicamente por:
**ALISON TAMARA
VARELA PUENTE**

Docente Encargada: Alison Tamara Varela Puente
CI: 0606093904

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

LiFi, denominado Light Fidelity se basa en la transmisión de datos usando la capacidad de los diodos LED para modular su estado e intensidad a una velocidad imperceptible al ojo humano. Como receptor se tiene un fotodetector que se encarga de transformar las variaciones del diodo LED en una señal digital que es procesada para decodificar la información enviada [1].

Esta nueva tecnología se enmarca en las llamadas Comunicaciones ópticas inalámbricas, conocidas como OWC por sus siglas en inglés Optical Wireless Communications. Aquí se encuentran también tecnologías como los infrarrojos o el ultravioleta y que como su propio nombre indica se refiere a aquellas comunicaciones ópticas que a diferencia de la fibra óptica u otros medios guiados no requieren de conexión física entre los puntos a conectar [2].

Dentro de las OWC se ubican las comunicaciones emitidas por luz visible, conocidas como VLC por sus siglas en inglés Visible Light Communications que engloban las comunicaciones para la luz visible. El uso predominante de estas tecnologías son los enlaces punto a punto y tienen como medio de propagación el espectro de luz visible; el transmisor es una o varias luces, entre las que se pueden usar los diodos LED y el receptor es un fotodiodo encargado de percibir la luz transmitida. Las VLC y la tecnología LiFi comparten características basadas en el protocolo IEEE 802.15.7 [3].

LiFi no usa el espectro de radiofrecuencia, sino el de luz visible, por lo que escapa de las interferencias en él y no provoca ninguna en los dispositivos conectados inalámbricamente a otra tecnología. La parte del espectro utilizada por el LiFi es inmensamente más amplia que el usado para las comunicaciones en el espectro de radiofrecuencia, lo que abre un abanico de posibilidades para su utilización [4].

Esta tecnología hace frente al problema de la saturación de la parte del espectro electromagnético utilizada hasta ahora, es un avance en cuanto a eficiencia energética. Los diodos LED tienen una eficiencia mayor a las bombillas convencionales [4].

Sin embargo, LiFi es una tecnología que al encontrarse en desarrollo es increíblemente cara, tanto los productos que se encuentran a la venta como los kits de demostración. Se han creado numerosos eventos para dar a conocer los avances de esta tecnología al público como el Global LiFi Congress que han dado grandes pasos en la difusión. Incluso a pesar de no haber llegado al público corriente en Andalucía ya se puede visitar la primera sala equipada con LiFi gracias a las empresas Datlight y Lucibel. Por ende, el futuro que le depara a esta tecnología es más que emocionante y prometedor [4].

Por otro lado, el uso de sistemas de localización en interiores son muy variadas como por ejemplo pueden ser empleados en la ubicación de personal en hospitales para permitir la

gestión ágil de una emergencia o restringir a pacientes en determinadas áreas; control de acceso en edificaciones, espacios o secciones dentro de ellas; rescate de personal en incendios u otras catástrofes, lo que minimiza el riesgo de los rescatistas; espacios de trabajo inteligentes para facilitar la navegación de robots o el seguimiento de personas en centros de trabajo, edificios, hoteles [5].

El principal motivo en este proyecto fue la búsqueda de una solución para los problemas de localización en interiores usando una red inalámbrica, en este caso el LiFi. Este tipo de tecnología podría llegar a brindar la solución ideal para la implementación de sistemas de localización de un aparato móvil en interiores donde exista demasiada interferencia electromagnética.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad dentro de las redes de conexión inalámbrica están presentes algunas falencias en su funcionamiento que se lo ha venido evidenciando en el transcurso del tiempo, específicamente en redes inalámbricas de corto alcance como WLAN, Wireless Local Area Network, que es el estándar de comunicaciones en el que se basa la tecnología WiFi, interconectando diversos tipos de dispositivos electrónicos mediante ondas de radio. En este caso la seguridad es víctima del hackeo, ya que estas redes son detectables, llegan a ser manipuladas mediante aplicaciones web, manejadas por intrusos, lo que respecta a conexión se debe tener en cuenta las interferencias de las señales electromagnéticas como teléfonos inalámbricos que operen a la misma frecuencia, incluso llegan a ser redes inalámbricas cercanas u otros equipos conectados inalámbricamente a la misma red, la velocidad de transmisión de datos llega a ser limitada hasta unos 54Mbps además de las latencias existentes en la red [6].

La tecnología LiFi surgió gracias a una investigación de Herald Hass, de la Universidad de Edimburgo, que mostró el primer mecanismo LiFi para transmitir información a una velocidad de 10 Mbps en Estonia, se realizaron las primeras pruebas de laboratorio y se comprobó que se puede transmitir a una velocidad de 1 Gbps, o similar, 100 veces la tasa de transferencia promedio de una red WiFi normal [1].

Con el LiFi no existe la interferencia de elementos de radiofrecuencia por lo que no satura parte del espectro usado actualmente por otros sistemas, ya que usa luz visible. También permite un mayor control sobre a quién están llegando los datos y hace que las redes de corto alcance sean más seguras. LiFi podría ser de uso para sitios con sensibilidad a áreas electromagnéticas, ya sea; aviones, hospitales y la industria, sin causar interferencias. Además, no siempre sería necesario que las luces estuvieran encendidas a un nivel perceptible por el ser humano, la intensidad de luz podría disminuirse para que se pueda seguir operando de una forma no perceptible. También es necesario saber que los haces de luz no tienen un gran alcance, la distancia sería una limitación para esta tecnología [7].

La técnica que se usó para este sistema LiFi fue; el análisis de la escena: análisis desde un punto en concreto, ya sea con un tipo de sensor de luz, con el fin de detectar cambios en la misma. Proximidad: determina cuando un aparato móvil está cerca de una localización [8]. Para este caso en la experimentación del proyecto en el que se localizó un aparato móvil haciendo uso de la tecnología LiFi, se tomó en cuenta que la información se da por la luz LED que es el medio por el cual se envía un código correspondiente a la ubicación y el dispositivo receptor lee el código para determinar la posición en la que se encuentre el aparato móvil [10].

Existen numerosas aplicaciones donde se puede utilizar la tecnología para localización en interiores, tanto para el entorno industrial como para otros sectores, como la localización de activos, herramientas y equipos, que da a conocer en todo momento donde se encuentran los equipos y activos más importantes; localización de artículos, para conocer donde se ubican en una fábrica y realizar su trazabilidad; retail y marketing, para el conocimiento sobre el flujo de personas, en qué zonas tiene más interés un cliente [8].

1.2 OBJETIVOS

1.2.3 GENERAL

- Experimentar con la tecnología LiFi en aplicaciones de localización en interiores para aparatos móviles con un prototipo para la obtención de resultados.

1.2.4 ESPECIFICOS

- Diseñar un prototipo para la localización en interiores de un aparato móvil con parámetros que rigen la tecnología LiFi.
- Montar un prototipo LiFi con un aparato móvil para la experimentación en la localización en interiores.
- Verificar la viabilidad del funcionamiento del prototipo LiFi, obteniendo datos respecto a la experimentación.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Inicios de la tecnología LiFi

LiFi fue creado por el físico alemán Harald Haas, profesor y director del Centro de Investigación y Desarrollo LiFi de la Universidad de Edimburgo. Por ahora, LiFi permanece en ciertos casos de uso, principalmente en los mercados corporativos y profesionales. Tal es el caso de las nuevas lámparas Trulifi de Signify. Es capaz de alcanzar velocidades de hasta 250 Mbps, pero está diseñado para lugares como hospitales o aeropuertos. Cabe recalcar que LiFi no provoca interferencias de radiofrecuencia, varias aerolíneas como Air France han expresado su interés y en Le Bourget un modelo de cabina con potencia LiFi, han presentado su programa para brindar la posibilidad de tal conexión durante el vuelo. Entre las ventajas relevantes, mayor velocidad y reducción de cables a bordo [10].

2.2 Proyectos que conllevan la tecnología LiFi

Para el proyecto AAL X AAL, del VDA Group en colaboración con Solari Spa y la Universidad de Udine. La idea de ese proyecto es llevar la conexión LiFi al sector sanitario, ya que "no produce contaminación electromagnética, que tiene grandes implicaciones problemáticas en la maquinaria como los escáneres IMR". Este proyecto está en marcha en el Oncological Reference Center (CRO) en Aviano, Italia [11].

También se ha puesto a prueba en un simulacro de ataque a la red de metro. Lo protagonizaron Verizon, Nokia y Aegex Technologies, que usaron la tecnología LiFi para mantener comunicación bidireccional con una central de control. BT Defence, un proveedor de infraestructura para clientes militares y de inteligencia de Reino Unido, también desplegó LiFi en sus instalaciones de Adastral Park para dar conexión a 3.700 empleados [11].

Pure LiFi, una de las compañías pioneras en este terreno, ha desarrollado LiFi OFE, un sensor LiFi para móviles con el que se pueden conseguir velocidades de hasta 1 Gbps. Sin embargo, todavía tiene el mismo problema con los sensores ópticos para luminarias y computadoras: si no hay luz, no hay red [11].

2.3 Funcionalidad respecto a la tecnología LiFi

La iluminación led se está convirtiendo en una tecnología popular hoy en día, por motivo de ser utilizada para iluminar hogares, edificios, empresas, negocios, etc. La tecnología LiFi pretende usar este tipo de iluminación para transmitir información hacia cualquier dispositivo perceptible a la luz led o que esté dentro del área de incidencia de esta, mediante cambios de intensidad de la luz. Por tanto, la tecnología LiFi consiste en transmitir información por medio de la luz led [2].

LiFi no usa el espectro de radiofrecuencia, sino el de luz visible, por lo que escapa de las interferencias en él y no provoca ninguna en los dispositivos conectados inalámbricamente a través de él. La parte del espectro utilizada por el LiFi es inmensamente más amplia que el usado para las comunicaciones en el espectro de radiofrecuencia, lo que abre un abanico de posibilidades para su utilización [7].

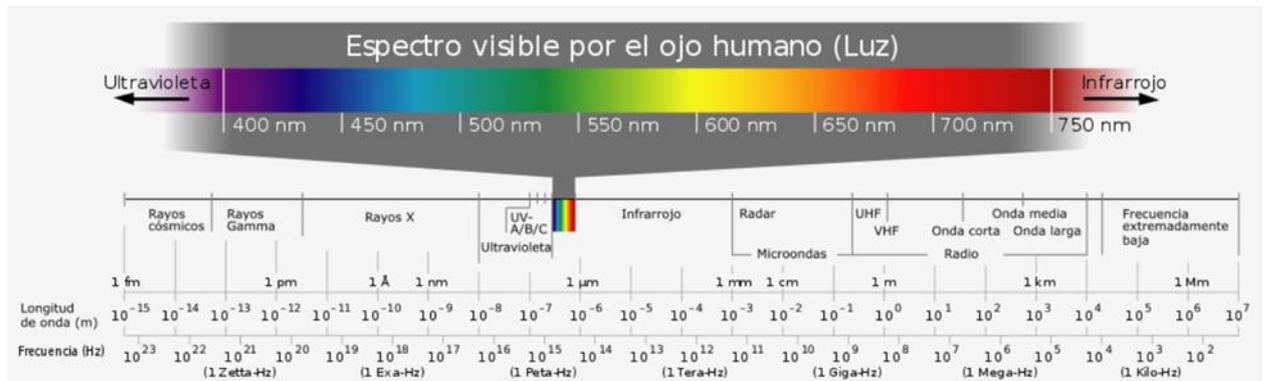


Figura 1 Espectro visible por el ojo humano (Luz)

Fuente: [12].

Siguiendo el principio de la comunicación por medio de la luz se tiene que los datos viajan a alta velocidad desde una lámpara led la cual posee un modular que transforma los pulsos eléctricos en pulsos de luz. La luz emitida por el led se apaga y se prende miles de veces por segundo, generando una señal binaria (0 y 1) que es detectada por un fotosensor para luego ser decodificada y procesada por un software de datos digitales instalado en los dispositivos LiFi. En este caso para la comunicación se rige por el estándar IEEE 802.15.7 que es empleado para la transmisión de información inalámbrica de las frecuencias de luz visible, otorgando una gran velocidad de transmisión que permite compartir información de un gran tamaño en pocos segundos [11].

2.4 Factibilidad del uso de la tecnología LiFi en la localización en interiores

Para el desarrollo en este proyecto de investigación se consideró la factibilidad para experimentar con la tecnología LiFi en aplicaciones de localización en interiores con aparatos móviles, tomando en cuenta que LiFi es el nombre popular de una tecnología de comunicaciones ópticas que lleva investigándose más de 100 años y que consiste en enviar información a frecuencias de entre 400 y 800 THz, es decir, en el espectro visible al ojo humano, en espacio abierto. LiFi pretende ser capaz de transmitir información con elementos de iluminación convencionales (bombillas LED) al mismo tiempo que se ilumina una estancia, y añadiendo únicamente unos pocos elementos baratos y fáciles de fabricar a las bombillas actuales. Básicamente se necesita un modulador en la parte transmisora que apagará y encenderá el foco de luz muy rápidamente (de forma imperceptible para los humanos), creando los ceros y unos binarios y un sensor detector de luz en la parte de recepción (por ejemplo, en el móvil) que recoge los cambios de luz y los almacena para poder realizar codificaciones respecto a la posición deseada [13].

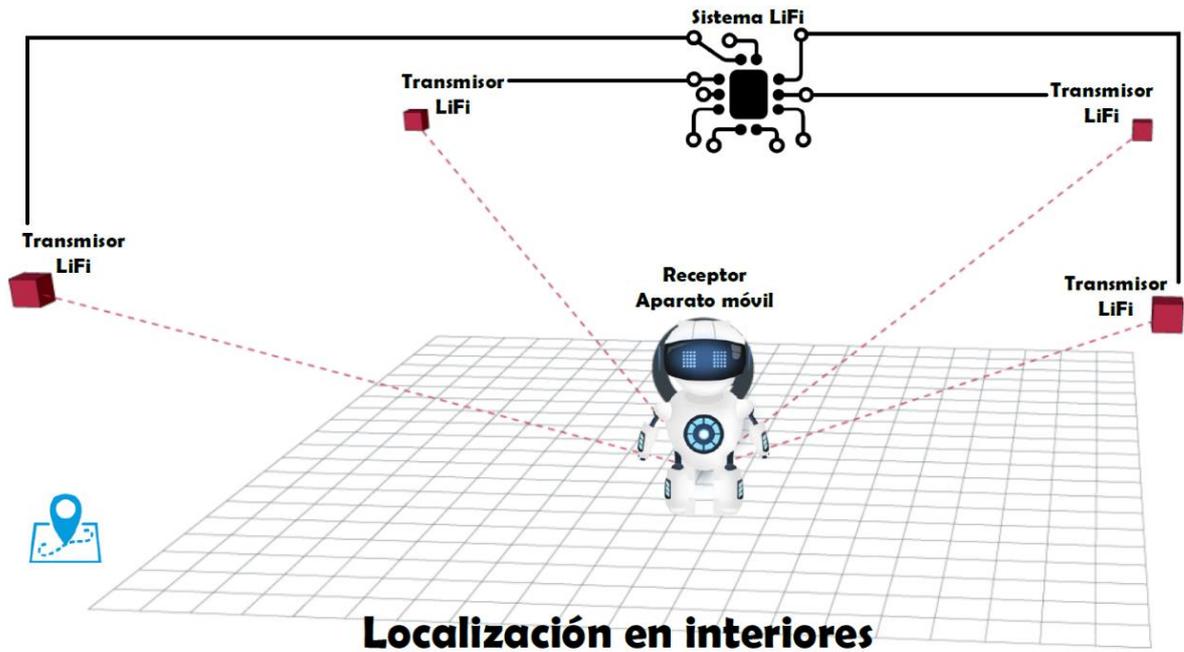


Figura 2 Esquematización del prototipo base para el sistema basado en la tecnología LiFi con la localización en interiores de un aparato móvil, realizado en Microsoft Visio
Fuente: Autor

El sistema LiFi empleado en la investigación mediante el uso de la experimentación lleva el montaje de un prototipo con lámparas led fabricadas, se moduló su intensidad y codificó la información que se desea transmitir por pulsos de luz mediante señales digitales de ceros y unos que tienen como codificación una determinada posición asociada a una lámpara led. El dispositivo móvil se encargó de recibir la información para procesarla, almacenarla y mostrarla gracias a la ayuda de un servidor web donde el usuario accede mediante una dirección IP a la información del posicionamiento del aparato móvil en tiempo real.

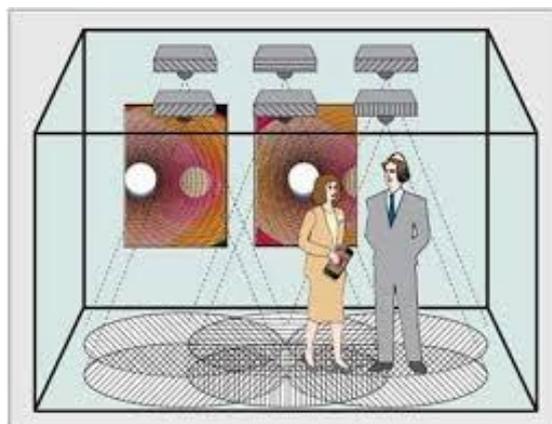


Figura 3 Esquematización de una red LiFi en interiores.
Fuente: [14].

Uno de los factores para determinar el rendimiento de los sistemas de transmisión VLC y las redes LiFi es la calidad del canal de comunicación, que es analizado en el prototipo. En un sistema óptico, el canal de transmisión se compone típicamente de dos partes. Una parte está relacionada con el filtrado de elementos frontales, y la segunda parte está relacionada con la propagación en el espacio libre en interiores [9]. Las señales ópticas experimentan una atenuación considerable cuando viajan en el espacio libre. Además, los componentes de la señal llegan al detector a través de diferentes caminos, incluidos los efectos físicos, como la reflexión y la dispersión. Además, el retardo y la atenuación de la señal a través de rutas dependen significativamente de las características del entorno interior especificado, como el tamaño de la habitación, la reflectancia y las propiedades de otros objetos [14].

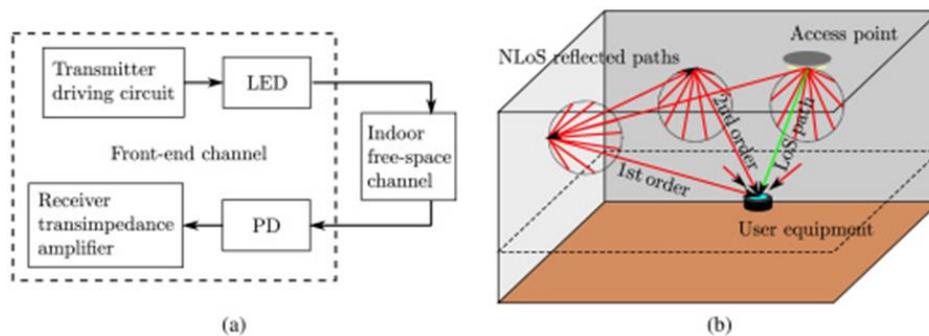


Figura 4 (a) Diagrama del canal LiFi. (b) Ilustración del canal VLC de espacio libre interior

Fuente: [15].

Para aumentar la capacidad agregada de una red LiFi, es deseable una reutilización espacial densa de los recursos de transmisión. Entonces, llega a existir la interferencia entre celdas, o CCI (interferencia co-canal), que se convierte en un factor limitante que determina el rendimiento general de las redes LiFi, sin embargo, en el caso de experimentación de la localización en interiores con esto se podrá determinar interferencias de posibles posiciones cercanas y aproximar a una localización del aparato móvil, obteniendo una estimación de su posición en cuanto el receptor obtenga los códigos enviados por el transmisor LiFi [15].

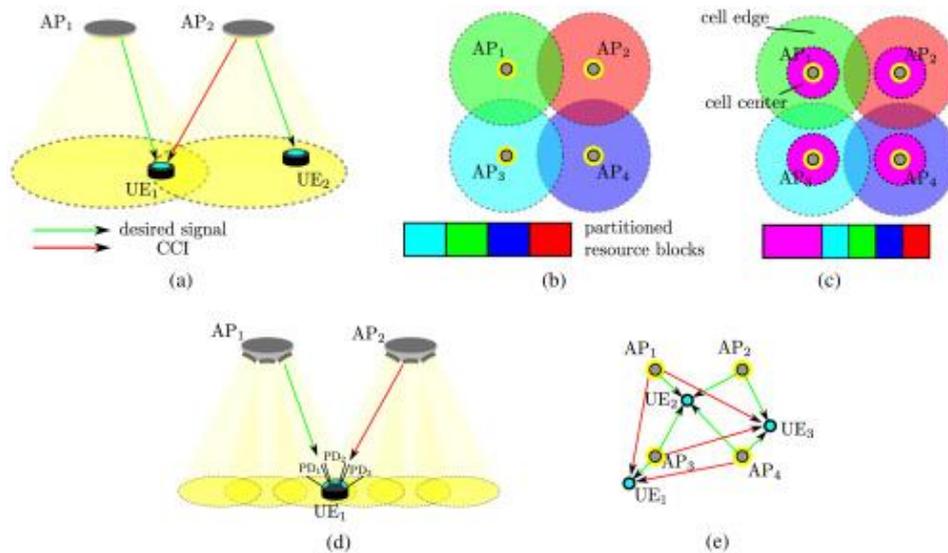


Figura 5 (a) Demostración de CCI. (b) Partición estática de recursos. (c) Reutilización de frecuencia fraccionada. (d) Coordinación de interferencias con transmisores y receptores de diversidad angular. (e) Transmisión conjunta multipunto cooperativa

Fuente: [15].

2.5 Proyectos de enfoque para el beneficio de un sistema de localización en tiempo real en interiores, diseñado para mejorar la experiencia del usuario.

El Boston Children's Hospital es uno de los grandes hospitales pediátricos, desde el año 2000 fue considerado el mejor hospital para niños en Estados Unidos. Este hospital ha desarrollado una aplicación gratuita para sus usuarios, basándose en la tecnología de RTLS. Esta app está pensada como una herramienta de ayuda, para mejorar la experiencia de los visitantes y facilitar el flujo en el interior del hospital, a modo de guía personal, que sirve para localizar y guiar al usuario hasta cualquier punto de interés del hospital [16].

El Aeropuerto Internacional de Portland ha creado una aplicación para todos sus pasajeros donde les ofrece multitud de información sobre los datos de los vuelos y los servicios del aeropuerto, lo que es muy útil para el viajero y además genera una oportunidad de negocio para el propio aeropuerto. La aplicación permite orientar al viajero para llegar de la forma más óptima a todas las zonas importantes tales como los check-in, controles de seguridad, puertas de embarque, etc.; informándole del tiempo necesario para llegar a cada punto, también ofrece información detallada de los diferentes servicios que se albergan en el aeropuerto: tiendas, restaurantes, baños, etc., y cómo llegar de la manera más rápida gracias al RTLS desde cualquier punto del mismo, así como el tiempo necesario [16].

Nebraska Furniture Mart ha puesto en marcha una app, para sus clientes, que mediante los sistemas de localización en interiores, permite a sus usuarios llegar hasta cualquier producto de una manera rápida y sencilla. Pero además a través de la aplicación los clientes pueden recibir mensajes push, con ofertas determinadas para diferentes

productos, que no recibiría en caso de no tener la app. El poder conocer cómo se mueven sus clientes por su establecimiento, dónde se paran más, cuáles son las zonas que más cuesta encontrar por parte de los clientes, etc.; es una información muy valiosa, ya que les permite replantear estrategias comerciales [16].

CAPITULO III. METODOLOGÍA

La presente investigación es de enfoque experimental, esto quiere decir que el investigador manipula una o más variables de estudio, para controlar de este modo el aumento o disminución de las mismas y su efecto mediante la observación. En otras palabras, un experimento conlleva cambiar el valor de una variable (la variable independiente) y estudiar su efecto sobre otra variable (la variable dependiente). Se lleva a cabo en condiciones controladas, con la finalidad de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular. Así, de tal modo tener una orientación hacia el futuro para posibles estudios respecto al tema que se está investigando, que en este caso llega a ser la tecnología LiFi.

Esta investigación se desarrolló en fases: en la primera se llevó a cabo una recopilación y estudio bibliográfico acerca de la tecnología LiFi y sus aplicaciones. Luego, se construyó el transmisor usando lámparas LED que envían bits de información mediante una modulación de intensidad de luz. Las lámparas tienen forma circular con un diámetro de 4.5cm y 20 diodos led de alto brillo color blanco. El receptor es basado en el módulo ESP32 con un sensor LDR y fue ensamblado junto con un pequeño prototipo de robot móvil. En la segunda fase, se construyó un escenario de pruebas con 16 transmisores organizados en 16 celdas en un espacio cuadrado de 4x4. Cada celda fue codificada de acuerdo a la su posición, Tabla 1 y se utilizaron 8 bits, 3 de sincronismo y 5 de información.

Tabla 1 Codificaciones para las posiciones de los nodos LiFi
Fuente: Autor

<i>Bits de sincronismo</i>	110
<i>Posición</i>	<i>Bits de información</i>
1	00001
2	00010
3	00011
4	00100
5	00101
6	00110
7	00111
8	01000
9	01001

10	01010
11	01011
12	01100
13	01101
14	01110
15	01111
16	10000

Los 3 bits de sincronismo se los transmitió en un tiempo de 18 milisegundos. Los 5 bits de información se los transmitió en 75 milisegundos, de este modo, cada trasmisor (foco) emite su información codificada en 93 milisegundos. Los bits se representan mediante la intensidad de luz que es generada con modulación PWM.

El receptor, decodifica los bits en base la intensidad; la misma que es equivalente a valor digital; si el valor se encuentra sobre cierto límite, se decodifica como 1 y si se encuentra debajo un límite se decodifica como un 0. Los valores decodificados se pueden visualizar en un servidor web embebido en el módulo ESP32. Además, el prototipo móvil se basó en un robot seguidor de línea.

En la tercera fase se llevó a cabo la verificación final del proyecto. Se llevaron a cabo pruebas considerando varios escenarios con diferentes trayectorias. Cada trayectoria fue trazada con un color negro sobre una superficie blanca, la misma que era recorrida por el robot seguidor de línea y al mismo tiempo este generaba el historial de la trayectoria determinada a través de su sensor.

3.1 Operacionalización de variables.

Tabla 2 Operacionalización de variables.

Fuente: Autor

Variables	Concepto	Indicadores	Medio
Independiente: Nodo LiFi	Utilización de la cantidad de nodos para verificar la variabilidad de la posición con el aparato móvil.	Adimensional	Experimentación
Dependiente: Error de posicionamiento	Análisis entre la posición real y la medida con el aparato móvil.	Gráfica	Software

3.1.1 Variable Independiente

La cantidad de nodos LiFi al finalizar el experimento es de 16 nodos, cada uno constituido por un foco led que abarca 20 diodos led de alto brillo y un Arduino versión pro-mini para su modulación.

3.1.2 Variable Dependiente

Para el error de posicionamiento se lo realizó mediante las trayectorias dadas por el investigador, comparando las trayectorias ideales con las lecturas obtenidas (trayectoria real) del historial de datos del servidor web.

3.2 Población para el proyecto.

Para este caso de investigación mediante la experimentación de la tecnología LiFi en el posicionamiento en interiores, la población está definida por el número de datos obtenidos, Tabla 3, en cada repetición del experimento (trayectorias).

Tabla 3 Población para el proyecto

Fuente: Autor

Trayectoria	Población				
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
1	1396	1785	1744	1116	1261
2	1062	1204	1137	1010	1427
3	249	334	274	228	308

3.3 Muestra para el proyecto

Para el muestreo en el proyecto de investigación se tiene en cuenta cada iteración, Tabla 4, de una trayectoria en particular.

Tabla 4 Muestra para el proyecto

Fuente: Autor

Trayectoria	Muestra
1	5
2	5
3	5

3.4 Diagrama de flujo del proyecto de investigación

En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo del desarrollo completo del proyecto de investigación.

- Se inició conociendo los parámetros que rigen el principio de funcionamiento del LiFi, realizando un diseño para el prototipo del transmisor y receptor. Determinando el medio, tecnología, programación.
- Se procedió a construir un aparato móvil, se lo diseñó rigiendo los criterios para su experimentación.
- Se determinó los nodos y el error de posicionamiento para la localización en este caso en interiores con el aparato móvil, finalmente se obtuvo los resultados basados en la experimentación.

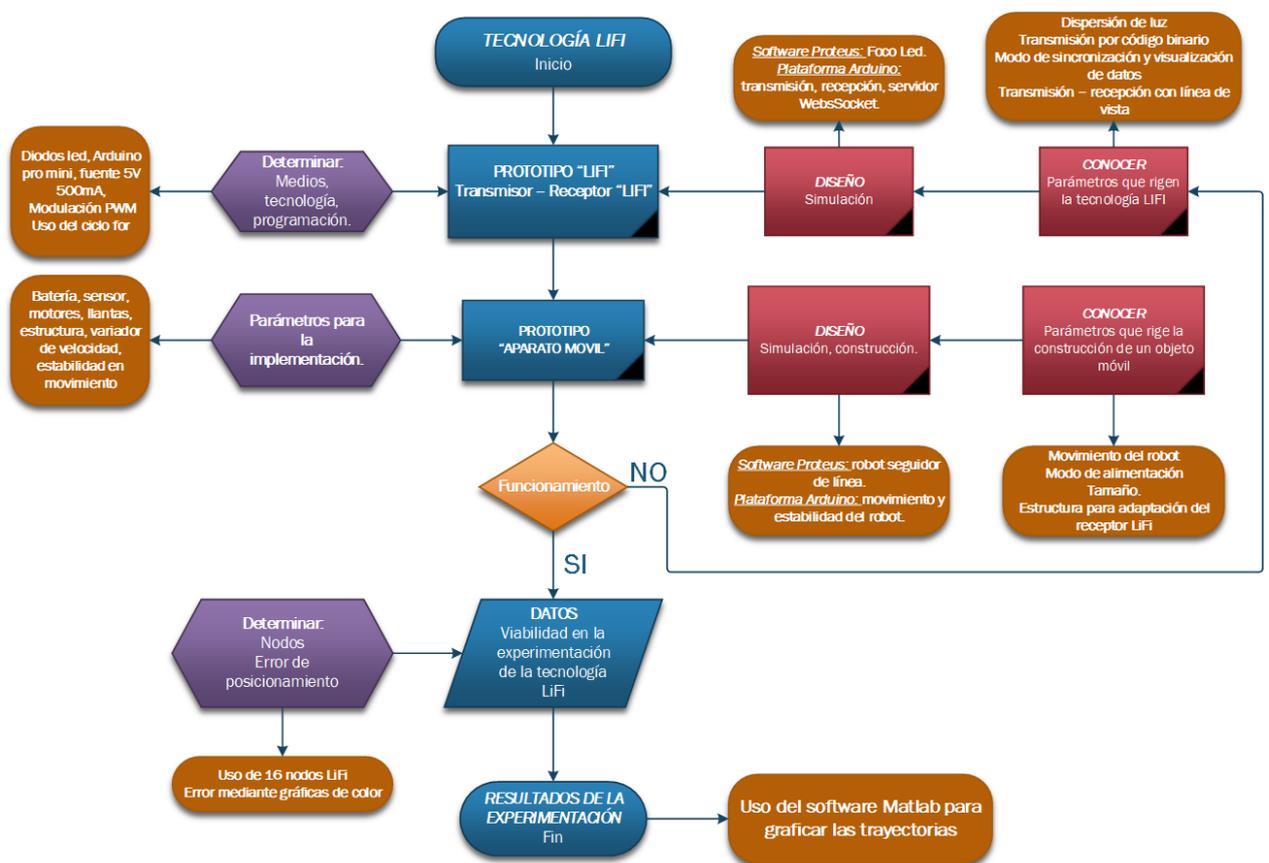


Figura 6 Diagrama de flujo del proyecto basado en la tecnología LiFi, realizado en Microsoft Visio
Fuente: Autor

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Prototipo y modulación usados para la experimentación LiFi en la localización de un aparato móvil en interiores.

En la figura 7 se detalla la esquematización física del prototipo LiFi, en donde se usa una fuente de voltaje de 5V a 500mA para la alimentación del transmisor, en conjunto a un Arduino versión Pro Mini que se encarga de modular el foco led transmisor. La información es enviada a través de la luz led, codificada en binario para la detección de todos los datos en el aparato móvil o robot seguidor de línea, el cual tiene un sensor LDR que capta las señales digitales de la luz led, para tal efecto ser decodificada y enviada al módulo ESP32 conectado a una red WiFi convencional y finalmente ser plasmada en una página con servidor WebSocket, mediante una dirección IP.

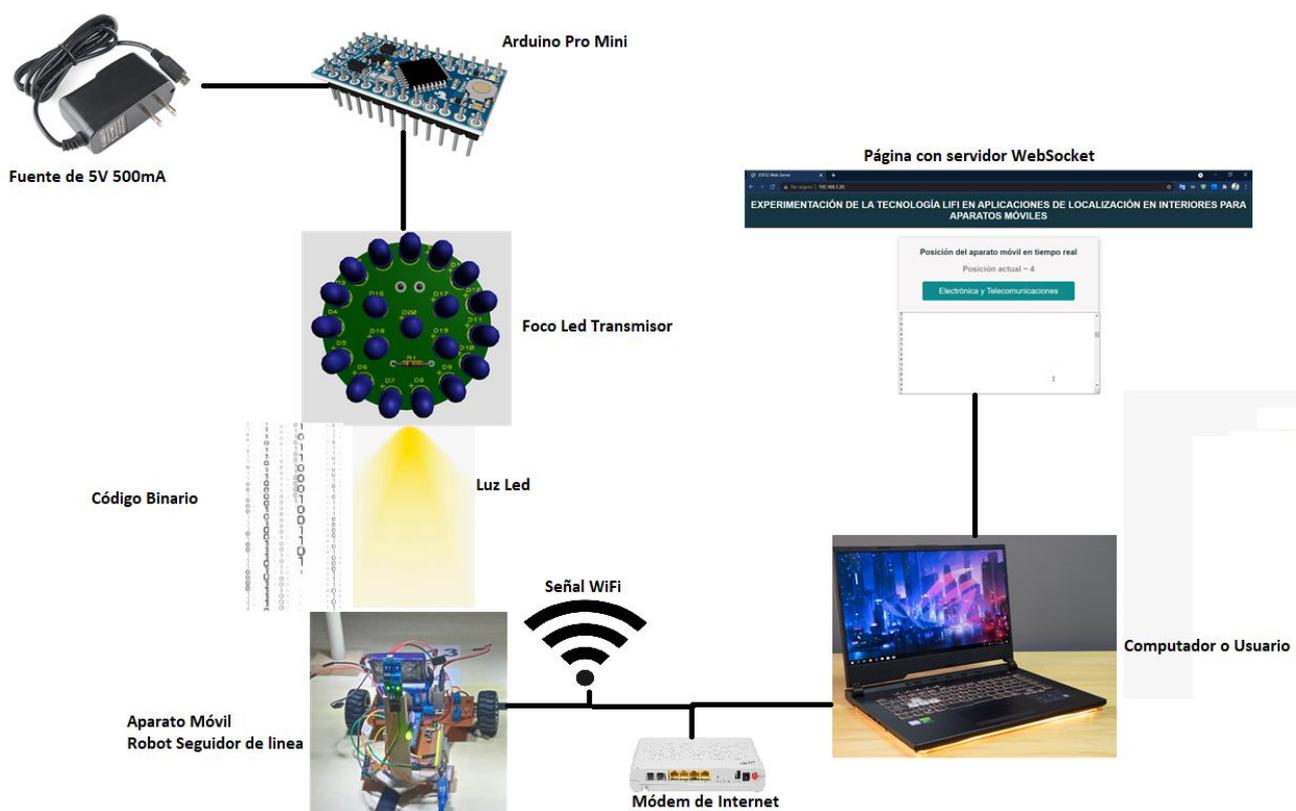


Figura 7 Esquematización final del funcionamiento del prototipo LiFi
Fuente: Autor

A continuación, en la figura 8 se observa la modulación para el transmisor LiFi con el uso de 3 bits de sincronismo (110) y 5 bits de datos (00001) lo cual corresponde a la primera posición del prototipo es decir al foco led número uno. Por consiguiente, se observa

que transcurre 18ms para el tiempo de sincronismo y 75ms para el tiempo de datos; la trama de datos se transmite en 93ms. En lo correspondiente a su amplitud un valor de 255 (100% del ciclo trabajo) del PWM y un cero corresponde a un valor de 136 en el PWM. Se realizó de esta manera para que el foco led no se llegue a opacar por completo, de este modo llega a estar encendido a una intensidad sin una variación brusca.

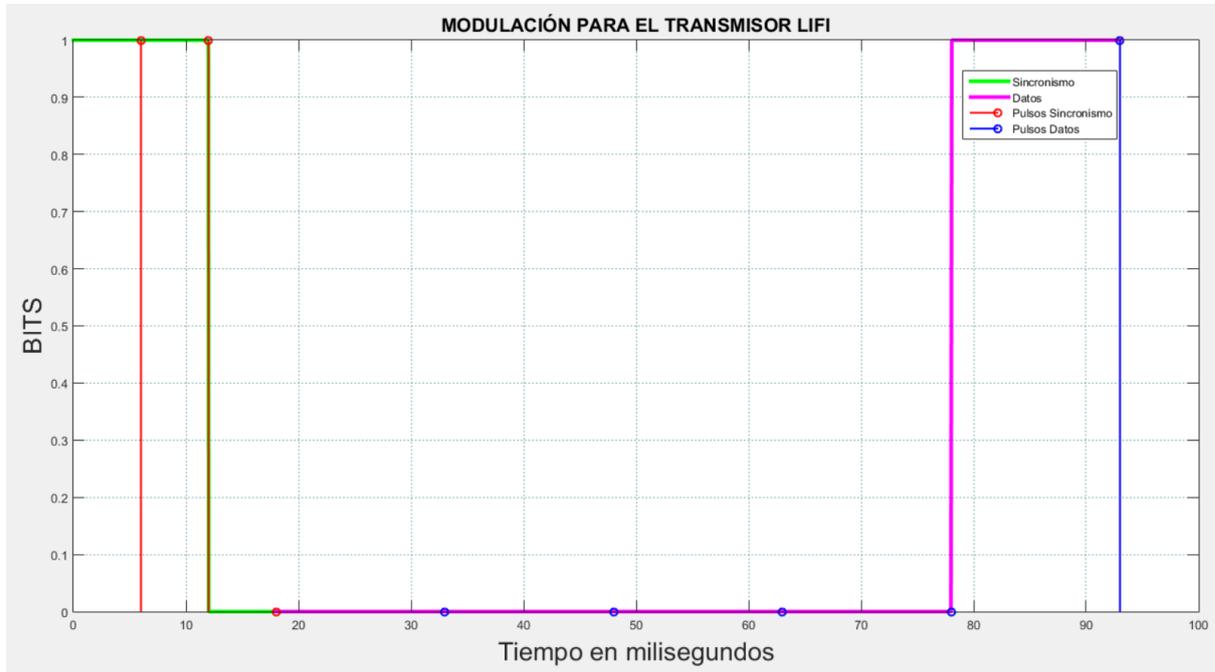


Figura 8 Ejemplificación de la modulación usada en los dispositivos LiFi con el primer código 110 00001, realizado en Matlab.

Fuente: Autor

4.1.2 Diagramas de las trayectorias y pruebas realizadas

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la experimentación de la tecnología LiFi en la localización en interiores para aparatos móviles, usando un robot seguidor de línea se obtuvo dichos datos. Con una matriz de nodos LiFi de 4x4 de 16 focos led. Para comparar las trayectorias real y calculada por medio de los sensores se utilizaron mapas de calor. El color verde claro representa una mayor frecuencia de repetición en la posición del móvil, el color verde oscuro, representa menor frecuencia de repetición y el color negro una posición nula.

4.1.1.1 Trayectoria 1

En la figura 9 se muestra la trayectoria real 1 que debería seguir aparato móvil.

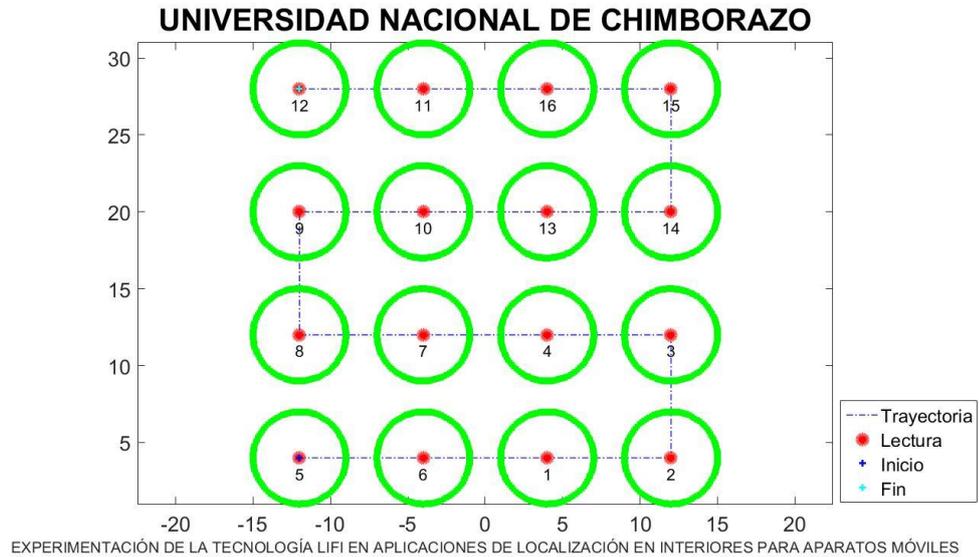


Figura 9 Gráfico realizado en Matlab de la trayectoria 1 dada por el investigador
Fuente: Autor

En la figura 10 se observa la primera prueba realizada en la trayectoria 1. Esta se consideró una prueba buena, debido a la visualización que se tiene respecto a la trayectoria que dio el investigador. Por causa de las óptimas frecuencias de repetición en cada posición.



Figura 10 Prueba 1 – Trayectoria 1, realizado en Matlab
Fuente: Autor

En la figura 11 se observa la segunda prueba realizada en la trayectoria 1. Se puede apreciar que es una prueba mala, ya que no existe una buena frecuencia de repetición en las posiciones y no se visualiza una trayectoria similar a la que dio el investigador.



Figura 11 Prueba 2 – Trayectoria 1, realizado en Matlab
Fuente: Autor

En la figura 12 se observa la tercera prueba realizada en la trayectoria 1. Esta se consideró una prueba buena, debido a la visualización que se tiene respecto a la trayectoria que dio el investigador. Por causa de las óptimas frecuencias de repetición en cada posición.



Figura 12 Prueba 3 – Trayectoria 1, realizado en Matlab
Fuente: Autor

En la figura 13 se observa la cuarta prueba realizada en la trayectoria 1. Esta se consideró una prueba regular, debido a la visualización que se tiene respecto a la trayectoria que dio el investigador. Por causa de tener frecuencias de repetición buenas y malas en cada posición.



Figura 13 Prueba 4 – Trayectoria 1, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 14 se observa la quinta prueba realizada en la trayectoria 1. Esta se consideró una prueba buena, debido a la visualización que se tiene respecto a la trayectoria que dio el investigador. Por causa de las óptimas frecuencias de repetición en cada posición.



Figura 14 Prueba 5 – Trayectoria 1, realizado en Matlab

Fuente: Autor

4.1.1.2 Trayectoria 2

En la figura 15 se muestra la trayectoria real 2 que debería seguir aparato móvil.

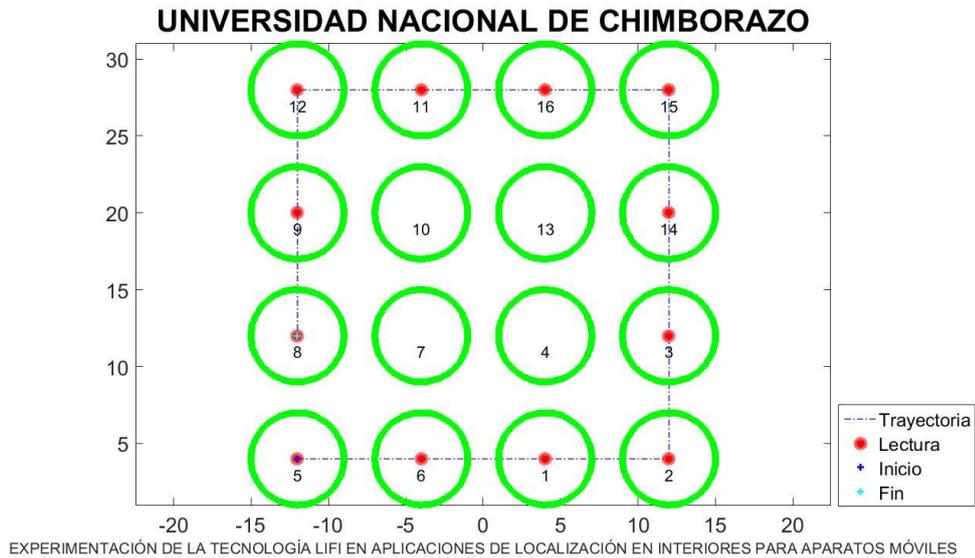


Figura 15 Gráfico realizado en Matlab de la trayectoria 2 dada por el investigador

Fuente: Autor

En la figura 16 se observa la primera prueba realizada en la trayectoria 2. Esta se consideró una prueba regular, debido a la visualización que se tiene respecto a la trayectoria que dio el investigador. Por causa de tener frecuencias de repetición buenas y malas en cada posición.



Figura 16 Prueba 1 – Trayectoria 2, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 17 se observa la segunda prueba realizada en la trayectoria 2. Se puede apreciar que es una prueba mala, ya que no existe una buena frecuencia de repetición en las posiciones y no se visualiza una trayectoria similar a la que dio el investigador.



Figura 17 Prueba 2 – Trayectoria 2, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 18 se observa la tercera prueba realizada en la trayectoria 2. Se puede apreciar que es una prueba mala, ya que no existe una buena frecuencia de repetición en las posiciones y no se visualiza una trayectoria similar a la que dio el investigador.



Figura 18 Prueba 3 – Trayectoria 2, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 19 se observa la cuarta prueba realizada en la trayectoria 2. Esta se consideró una prueba regular, debido a la visualización que se tiene respecto a la trayectoria que dio el investigador. Por causa de tener frecuencias de repetición buenas y malas en cada posición.



Figura 19 Prueba 4 – Trayectoria 2, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 20 se observa la quinta prueba realizada en la trayectoria 2. Esta se consideró una prueba buena, debido a la visualización que se tiene respecto a la trayectoria que dio el investigador. Por causa de las óptimas frecuencias de repetición en cada posición.



Figura 20 Prueba 5 – Trayectoria 2, realizado en Matlab

Fuente: Autor

4.1.1.3 Trayectoria 3

En la figura 21 se muestra la trayectoria real 3 que debería seguir aparato móvil.

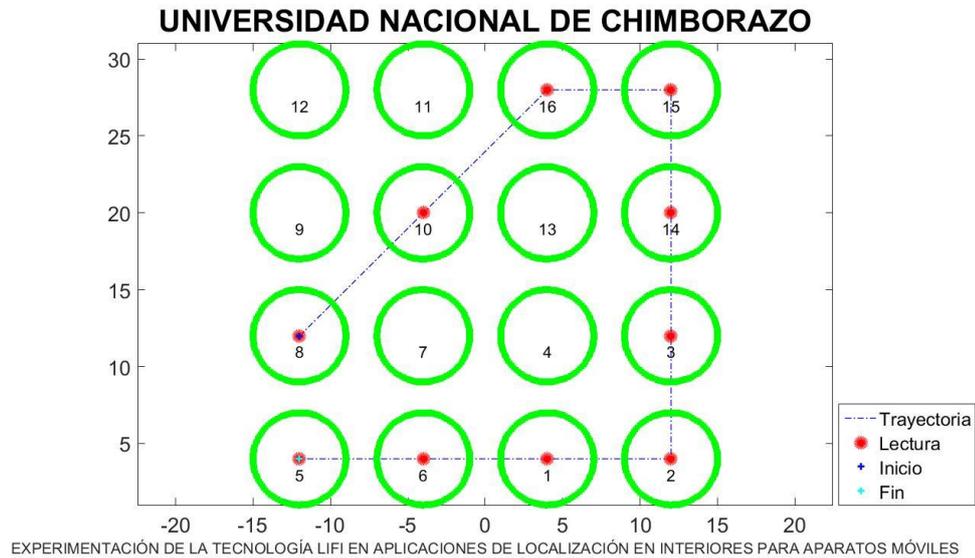


Figura 21 Gráfico realizado en Matlab de la trayectoria 3 dada por el investigador

Fuente: Autor

En la figura 22 se observa la primera prueba realizada en la trayectoria 3. Se puede apreciar que es una prueba mala, ya que no existe una buena frecuencia de repetición en las posiciones y no se visualiza una trayectoria similar a la que dio el investigador.



Figura 22 Prueba 1 – Trayectoria 3, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 23 se observa la segunda prueba realizada en la trayectoria 3. Se puede apreciar que es una prueba mala, ya que no existe una buena frecuencia de repetición en las posiciones y no se visualiza una trayectoria similar a la que dio el investigador.



Figura 23 Prueba 2 – Trayectoria 3, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 24 se observa la tercera prueba realizada en la trayectoria 3. Se puede apreciar que es una prueba mala, ya que no existe una buena frecuencia de repetición en las posiciones y no se visualiza una trayectoria similar a la que dio el investigador.



Figura 24 Prueba 3 – Trayectoria 3, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 25 se observa la cuarta prueba realizada en la trayectoria 3. Se puede apreciar que es una prueba mala, ya que no existe una buena frecuencia de repetición en las posiciones y no se visualiza una trayectoria similar a la que dio el investigador.



Figura 25 Prueba 4 – Trayectoria 3, realizado en Matlab

Fuente: Autor

En la figura 26 se observa la quinta prueba realizada en la trayectoria 3. Esta se consideró una prueba buena, debido a la visualización que se tiene respecto a la trayectoria que dio el investigador. Por causa de las óptimas frecuencias de repetición en cada posición



Figura 26 Prueba 5 – Trayectoria 3, realizado en Matlab

Fuente: Autor

Tabla 5 Pruebas realizadas en 3 trayectorias

Fuente: Autor

Trayectoria	Pruebas		
	Buenas	Malas	Regular
1	3	1	1
2	1	2	2
3	1	4	0

4.1.3 Error de posicionamiento

Como se observa en las figuras de las pruebas realizadas, se aprecia la variabilidad de las diferentes repeticiones de acuerdo a cada trayectoria dada por el investigador. Se utilizó el color verde para una mejor apreciación en el posicionamiento y el poder observar la trayectoria que se esquematiza mediante un gráfico de color de acuerdo a la frecuencia de repetición obtenida en cada reiteración del experimento. Dicho de otra manera, si el color verde es más claro da entender que existió una frecuencia de repetición mayor en la prueba realizada y si el color verde se torna oscuro la frecuencia de repetición fue menor, y para repeticiones nulas se esquematiza con el color negro.

4.2 DISCUSIÓN

A continuación, se describe y contrasta el desarrollo de la investigación, partiendo del concepto de experimentación para la tecnología LiFi con enfoque al posicionamiento en interiores de un aparato móvil. En cuando a evidencias gráficas de relevancia en la investigación se las puede apreciar en la sección de Anexos.

4.2.1 Inicios del experimento

Se comenzó modulando la intensidad de luz de un diodo led para que este pueda parpadear a una velocidad que se llegue a notar, la variación de dicha intensidad no tenía que llegar a apagar el led por completo. Para tal efecto se fue aumentando la velocidad de parpadeo del diodo led para obtener cierto rango de variación de la intensidad de luz.

4.2.2 Pruebas para construcción del foco led

Para la construcción del foco led se tuvo en cuenta tener un tamaño considerable a los focos led convencionales usados en los hogares. De acuerdo a la experimentación para cubrir la circunferencia de diámetro 4.5cm se utilizó 20 diodos led para un solo foco, en donde se realizó la simulación y esquematización del foco con ayuda del software proteus y

así de esta manera llegar a construir la PCB del foco. Es importante resaltar que se construyó 16 focos led para la experimentación.

4.2.3 Pruebas de dispersión de luz del foco led en conjunto al escenario de experimentación

Una vez construido el foco led se procedió hacer la instalación en el escenario de experimentación en donde se fue probando la altura a la que está localizado el aparato móvil desde el foco led hasta obtener ya una transmisión y recepción de datos de manera correcta y fiable. La altura final máxima a la que se llegó finalizando el experimento es de 38cm, tomando en cuenta la altura del aparato móvil que es de 13cm, dejando así de esta manera una altura de 25cm desde el foco led hasta el sensor LDR que detecta la variación de la luz led. Cabe recalcar que se llegó a esta altura por motivo que la transmisión tiene que ser con línea de vista directa y verificando que los cambios en la intensidad de luz lleguen a ser detectables por el aparato móvil.

4.2.4 Pruebas para la colocación de los focos led con matrices de 2x2

De acuerdo a las pruebas realizadas físicamente en el laboratorio de experimentación dado por el investigador, se llegó finalmente a colocar cada foco a una distancia de 16cm de centro a centro para la colocación de la primera matriz de 2x2 focos. Una vez realizadas las pruebas con 4 focos led y el aparato móvil o robot seguidor de línea se procedió a la instalación de una segunda matriz de focos led, teniendo así 8 focos led instalados en el escenario. Finalmente se replica el procedimiento, obteniendo resultados viables en donde se instalaron 16 focos led, listos para poder experimentar el posicionamiento en interiores con el aparato móvil.

4.2.5 Construcción de la maqueta de pruebas para la tecnología LiFi

Por consiguiente, en relación a las medidas de distancia utilizadas de foco a foco se obtuvo una maqueta de dimensiones: 122 cm de largo y 122 cm de ancho, con altura de 38 cm, obteniendo una matriz general de 4x4 con 16 focos.

4.2.6 Construcción del aparato móvil

Para la construcción del aparato móvil se fabricó un pequeño robot el cual su movimiento fue manipulado por el investigador para así llegar a obtener datos de acuerdo a la experimentación en el posicionamiento en interiores. En primera instancia se construyó un robot manipulado por radio frecuencia, de acuerdo a los resultados y al movimiento no se hizo factible su utilización en la experimentación. Por último, se construyó un robot seguidor de línea, el cual, debido a su movimiento y variabilidad de la velocidad, en cuestión,

se hizo viable llegar a experimentar con un móvil de este tipo, ya que por esta razón se logra una mejor manipulación en el receptor LiFi y en la obtención de datos de acuerdo al posicionamiento. Dando así trayectorias planeadas por el investigador.

4.2.7 Método de visualización de datos para la posición del aparato móvil

Dentro de este marco en cuanto concierne a la obtención de datos y la visualización de la información se hizo uso del medio inalámbrico (WiFi) instalado en el receptor LiFi, colocado en el aparato móvil o robot seguidor de línea. Este dispositivo se encargó de almacenar, procesar y enviar la información a una red WiFi de uso común a la cual el aparato móvil está conectado y es así como dicha información es dirigida a una página con un servidor del tipo WebSocket, enlazada a una dirección IP de la red.

4.2.8 Método de alimentación para el aparato móvil y el receptor LiFi

Por motivo que la experimentación se relaciona al movimiento de un aparato móvil, se necesita baterías de alimentación, las cuales; para el robot seguidor de línea se usó una batería de polímero de litio de 7.4V con intensidad de corriente de 800mAh, en cuanto al receptor LiFi es alimentado con una batería de 7.4V de 550mAh, adaptado al regulador LM7805 con salida de 5VDC.

4.2.9 Método de análisis para el error de posicionamiento

En cuanto al análisis de datos se diseñó un software en Matlab, esquematizando el escenario propuesto, que permitió observar la incidencia de los datos respecto a las trayectorias que dio el investigador. Por motivo que los datos obtenidos eran demasiado grandes en cantidad se los redujo a la frecuencia de repetición, esto con ayuda de Excel. Una vez que se obtuvo la frecuencia de repetición se introdujo los datos en el software ya diseñado, el cual proporcionó una gráfica mediante color verde el cual tuvo una variabilidad respecto a su frecuencia de repetición.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- De acuerdo a la experimentación en el desarrollo del dispositivo transmisor LiFi, se usó varios métodos en el cual surgió la aplicación de un maestro y cuatro esclavos que no dio viabilidad en la implementación, debido a que el aparato móvil recorre una trayectoria dada y llega a existir la falencia donde no se puede estar transmitiendo un código por motivo de los retardos en la comunicación y de este modo no ser posible la detección de una posición.

- Para la transmisión LiFi en donde se necesita saber el posicionamiento de un aparato móvil, se encontró que todos los códigos de cada posición deben ser transmitidos al mismo tiempo en donde llega de igual forma a existir la interferencia de nodos vecinos y la variabilidad de códigos por el motivo de estar en movimiento el robot seguidor de línea.
- Cada transmisor LiFi está ligado a un dispositivo electrónico capaz de modular la intensidad de luz, llegando a una velocidad casi imperceptible al ojo humano en donde el nodo LiFi no se llega opacar por completo, dando la sensación que esté encendido como una luz led de uso común, la velocidad de transmisión de acuerdo a la experimentación llegó a ser de 93ms por nodo LiFi.
- En relación al modo de procesar la información transmitida se la realizó de acuerdo al concepto del funcionamiento de la tecnología LiFi, que viene a ser por medio de una codificación binaria de ceros y unos, de manera digital.
- Por medio de varias pruebas realizadas al inicio de la investigación se encontró que se requiere de sincronismo para cada transmisor con el receptor LiFi y lograr tener la viabilidad en conjunto al movimiento del aparato móvil, es por ello que se utilizó un código de 3 bits de sincronismo y 5 bits de datos para ser enviados y procesados.
- En cuanto al uso de acrílicos y dispersores de luz en los focos led, no resultó viable debido a una interferencia mayor al usar varios nodos LiFi, ya que la transmisión de esta tecnología tiene que ser con línea de vista desde el transmisor al receptor e influye esa dispersión de luz ya que llega a ser demasiado brusca.
- Por medio de la experimentación se trabajó con matrices de 2x2 focos led por motivo de verificar la dispersión de luz y la interferencia que se llegue a ocasionar con nodos LiFi vecinos con relación a donde se encuentre el aparato móvil. Al finalizar la investigación se desarrolló un prototipo final de una matriz general de 16 focos de 4x4.
- Para el análisis del error de posicionamiento se lo hace mediante gráficas que muestran la incidencia de los datos obtenidos en la experimentación por medio de la intensidad de color y la frecuencia de repetición en cada posición del escenario implementado.

5.2 RECOMENDACIONES

- En cuanto a los dispositivos de transmisión LiFi, basados en el tamaño de un foco led de uso común, se recomienda que el área de cobertura no deje huecos para envío

de datos, de acuerdo a este criterio; en un foco led de forma circular con diámetro de 4.5cm se usó 20 diodos led de alto brillo color blanco.

- Para futuras investigaciones se recomienda el diseño de focos led más grandes o de forma distinta, dependiendo del escenario y la forma de implementación respecto a esta tecnología.
- Si se va a trabajar con el posicionamiento con robots, el diseño de varias estructuras influye en la recepción de datos ya que la distancia desde el transmisor al receptor es un factor de suma importancia que se recomienda tener en cuenta, debido a la variación de la intensidad de luz emitida. Es por ello que se necesita calibraciones en relación a la intensidad de luz.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Muñoz de Frutos, “¿Qué es LiFi y cómo funciona?,” *computerhoy*, Dec. 19, 2015. <https://computerhoy.com/noticias/internet/que-es-lifi-como-funciona-38167>
- [2] J. M. García Bocuñano, “Diseño de red de acceso doméstica híbrida WiFi/LiFi,” Sevilla, 2019. [Online]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/92619/fichero/TFG-2619+GARC%C3%8DA+BOCU%C3%91ANO.pdf>
- [3] Acciona, “¿QUÉ ES Y CÓMO FUNCIONA LA TECNOLOGÍA LI-FI?,” *Bopoulsen, El País, The Venture Spain y Tecnología El País*, Jul. 13, 2016. <https://www.sostenibilidad.com/vida-sostenible/que-es-y-como-funciona-la-tecnologia-li-fi/>
- [4] “LI-FI LA NUEVA TECNOLOGÍA,” *Innovacion li-fi*, Mar. 07, 2016. <http://innovacionli-fi.blogspot.com/p/ventajas-y-desventajas.html>
- [5] E. Ortiz Guerra and S. Montejo Sánchez, “Algoritmos y métodos para la localización en interiores,” *tono - Revista Científico Técnica de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A.*, vol. 16, pp. 42–48, 2009, [Online]. Available: <https://www.revistatonoetecsa.cu/index.php/tono/article/view/48>
- [6] I. Santana, “Red Inalámbrica WIFI,” *redwifi.wordpress*, May 11, 2011. <https://redwifi.wordpress.com/ventajas-y-desventajas/>
- [7] D. Pardo, “Tecnología Lifi; el luminoso futuro que nos aguarda,” *PandoraFMS*, Feb. 28, 2019. <https://pandorafms.com/blog/es/tecnologia-lifi/>
- [8] ATRIA Innovation, “Sistemas de localización en interiores,” *Automatización, Industria 4.0, Logística 4.0*, Aug. 04, 2020. <https://www.atriainnovation.com/sistemas-localizacion-interiores/>
- [9] J. García, “LiFi: qué es, ventajas, limitaciones y casos de uso de la tecnología para tener conexión a Internet con luz,” *Xataka*, Jul. 16, 2019. <https://www.xataka.com/investigacion/lifi-que-ventajas-limitaciones-casos-uso-tecnologia-para-tener-conexion-a-internet-luz>

- [10] P. Rodríguez, “Tecnología Li-Fi: Qué es y cómo puede revolucionar las comunicaciones móviles,” *XatakaMovil*, Feb. 15, 2015. <https://www.xatakamovil.com/futuro/tecnologia-li-fi-que-es-y-como-puede-revolucionar-las-comunicaciones-moviles>
- [11] M. Espinosa and M. Vivanco, “Li-Fi: Velocidad de Internet sorprendente bajo la Luz Visible Li-Fi: Surprising Internet Speed Under Visible Light,” *Killkana Técnica*, vol. 1, pp. 1–6, Aug. 2017, [Online]. Available: https://killkana.ucacue.edu.ec/index.php/killkana_tecnico/article/download/76/124?inline=1
- [12] J. A. Reyes Murillo, “ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE COBERTURA 802.11 CON DISPOSITIVOS WIFI Y LIFI EN LA CARRERA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ,” Jipijapa, 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/3238/1/TESIS%20DIGITAL.-JUNIOR%20ALEXANDER%20REYES%20MURILLO.pdf>
- [13] G. P. Moreno Iza, “Prototipo de comunicación vía luz LI-FI, para la transmisión de datos mediante un web service,” 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4587/1/PI-000708.pdf>
- [14] W. J. Román Franco, C. G. Vera Suárez, and J. S. Córdova Aragundi, “APLICACIÓN DE LA NUEVA HERRAMIENTA DE COMUNICACIÓN DE DATOS DE FORMA INALÁMBRICA ‘LIFI UNA POSIBLE ALTERNATIVA DEL WIFI’ EN LAS INSTITUCIONES EDUCATIVAS,” *Atlante*, Oct. 2016, [Online]. Available: <https://www.eumed.net/rev/atlante/2016/10/lifi.html>
- [15] H. Haas *et al.*, “Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, pp. 190–203, Nov. 2019, [Online]. Available: https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/3D2A78A0-1522-4312-A431CB0E7C327A27_424075/jocn-12-2-A190.pdf?da=1&id=424075&seq=0&mobile=no
- [16] Á. García-Hoz Bañares and R. Martínez Pérez, “Aplicaciones prácticas de la localización «indoor» para mejorar la experiencia de los usuarios de museos, aeropuertos, hospitales y otros espacios,” *Congreso Ciudades Inteligentes*, Sep. 07, 2015. <https://www.esmartcity.es/comunicaciones/i-congreso-ciudades-inteligentes-localizacion-indoor>
- [17] AV Electronics, “Diodo LED Alto Brillo,” 2022. <https://avelectronics.cc/producto/diodo-led-alto-brillo-5mm/>
- [18] IONOS, “¿Qué es WebSocket?,” *Digital Guide*, Jul. 08, 2020. <https://www.ionos.es/digitalguide/paginas-web/desarrollo-web/que-es-websocket/>
- [19] ICHI.PRO, “Websockets, sondeos largos y eventos enviados por el servidor.” <https://ichi.pro/es/websockets-sondeos-largos-y-eventos-enviados-por-el-servidor-157173542823686>
- [20] Y. Fernández, “Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno,” *Xakata Basics*, Aug. 03, 2020. <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>

- [21] B. Pearn, “ESP32 - PinOut,” *studiopieters*, Feb. 2021.
<https://www.studiopieters.nl/esp32-pinout/>
- [22] “Sensor Digital de Intensidad de Luz con Foto Resistencia LDR con Controlador LM393,” *Solectro*, 2021. <https://solectroshop.com/es/sensores-de-luz-y-de-color/1299-sensor-digital-de-intensidad-de-luz-con-foto-resistencia-ldr-con-controlador-lm393.html>
- [23] “Arduino Nano,” *MCI Electronics*. <https://arduino.cl/arduino-nano/>
- [24] L. Llamas, “ESQUEMA DE PATILLAJE (PINOUT) DE ARDUINO UNO, NANO, MINI Y MEGA,” Oct. 28, 2015. <https://www.luisllamas.es/esquema-de-patillaje-de-arduino-pinout/>
- [25] “CONTROLADOR DUAL DE MOTORES POLOLU TB6612FNG PUENTE H,” *ElectroStore*, 2019. <https://grupoelectrostore.com/shop/modulos-y-shields/controladores-de-motores/controlador-dual-de-motores-pololu-tb6612fng-puente-h/>
- [26] “SENSOR REFLECTIVO POLOLU QTR-8RC,” *ElectroStore*, 2019.
<https://grupoelectrostore.com/shop/sensores/infrarrojos/sensor-reflectivo-pololu-qtr-8rc/>
- [27] V. Gras, “Regulador de voltaje 7805 y familia,” *e-ika electrónica blog*, Feb. 17, 2020. <https://blog.e-ika.com/index.php/2020/02/16/regulador-de-voltaje-7805-y-familia/>
- [28] “¿Qué es una batería LiPo?,” *mobus*. <https://mobus.es/blog/que-es-una-bateria-lipo/>
- [29] “CONVERSION CONVERSOR USB SERIAL TTL,” *TECMickro*, 2021.
https://tecmikro.com/conversores-convertidores/517-1303-conversor-convertidor-usb-serial-ttl.html#/307-cable-sin_cable_usb

ANEXOS

1. HARDWARE, SOFTWARE USADO EN LA IMPLEMENTACIÓN PARA EL PROTOTIPO DEL PROYECTO

1.1 Diodos LED de alto brillo color blanco

Led ultrabrillante Blanco de 5mm es un gran apoyo en la elaboración del proyecto ya que se lo utilizó como indicador de estado para el desarrollo de los focos en el transmisor LiFi, gracias a su luminosidad que puede captarse a mayor distancia. [17]

Color: Blanco

Voltaje: 3.2-3.4.

Corriente: 25 mA.

Longitud de onda: 625-630nm.

Intensidad lumínica: 14000-16000 mcd.



Figura 27 Diodo LED de alto brillo color blanco
Fuente: [17].

1.2 Servidor WebSocket

Para el manejo de datos y la visualización de información se realiza mediante un servidor web haciendo uso de WebSocket que es un protocolo de red basado en TCP que establece cómo deben intercambiarse datos entre redes. Puesto que es un protocolo fiable y eficiente, es utilizado por prácticamente todos los clientes. El protocolo TCP establece conexiones entre dos puntos finales de comunicación, llamados sockets. De esta manera, el intercambio de información puede llegar a ser en ambas direcciones [18].

En comunicaciones bidireccionales, que establece WebSocket, se encarga de intercambiar información en ambas direcciones a la vez. La ventaja de este intercambio es que se accede de forma más rápida a los datos. En concreto, WebSocket permite así una comunicación directa entre una aplicación web y un servidor WebSocket. Dicho de otra manera, la web solicitada se muestra en tiempo real. [19]

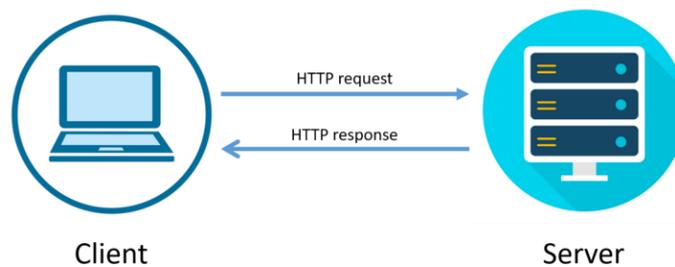


Figura 28 Servidor WebSocket
Fuente: [18].

1.3 Plataforma de programación Arduino

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. La plataforma permite la creación de diferentes tipos de microordenadores individuales que la comunidad de creadores puede ofrecer con diferentes maneras de uso. Arduino ofrece la plataforma Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), que es un

entorno de programación con el que un desarrollador puede crear aplicaciones para las placas, de manera que se les puede dar un tipo de utilidad a necesitar [20].

1.4 ESP32 Wifi y Bluetooth en un solo chip

ESP32 es una serie de SoC (por sus siglas en inglés, System on Chip) y módulos de bajo costo y bajo consumo de energía creado por Espressif Systems [21].

1.4.1 Conectividad inalámbrica

Este dispositivo cuenta con enlace WiFi, acorde al estándar 802.11 b/g/n con frecuencia de 2.4GHz, logrando velocidades de hasta 150 Mbits/s. También incluye comunicación Bluetooth compatible con Bluetooth v4.2 y Bluetooth Low Energy (BLE) [21].

1.4.2 ESP-WROOM-32 Tablero de desarrollo de 38 PIN PINOUT

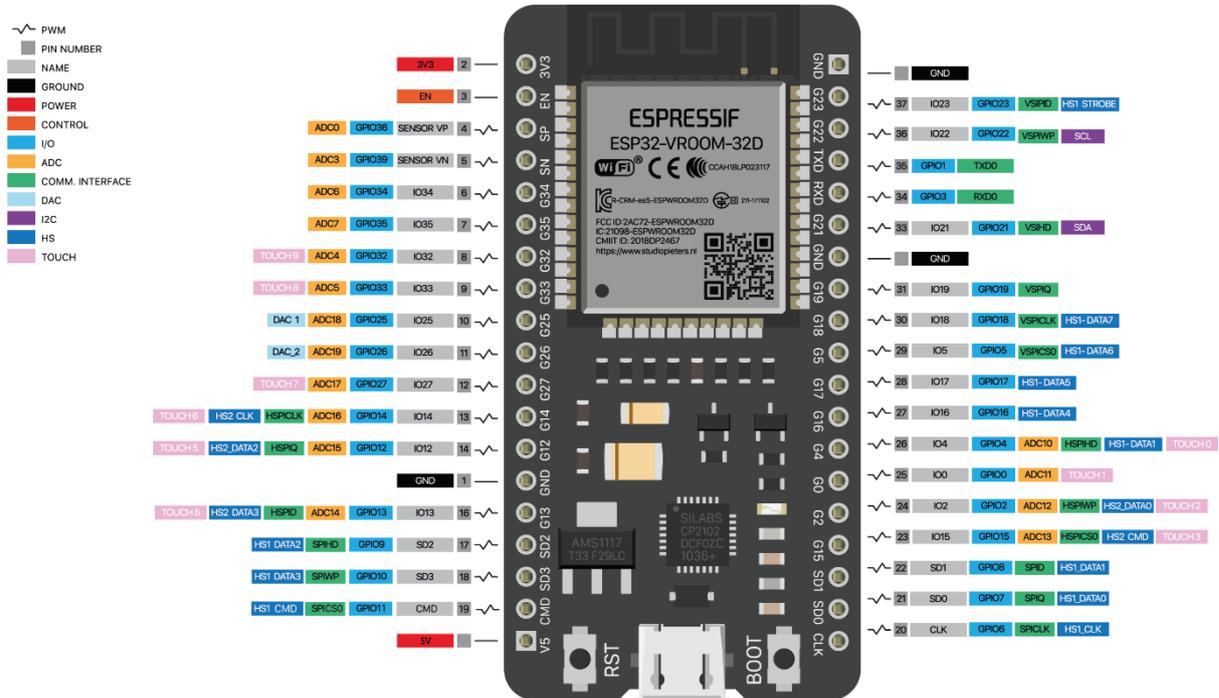


Figura 29 ESP-WROOM-32 Tablero de desarrollo de 38 PIN PINOUT

Fuente: [21].

1.5 Sensor Digital de Intensidad de Luz con Foto Resistencia LDR y controlador LM393

Este módulo de foto resistencia es muy sensible a la luz ambiental. La activación del microcontrolador o los módulos de retransmisión, el módulo de brillo de luz alcanza un umbral establecido, la salida es alta cuando la luz ambiente sobrepasa el umbral establecido.

El pin (DO) se puede conectar directamente con un dispositivo microcontrolador para detectar el ambiente de luz y establecer un interruptor de control de luz [22].

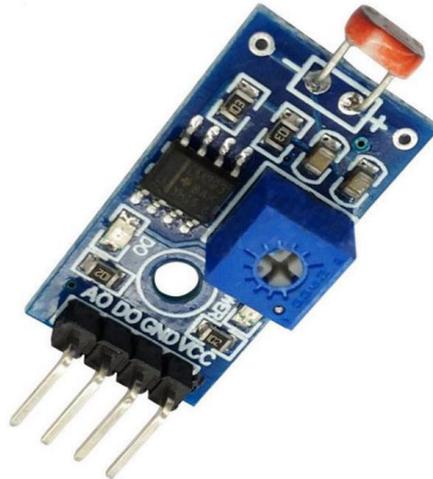
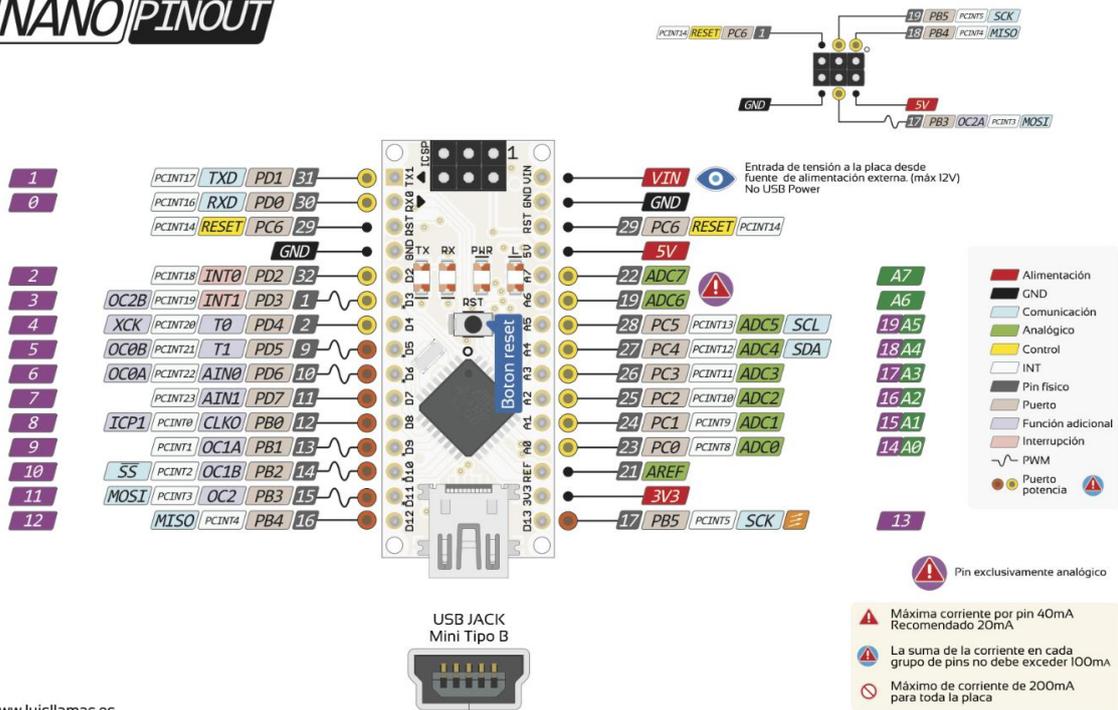


Figura 30 Sensor Digital de Intensidad de Luz con Foto Resistencia LDR y controlador LM393

Fuente: [22].

1.6 Arduino nano para el aparato móvil

Arduino Nano es una placa de desarrollo de tamaño compacto, completa y compatible con protoboards, basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usando con PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de 16Mhz, conexión Mini-USB, terminales para conexión ICSP y un botón de reseteo [23].



www.luisllamas.es

Figura 31 Arduino nano PINOUT

Fuente: [24].

1.7 Controlador dual de motores Pololu TB6612FNG puente H

TB6612FN puede impulsar de forma independiente 2 motores con funcionamiento a CC bidireccionales o 1 motor de tipo paso a paso bipolar. Una tensión de motor recomendada de 4,5 V a 13,5 V y una salida de corriente máxima de 3A por canal (1A continua) hacen de este un gran controlador de motor para motores de baja potencia [25].

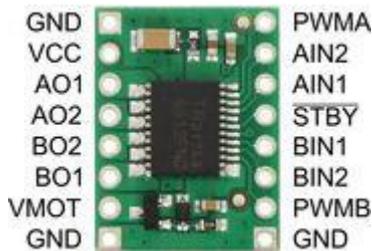


Figura 32 Controlador dual de motores Pololu TB6612FNG puente H

Fuente: [25].

1.8 Sensor reflectivo Pololu QTR-8RC

Este módulo de sensor tiene 8 pares de LED / fototransistor IR montados en un paso de 0.375''(9.525 mm), lo que lo convierte en un excelente detector para un robot de seguimiento de línea. Los pares de LED están dispuestos en serie para reducir a la mitad el consumo de corriente, y un MOSFET permite girar los LED apagado para opciones

adicionales de detección o de ahorro de energía. Cada sensor proporciona una salida digital de E/S medible separada [26].



Figura 33 Sensor reflectivo Pololu QTR-8RC

Fuente: [26].

1.9 Regulador de voltaje LM7805

LM7805 es un circuito integrado con la capacidad de mantener un voltaje estable de 5V, con 3 terminales, pin de entrada, masa y pin de salida. En su pin de entrada podemos aplicar cualquier voltaje entre 7V más que el voltaje de salida y 35V [27].

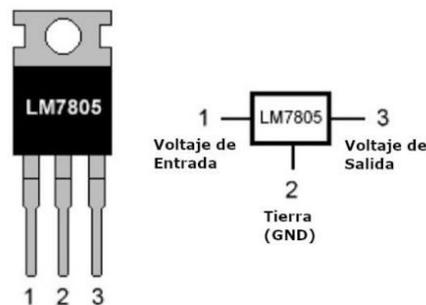


Figura 34 Regulador de voltaje LM7805

Fuente: [27].

1.10 Batería de polímero de litio

La batería de polímero de iones de litio, de ion de litio polímero o más comúnmente batería de polímero de litio (abreviadamente Li-poli, Li-Pol, LiPo, LIP, PLI o LiP) son pilas recargables (células de secundaria), compuestas generalmente de varias células secundarias idénticas en paralelo para aumentar la capacidad de la corriente de descarga, y están a menudo disponibles en serie de "packs" para aumentar el voltaje total disponible [28].



Figura 35 LiPo 800mAh 7.4V

Fuente: [28].



Figura 36 LiPo 550mAh 7.4V
Fuente: [28].

1.11 Arduino pro mini para cada dispositivo transmisor LiFi

El Arduino Pro Mini a diferencia de las demás placas no incluye un convertor en placa (por un tema de reducción de precio), por lo que es necesario utilizar un convertor externo para la programación del chip o para la comunicación serial [24].

PRO MINI PINOUT

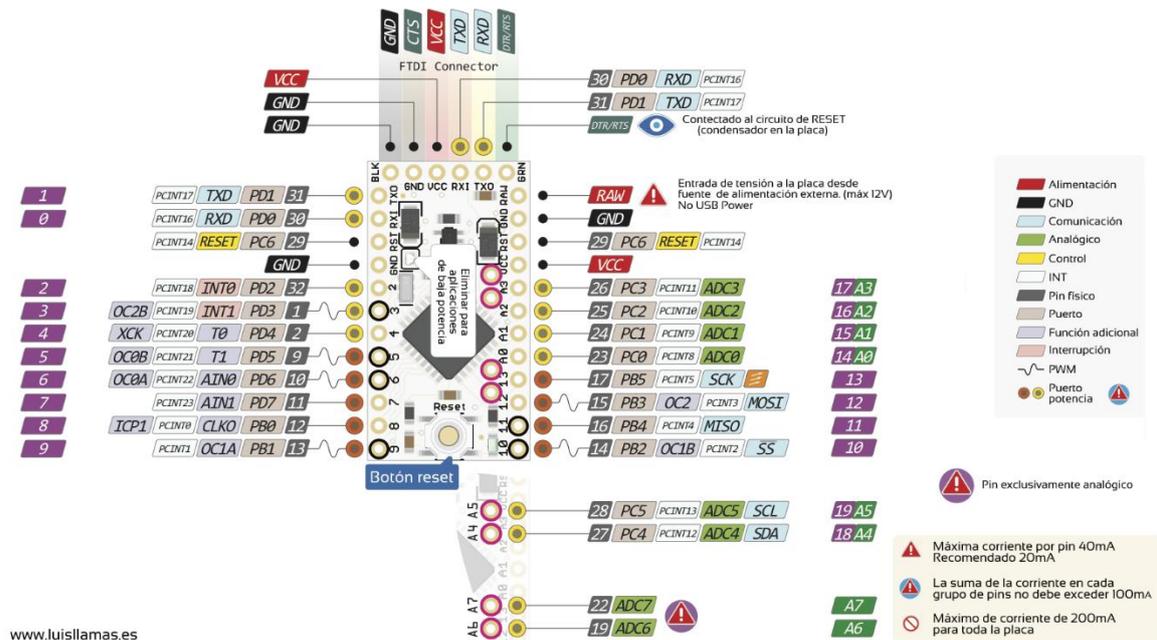


Figura 37 Arduino pro mini PINOUT
Fuente: [24].

1.12 FT232RL Módulo adaptador USB a Serial

Este módulo es una herramienta muy útil que permite conectar una computadora con cualquier dispositivo serial a través del puerto USB. Se puede emplear para la programación del Arduino Pro Mini. Cuando conecte el convertor al puerto USB, el computador lo

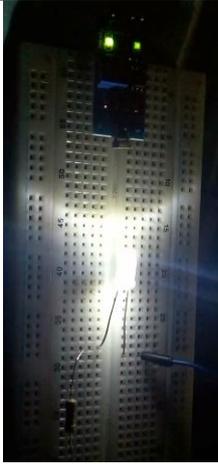


Figura 39 Pruebas de modulación con un diodo led de alto brillo
Fuente: Autor

```

-> POSICION B
-> cod1 = 1
-> cod2 = 0
-> cod3 = 1
-> CODIGO : 101
-> POSICION B
-> cod1 = 1
-> cod2 = 0
-> cod3 = 1
-> CODIGO : 101
-> POSICION B
-> cod1 = 1
-> cod2 = 0
-> cod3 = 1
-> CODIGO : 101
-> POSICION B

```

Figura 40 Primer código transmitido, visualizado en el serial de Arduino
Fuente: Autor

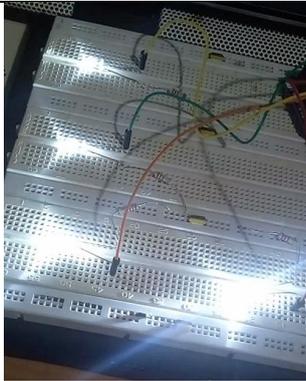


Figura 41 Modulación para 4 diodos led de alto brillo
Fuente: Autor

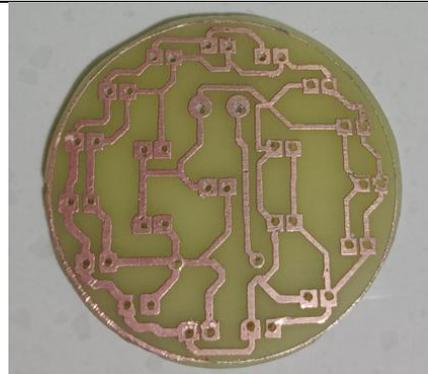


Figura 42 PCB física para fabricación del foco led
Fuente: Autor

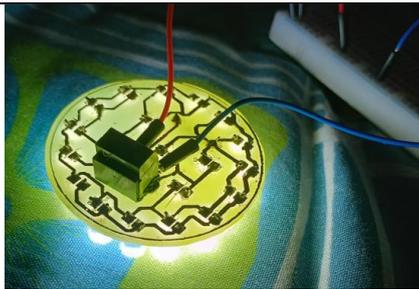


Figura 43 Foco led para el transmisor LiFi
Fuente: Autor

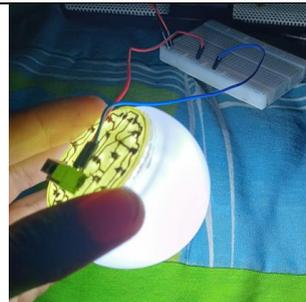


Figura 44 Pruebas con acrílico de foco led convencional
Fuente: Autor

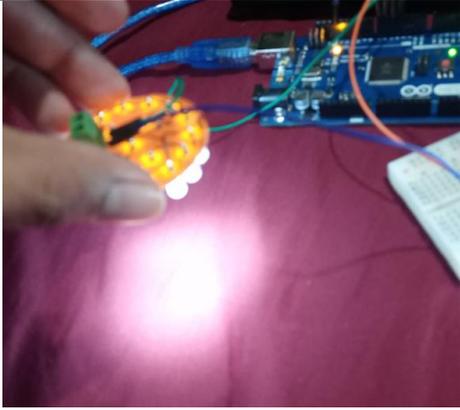


Figura 45 Prueba de dispersión de luz de foco led sin acrílico
Fuente: Autor

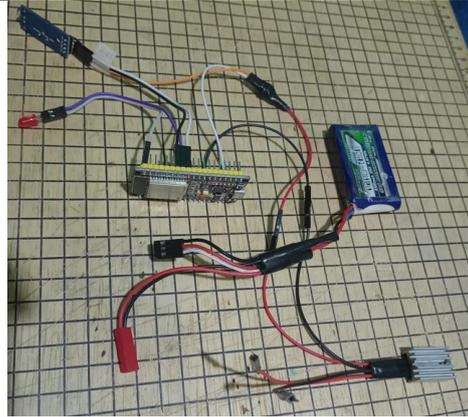


Figura 46 Circuito físico para el receptor LiFi
Fuente: Autor

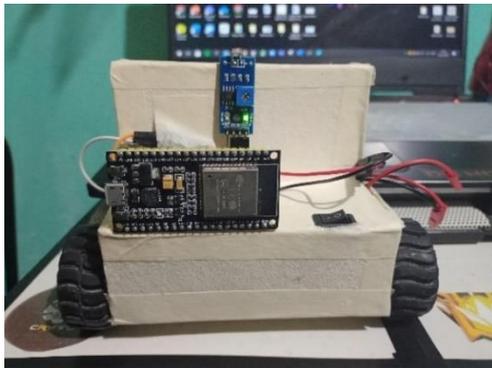


Figura 47 Primer prototipo de aparato móvil
Fuente: Autor

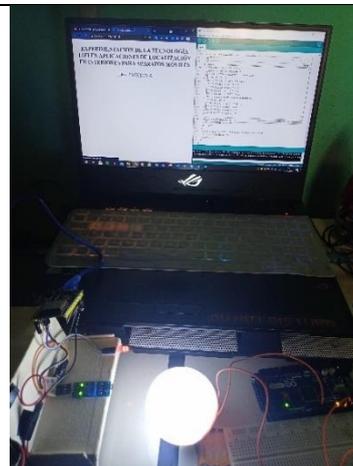


Figura 48 Pruebas de recepción con acrílico en el foco led
Fuente: Autor



Figura 49 Montaje de la primera maqueta de experimentación
Fuente: Autor



Figura 50 Fabricación de acrílicos tipo ojo de buey para focos led
Fuente: Autor



Figura 51 Pruebas de transmisión y recepción con el primer escenario de pruebas
Fuente: Autor



Figura 52 Fabricación de 16 focos para la experimentación
Fuente: Autor



Figura 53 Pruebas con modo de transmisión maestro – esclavo
Fuente: Autor



Figura 54 Escenario de pruebas final para el posicionamiento
Fuente: Autor



Figura 55 Pruebas con la primera matriz de focos de 2x2 sin acrílicos
Fuente: Autor

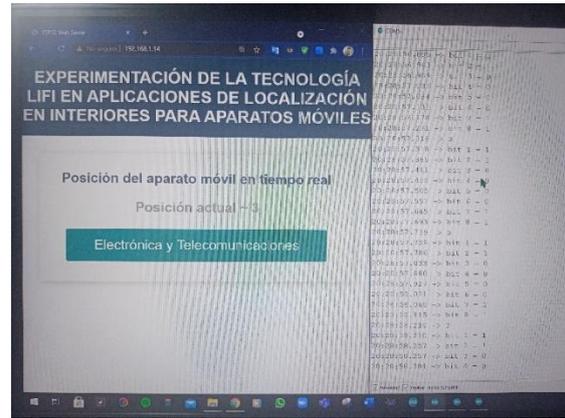


Figura 56 Resultados con el servidor web socket de una de las posiciones en la primera matriz de focos led
Fuente: Autor



Figura 57 Pruebas de movimiento y velocidad del robot seguidor de línea
Fuente: Autor



Figura 58 Encendido de los 16 focos led sin acrílicos y con un dispositivo independiente para la modulación de cada foco
Fuente: Autor



Figura 59 Pruebas con dos matrices de focos, 8 focos led
Fuente: Autor



Figura 60 Primera trayectoria dada por el investigador para la experimentación
Fuente: Autor



Figura 61 Segunda trayectoria dada por el investigador para la experimentación
Fuente: Autor



Figura 62 Tercera trayectoria dada por el investigador para la experimentación
Fuente: Autor

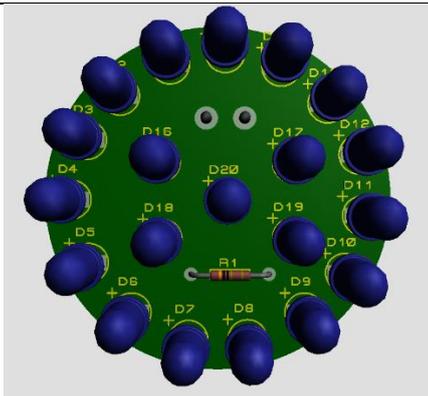


Figura 63 Foco led modelado en 3D
Fuente: Autor

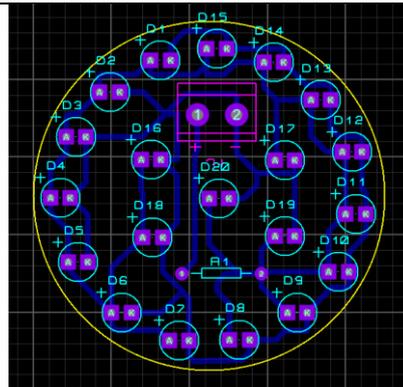


Figura 64 PCB para la construcción del foco led
Fuente: Autor



Figura 69 Servidor WebSocket con posición en tiempo real e historial de datos del posicionamiento del aparato móvil.

Fuente: Autor

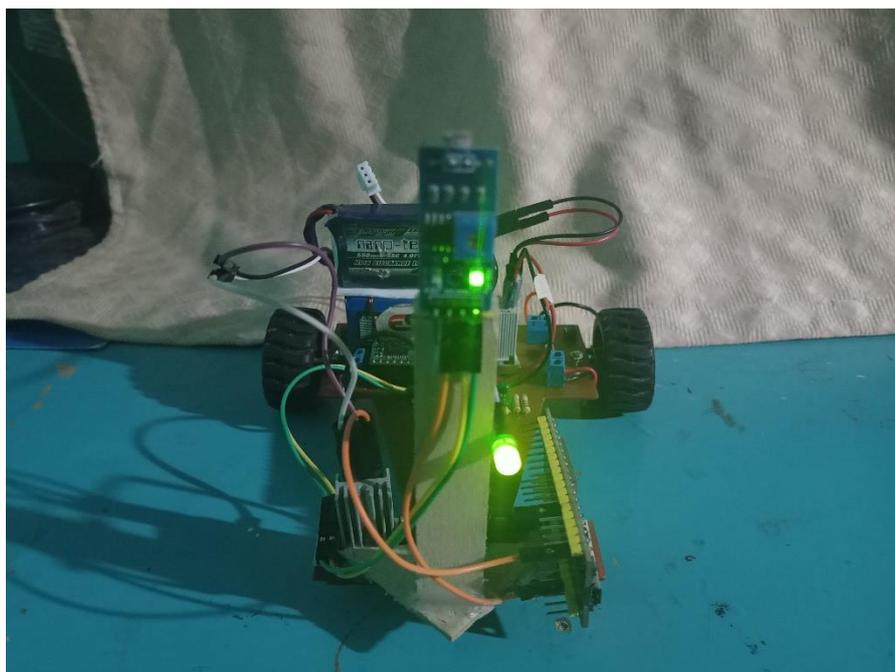


Figura 70 Prototipo final del aparato móvil en conjunto al receptor LiFi

Fuente: Autor