



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **“COEXISTENCIA DE LA TECNOLOGÍA WIFI Y LIFI EN LA TRASMISIÓN DE DATOS DE LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS MEDIANTE EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS DOS TECNOLOGÍAS”**

**BRAULIO ADRIÁN CAISAGUANO VILLA**

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES**

Riobamba – Ecuador

Febrero, 2018



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado: **COEXISTENCIA DE LA TECNOLOGÍA WIFI Y LIFI EN LA TRASMISIÓN DE DATOS DE LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS MEDIANTE EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS DOS TECNOLOGÍA**, de responsabilidad de Braulio Adrián Caisaguano Villa, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

#### Tribunal:

ING. WILSON ZÚNIGA VINUEZA; M. Sc.  
**PRESIDENTE**

---

**FIRMA**

ING. HUGO MORENO PH. D  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

**FIRMA**

ING. WASHINGTON GILBERTO LUNA; M. Sc.  
**MIEMBRO DE TESIS**

---

**FIRMA**

ING. DIEGO MARCELO REINA; M. Sc.  
**MIEMBRO DE TESIS**

---

**FIRMA**

Riobamba, Febrero 2018

## **DERECHOS INTELECTUALES**

Yo, Braulio Adrián Caisaguano Villa, con cédula de identidad 060291625-6 declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Braulio Adrián Caisaguano Villa

N° de Cédula: 060291625-6

**©2018, Braulio Adrián Caisaguano Villa**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Yo, Braulio Adrián Caisaguano Villa, declaro que el presente Proyecto de Investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

---

Braulio Adrián Caisaguano Villa

N° de Cédula: 060291625-6

## **DEDICATORIA**

A Dios que siempre ha estado presente protegiéndome y ayudándome a cumplir todos los objetivos personales y profesionales propuestos en mi vida.

A mi madre Hilda quien con su respaldo y amor incondicional me supo encaminar para lograr ser una excelente persona. A mi padre Elías quien gracias a sus consejos y ejemplo de vida me ha enseñado a sobrellevar cualquier adversidad con humildad y esfuerzo.

A mis hermanos por ser un pilar fundamental en mi vida, por todo su respaldo y palabras de aliento en los momentos que más lo he necesitado.

Braulio A. Caisaguano V.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por su amor incondicional haciendo que cada día de mi vida sea un motivo para reconocer todo lo extraordinario que ha hecho por mí y los míos.

A mis padres que siempre han sido un ejemplo de vida para mí y gracias a ellos pude lograr mis objetivos con mucho orgullo, les debo mi eterna gratitud y retribución total.

A mis hermanos quienes de forma desinteresada me han brindado su apoyo, comprensión y confianza en todas las etapas de mi vida.

Un agradecimiento especial a mi tutor el Doctor Hugo Moreno, al Msc. Washington Luna y al Msc. Diego Reina en calidad de miembros del tribunal, por su respaldo, paciencia y confianza para poder culminar el presente trabajo de titulación.

Braulio A. Caisaguano V.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	XVI
SUMMARY .....	XVII

### CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Problema de la Investigación .....	2
1.1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.1.2. Formulación del problema.....	3
1.1.3. Sistematización del problema: .....	4
1.2. Justificación de la investigación.....	4
1.3. Objetivos .....	5
1.3.1. Objetivo General .....	5
1.3.2. Objetivos Específicos: .....	6
1.4. Hipótesis.....	6

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Comunicaciones Inalámbricas.....	7
2.1.1. Historia general de las comunicaciones inalámbricas .....	7
2.2. Bases teóricas .....	8
2.2.1. Que es Wifi .....	8
2.2.1.1. Ventajas de Wifi .....	9
2.2.1.2. Principales desventajas de Wifi.....	10
2.2.2. Tecnología Li-fi: Una innovadora alternativa para las telecomunicaciones .....	11
2.2.2.1. ¿Qué es Li-fi? .....	12
2.2.2.2. Como funciona Li-Fi .....	12
2.2.2.3. Infrarrojos antesala de Li-fi .....	14
2.2.3. Acerca del Estándar Lifi.....	15
2.2.3.1. Pila de protocolos LiFi.....	16
2.4.5. Topologías que soporta LiFi.....	17
2.4.6. Técnicas de Modulación para Li-Fi.....	18
2.4.6.1. Técnicas de Modulación de Portadora Única .....	19
2.4.6.2. Optical OFDM .....	20
2.4.6.3. Técnicas OFDM híbridas.....	20
2.4.6.4. Li-Fi Técnica de modulación única .....	21



2.4.7.	<i>Ventajas de utilizar el sistema LiFi</i> .....	22
2.3.	Análisis de Sistemas Híbridos de acceso inalámbrico .....	22
2.3.1.	<i>Redes Li + WiFi (HetNets)</i> .....	22
2.3.1.1.	<i>Cómo llegar a alta capacidad y densidad</i> .....	24
2.3.2.	<i>Vínculos múltiples y agregación</i> .....	25
2.3.3.	<i>Movilidad y acceso a medios</i> .....	27
2.3.4.	<i>Un Prototipo de Prueba de Concepto y Resultados</i> .....	29
2.3.5.	<i>Capacidades de los Transceptores LiFi:</i> .....	29
2.3.6.	<i>Rendimiento de los enlaces de LiFi de interior y exterior</i> .....	30
2.4.	Sistema inalámbrico híbrido WiFi-VLC para acceso a Internet.....	33
2.4.1.	<i>Sistema híbrido compuesto por la tecnología IEEE 802.11 y un enlace VLC</i> .....	34
2.4.2.	<i>Investigaciones Relacionadas</i> .....	35
2.4.3.	<i>Oportunidades futuras de investigación</i> .....	36

### CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
3.1.	Tipo y diseño de investigación.....	38
3.2.	Desarrollo Del Prototipo Híbrido Wifi - Lifi .....	39
3.2.1.	<i>Requisitos para el diseño del prototipo híbrido para un ambiente home.</i> .....	39
3.2.2.	<i>Esquema general del sistema híbrido Wifi – Lifi</i> .....	39
3.2.3.	<i>Diseño del Hardware del prototipo del sistema híbrido Wifi – Lifi</i> .....	41
3.2.3.1.	<i>Módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi</i> .....	41
3.2.3.2.	<i>Módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi</i> .....	42
3.2.4.	<i>Selección de dispositivos para el prototipo del sistema híbrido Wifi –Lifi.</i> .....	43
3.2.5.	<i>Arduino UNO</i> .....	45
3.2.6.	<i>Los Módulos de Radio NRF24L01</i> .....	47
3.2.7.	<i>Foto Transistor</i> .....	49
3.2.7.1.	<i>Esquema de conexiones del foto transistor con el micro Arduino UNO</i> .....	51
3.2.8.	<i>Diodos Led</i> .....	52
3.2.8.1.	<i>Cálculo de resistencias limitadoras de corriente necesarias para la matriz de leds</i> ...	55
3.2.9.	<i>Esquema de conexiones de los módulos que integran el sistema híbrido</i> .....	58
3.2.9.1.	<i>Diagrama de conexión del módulo nRF24L01 con la tarjeta Arduino UNO</i> .....	58
3.2.9.2.	<i>Plano electrónico diseñado en ISIS del módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi</i> .....	59
3.2.9.3.	<i>Vista 3D de la placa del módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi</i> .....	59
3.2.9.4.	<i>Módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi armado y terminado</i> .....	60
3.2.10.	<i>Plano electrónico diseñado en ISIS del módulo receptor Wifi – Emisor Lifi</i> .....	60
3.2.10.1.	<i>Vista 3D de la placa del módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi</i> .....	61

3.2.10.2.	<i>Módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi armado y terminado</i> .....	62
3.2.11.	<i>Plano electrónico diseñado en ISIS de la matriz de Leds</i> .....	62
3.2.11.1.	<i>Vista 3D de la placa de la matriz de Leds</i> .....	63
3.2.11.2.	<i>Matriz de Leds armado y terminado</i> .....	63
3.3.	<i>Diseño del software para la realización del sistema híbrido Wifi – Lifi</i> .....	63
3.3.1.	<i>Requisitos del software del Sistema Híbrido</i> .....	64
3.3.2.	<i>Descripción del software aplicado en los módulos de comunicación</i> .....	64
3.3.3.	<i>Código de Programación del módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi</i> .....	67
3.3.3.1.	<i>Diagrama de Flujo del módulo modulo Emisor Wifi – Receptor Lifi</i> .....	67
3.3.3.2.	<i>Bibliotecas ocupadas en el modulo Emisor Wifi – Receptor Lifi</i> .....	69
3.3.4.	<i>Software para el modulo Emisor Lifi – Receptor Wifi</i> .....	69
3.3.4.1.	<i>Diagrama de Flujo del módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi</i> .....	69
3.3.5.	<i>Software del entorno gráfico del módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi.</i> .....	71
CAPITULO IV		
4.	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	73
4.1.	<b>Escenarios del Prototipo</b> .....	74
4.1.1.	<i>Escenario Uno</i> .....	74
4.1.2.	<i>Escenario Dos</i> .....	76
4.1.3.	<i>Escenario Tres</i> .....	78
4.1.3.1.	<i>Mediciones de la señal de recepción utilizando una foto resistencia</i> .....	78
4.2.	<b>Análisis de la Velocidad de trasmisión de Arduino Uno</b> .....	81
4.3.	<b>Comparación de eficiencia entre un prototipo solo Wifi versus el prototipo híbrido</b> ... 81	
4.3.2.	<i>Comparación de eficiencia de los dos sistemas para distintas distancias.</i> .....	81
4.3.3.	<i>Comparación de eficiencia de los sistemas al someterlos a interferencias RF</i> .....	86
4.3.4.	<i>Rendimiento del prototipo híbrido expuesto a bloqueos con diversos materiales</i> .....	89
4.4.1.	<b>Tabla de Análisis de Varianza (ANOVA)</b> .....	91
4.4.1.1.	<i>Escenario Uno</i> .....	91
4.4.1.2.	<i>Escenario Dos</i> .....	93
4.4.2.	<i>Presupuesto del prototipo híbrido de enlace ascendente Wifi y descendente Lifi</i> .....	94
CONCLUSIONES .....		
RECOMENDACIONES .....		
BIBLIOGRAFÍA .....		
ANEXOS .....		

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2	Estándares Wifi.....	9
Tabla 2-2	Parámetros comparativos Wifi vr. Lifi .....	14
Tabla 3-3	Clasificación de las tarjetas Arduino .....	45
Tabla 4-3	Características de los diodos led por su color .....	55
Tabla 1-4	Señal receptada por la foto resistencia para varias velocidades .....	81
Tabla 2-4	Señal receptada por el foto transistor para varias velocidades.....	82
Tabla 3-4	Velocidad de trasmisión.....	83
Tabla 4-4	Datos exitosos vr. distancia en un sistema Wifi.....	84
Tabla 5-4	Datos exitosos vr. distancia en un sistema Híbrido .....	85
Tabla 6-4	Datos de la distancia vs BEAR del sistema Wifi.....	86
Tabla 7-4	Datos de la distancia vs BEAR del sistema Híbrido.....	87
Tabla 8-4	Datos transmitidos vr. tiempo de interferencia del sistema solo Wifi .....	88
Tabla 9-4	Datos transmitidos vr. tiempo de interferencia del sistema Híbrido.....	89
Tabla 10-4	Comparación de velocidades de recepción de los dos sistemas .....	90
Tabla 11-4	Porcentajes de datos exitosos vs bloqueo con diferentes materiales .....	89
Tabla 12-4	Análisis de Varianza (Anova).....	91
Tabla 13-4	Análisis de varianzas – ANOVA interrupciones .....	92
Tabla 14-4	Análisis de varianzas – ANOVA Velocidad de Recepción .....	93
Tabla 15-4	Presupuestó del prototipo híbrido Wifi-Lifi para la trasmisión de datos .....	94

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2	Componentes de una red Wifi .....	8
Gráfico 2-2	Espectro de luz visible.....	11
Gráfico 3-2	Comunicación de datos a través de la luz.....	13
Gráfico 4-2	Comparación de comunicación VLC serial y paralelo.....	15
Gráfico 5-2	Capas de la pila del protocolo Lifi.....	16
Gráfico 6-2	Topologías de una red Lifi.....	18
Gráfico 7-2	Clasificación de las Técnicas de Modulación Lifi.....	19
Gráfico 8-2	Necesidades Estacionarias y Cuasi-estacionarias .....	24
Gráfico 9-2	SU – MIMO descomposición de valores basados en MIMO .....	26
Gráfico 10-2	Rendimiento alcanzado en Mb/s por distancia vertical y horizontal .....	30
Gráfico 11-2	Comparación de rendimiento de un sistema híbrido, solo wifi y agregación.....	31
Gráfico 12-2	Configuraciones del sistema híbrido (a) y del sistema agregado (b).....	31
Gráfico 13-2	Densidad de ancho de banda de (a) RF y (b) VLC.....	33
Gráfico 14-2	Configuración básica de una red Heterogénea .....	35
Gráfico 1-3	Diagrama de bloques del prototipo Híbrido .....	40
Gráfico 2-3	Diagrama de bloques del prototipo emisor Wifi receptor Lifi.....	42
Gráfico 3-3	Diagrama de bloques del prototipo emisor Lifi receptor Wifi.....	43
Gráfico 4-3	Tarjeta Arduino Uno.....	47
Gráfico 5-3	Descripción de elementos de un Arduino Uno .....	48
Gráfico 6-3	Módulo nRF24L91 .....	49
Gráfico 7-3	Esquema del módulo nRF24L91 .....	49
Gráfico 8-3	Foto Transistor.....	50
Gráfico 9-3	Protocolo NEC para el envío de 0 lógico y 1 Lógico .....	51
Gráfico 10-3	Esquema de conexión del receptor de luz con el micro arduino .....	52
Gráfico 11-3	Símbolo diodo led.....	53
Gráfico 12-3	Esquema de un circuito en serie de diodos led .....	55
Gráfico 13-3	Esquema de un circuito en paralelo de diodos led.....	56
Gráfico 14-3	Diagrama de Conexión Arduino con el modulo nRF24L01 .....	60
Gráfico 15-3	Diseño en ISIS del módulo emisor Wifi - Receptor Lifi.....	59
Gráfico 16-3	Vista 3D modulo emisor Wifi - Receptor Lifi.....	59
Gráfico 17-3	Módulo terminado del emisor Wifi - Receptor Lifi.....	60
Gráfico 18-3	Diseño en ISIS del módulo emisor Lifi – Receptor Wifi .....	61
Gráfico 19-3	Vista en 3D del módulo emisor Lifi – Receptor Wifi.....	61
Gráfico 20-3	Módulo emisor Lifi – Receptor Wifi terminado.....	62

Gráfico 21-3	Matriz de diodos leds.....	64
Gráfico 22-3	Vista en 3D Matriz de diodos leds.....	64
Gráfico 23 -3	Matriz de diodos leds terminado.....	65
Gráfico 24-3	Panel frontal y bloques de un programa LabVIEW.....	67
Gráfico 25-3	Diagrama de flujo del módulo Emisor Wifi - Receptor Lifi.....	69
Gráfico 26-3	Diagrama de Flujo del módulo Emisor Lifi Receptor Wifi.....	70
Gráfico 27-3	Diagrama de flujo interfaz gráfica en LAbView de módulo ingreso .....	72
Gráfica 1-4	Analizador de Espectro ANRITSU.....	73
Gráfica 2-4	Funcionamiento del prototipo híbrido Wifi-Lifi.....	73
Gráfica 3-4	Frecuencia de operación de los módulos de radio frecuencia nRF24L01 .....	74
Gráfica 4-4	Medición de la frecuencia de envío de los datos a través de la luz.....	75
Gráfica 5-4	Medición de la frecuencia de envío de los datos a través de la luz.....	75
Gráfica 6-4	Medición de la frecuencia de recepción de datos a través de la luz.....	76
Gráfica 7-4	Medición de las frecuencias de operación con variación de la distancia.....	77
Gráfica 8-4	Frecuencia de operación de los módulos RF con variación de la distancia .....	77
Gráfica 10-4	Eficiencia de un sistema solo wifi comparado con el híbrido.....	83
Gráfica 12-4	Comparación de un sistema solo Wifi con el híbrido bajo interferencias.....	87
Gráfica 13-4	Comparación de velocidades de recepción .....	88
Gráfica 14-4	Porcentaje de datos exitosos frente al bloqueo en la etapa wifi.....	90

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO A</b>	Especificaciones de los módulos de radio NRF2401
<b>ANEXO B</b>	Características de Arduino Uno
<b>ANEXO C</b>	Curva característica de los diodos led
<b>ANEXO D</b>	Código de programación del Módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi
<b>ANEXO E</b>	Código de programación del Módulo Emisor Lifi – receptor Wifi

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>VLC</b>	Comunicación por luz visible
<b>LIFI</b>	light fidelity
<b>WIFI</b>	Wireless Fidelity
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>QoS</b>	Calidad de Servicio
<b>PTP</b>	Point To Point
<b>WLAN</b>	wireless local area network
<b>LED</b>	light emitting diode
<b>RF</b>	Radio Frecuencia
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>OFDM</b>	Multiplexión por División en Frecuencias Ortogonales
<b>TCP</b>	Protocolo de Control de Transmisión
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>OOK</b>	On-Off Keying
<b>RGB</b>	red, green, blue
<b>PAM</b>	pulse-amplitude modulation
<b>AP</b>	access point
<b>HetNet</b>	red heterogénea
<b>MIMO</b>	Multiple-input Multiple-output
<b>SISO</b>	single-output single-input
<b>UD</b>	dispositivo de usuario
<b>CSMA / CA</b>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>AC</b>	Corriente alterna
<b>PWM</b>	Pulse-width modulation
<b>NEC</b>	Corporación Japonesa
<b>PDM</b>	Pulse Distance Modulation
<b>ISIS</b>	Sistema de Enrutado de Esquemas
<b>ARES</b>	Software de Edición y Ruteo Avanzado
<b>VSM</b>	Sistema Virtual de Modelado
<b>VPAN</b>	Red de Área Local VLC

## RESUMEN

El objetivo fue realizar el diseño e implementación de las dos tecnologías en un ambiente home para demostrar un marco práctico en que ambas tecnologías puedan coexistir, explorando las más recientes investigaciones sobre las redes híbridas que combinan la fidelidad de la luz (LIFI) con una fidelidad inalámbrica de radio frecuencia (WIFI), del análisis y comprensión del funcionamiento de estos sistemas heterogéneos se propuso el diseño y la implementación de un nuevo prototipo híbrido, encontrando un marco práctico para que ambas tecnologías puedan coexistir en un ambiente home. Se empezaron estudiando los requisitos que se necesita para establecer una comunicación de este tipo, luego se diseñó un esquema integral de todas las etapas, seleccionando los dispositivos más adecuados capaces de adaptarse de mejor manera a nuestras necesidades, posterior a esto se procedió a la construcción del hardware y al desarrollo del software que en conjunto fueron los encargados de establecer la transmisión dúplex. Como resultado del análisis y diseño de este prototipo heterogéneo se obtuvo una transmisión ascendente de caracteres a través de módulos de radio frecuencia (comunicación WIFI) y una transmisión descendente de información mediante pulso de luz (comunicación LIFI), demostrando que una estrecha integración de ambas tecnologías permite que las oportunidades de descarga de la red WIFI libere mayor cantidad de recursos para más usuarios móviles, ya que los usuarios estacionarios fueron atendidos preferentemente por la comunicación LIFI, de esta manera, ambas tecnologías pudieron colaborar eficazmente mejorando el rendimiento individual. Recomendando buscar alternativas de dispositivos modernos para mejorar el diseño del prototipo que permitan alcanzar los estándares propuestos por las empresas que ofertan esta tecnología y que se continúe con el estudio de estos sistemas descritos en el presente trabajo ya que en el futuro podrían ser la solución combinada que aborde los principales problemas de las redes inalámbricas de próxima generación.

**Palabras claves:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, <COMUNICACIONES INALÁMBRICAS>, < RED HYBRIDA>, < SISTEMA HETEROGENEO >, < COMUNICACIÓN POR LUZ VISIBLE (LIFI)>, <FIDELIDAD DE LA LUZ>, <COMUNICACIÓN POR RADIO FRECUENCIA (WIFI)>.



## SUMMARY

This research objective is to carry out the design and implementation of two technologies in a home environment in order to demonstrate a practical frame where the two technologies can coexist by exploring the most recent investigations about hybrid networks. The networks combine the Light Fidelity (LIFI) with Wireless Fidelity (WIFI) of radio frequency. From the analysis and comprehension of the performance of these heterogeneous systems a design and implementation of a new hybrid prototype was proposed. Firstly, requirements were established for the communication of this type, then an integral scheme of each stage was designed with the most appropriate devices to our necessities. Finally, the construction of hardware and the development of software were carried out to establish the duplex transmission. As a result of the analysis and design of this heterogeneous prototype an ascendant transmission of characters by means radio frequency modules ((WIFI communication) and a descendant transmission of information by pulse of light (LIFI communication) were gotten. A close integration of two technologies which allows WIFI network download to free high quantity of resources for more mobile users was shown. The stable users were assisted by LIFI communication, so both technologies could support each other efficiently improving the individual performance. It is recommended to look for alternatives of updated devices to improve the design of prototype for getting the proposal standards by the enterprises offering this technology and continue with the study of these systems mentioned in this present research. These could be the best solution of the main problems of the wireless networks of the future generation.

**Key words:** <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <TELECOMMUNICATIONS>, <WIRELESS COMMUNICATIONS>, <HYBRID NETWORK>, <HETEROGENEOUS SYSTEM>, <VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (LIFI)>, <LIGHT FIDELITY>, <RADIO FREQUENCY COMMUNICATION (WIFI)>.

# CAPITULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

El número de dispositivos móviles con capacidades multimedia y conectados a internet está aumentando rápidamente, ver videos en alta definición y acceder a servicios basados en la nube son las principales actividades de los usuarios que consumen gran capacidad de datos, en la actualidad y en un futuro próximo. La mayor parte de este consumo de datos se produce en interiores, y cada vez más en espacios tales como vehículos, aviones y otros.

Se espera que esta alta demanda de datos basados en la nube crezca y sea un fuerte motivador para la adopción de nuevo espectro, incluyendo el uso de medios inalámbricos ópticos. En términos de topología de red, las redes heterogéneas jugarán un papel importante en la integración de un espectro diverso para proporcionar una alta calidad de servicio (QoS), especialmente en ambientes interiores donde existe infraestructura localizada que soporta acceso inalámbrico direccional de corto alcance.

El desarrollo del presente trabajo de titulación por lo tanto está orientado al estudio y aplicación de una red híbrida que combina la fidelidad de luz (Li-Fi) con una fidelidad inalámbrica de radiofrecuencia (RF), analizando la posibilidad de su coexistencia, debido a que el sistema Wi-Fi se ha vuelto insuficiente para cubrir las necesidades cada vez más exigentes en las telecomunicaciones. Al implementar un prototipo de transmisión de datos que involucren las dos tecnologías se busca mejorar tanto el rendimiento del sistema como la calidad de servicio del usuario.

Esta investigación agrega nuevos y modernos conocimientos relacionados con las comunicaciones se habla de espectro de luz mas no del espectro radioeléctrico cada vez más escaso y codiciado pudiendo ser un elemento clave para el notable mejoramiento de velocidad, seguridad y confiabilidad en la transferencia de información, además de ser eficiente a la hora de ahorrar energía.

En la actualidad las telecomunicaciones en el Ecuador carecen de una renovada transformación tecnológica que hace necesario involucrarse y promover el desarrollo de innovadoras tecnologías que puedan otorgar soluciones efectivas procurando estar a la vanguardia con los

avances de las telecomunicaciones, satisfaciendo en lo posible las crecientes demandas de usuarios para que tengan un mejor estilo de vida.

## **1.1. Problema de la Investigación**

### ***1.1.1. Planteamiento del problema***

En la actualidad los sistemas de telecomunicaciones han tenido un desarrollo acelerado por lo que la demanda de una continua innovación en las comunicaciones se hace indispensable buscando cada vez mejorar la cantidad y velocidad de información que se trasmite. Una de las tecnologías que nos ha permitido la comunicación de datos ha sido la red inalámbrica Wifi también llamada WLAN (Wireless Lan), la cual ha venido cumpliendo un papel importante en nuestra sociedad ya que gracias a esta se ha facilitado la manera de comunicarse e informarse siendo accesible para cualquier persona además de poder ser utilizadas en cualquier lugar sea este público o privado sin tener que utilizar cables logrando un entorno más cómodo en donde la información se convierte en una herramienta fundamental para la obtención y aplicación de nuevas tendencias tecnológicas.

Ésta tecnología de comunicación nos ha facilitado la vida en muchos aspectos y no hay lugar donde no esté desplegado, pero su fuerte se convierte en su más grande debilidad cuando muchos dispositivos se conectan a la misma red wi-fi desatando una verdadera pesadilla al sostener una conexión lenta de acceso, debido a la creciente demanda de comunicación inalámbrica de datos, el espectro de radio disponible por debajo de 10 GHz, ha pasado a ser insuficientes.

Es así que uno de los problemas a los que se enfrenta las comunicaciones inalámbricas Wifi en la actualidad, entre otros, es la limitación del espectro que usa, cada vez más demandado para distintos usos buscando apoyarse en otras tecnologías que le permitan integrarse. Con el fin de solventar este y otros problemas relacionados con esta tecnología en cuanto a velocidad, seguridad, compatibilidad entre otras, son distintas las universidades y empresas que están trabajando en el desarrollo de una nueva tecnología como lo es Li-Fi que propone cubrir estas y otras falencias ya sea individual o coexistiendo con la actual tecnología Wifi. La idea es tan simple como usar la luz normal y corriente para transmitir datos.

Li-Fi es un tipo de conexión inalámbrica que usa tecnología que se caracteriza por transmitir información a través de la luz LED que podría llegar a los 10Gbps de velocidad. Esto porque la luz se puede encender y apaga hasta 10 millones de veces por segundo, lo que hace que se

transforme la información en forma binaria (0 y 1); y se aprovecha esta característica para poder enviar la información a través de la onda de la luz. Dado que hay un amplio despliegue de la iluminación LED en los hogares, oficinas y alumbrado público debido a su eficiencia energética, allí es un beneficio adicional para el despliegue celular Lifi porque puede construir sobre las infraestructuras de iluminación existentes.

### ***1.1.2. Formulación del problema***

El problema de buscar nuevas alternativas para la comunicación inalámbrica que puedan convivir y combinarse con la actual tecnología Wifi incurre en el continuo crecimiento en la adopción de dispositivos móviles como teléfonos inteligentes, tabletas, ordenadores portátiles, y ahora los dispositivos de la "internet de las cosas" que está impulsando una demanda insaciable de acceso a datos a través de las redes inalámbricas.

Esta abrumadora demanda rara vez se cumple hoy ya que los usuarios nunca se han quejado de que tienen "demasiado ancho de banda" o "servicio muy rápido" a internet, especialmente cuando se considera el acceso inalámbrico. Aunque los proveedores inalámbricos están desplegando infraestructura de acceso adicional a través de nuevas células y puntos finales WiFi, la limitación se está convirtiendo en el uso excesivo del espectro RF existente.

Esto se manifiesta como la contención y la interferencia resultando en un aumento de latencia, inseguridad y disminución de rendimiento de la red, estas desventajas se ha convertido en un reto muy significativo al tener que proporcionar un apoyo de infraestructura para las células cada vez más pequeñas.

Aquí es donde se hace mención a una nueva y acertada alternativa como lo es Lifi que utiliza diodos emisores de luz (LEDs) de alta velocidad para la comunicación inalámbrica. Justamente las industrias de las comunicaciones de conexión inalámbrica han respondido a este reto teniendo en cuenta el espectro radioeléctrico por encima de 10 GHz (ondas milimétricas comunicación).

Teniendo en consideración que frecuencias más altas, significan pérdida de trayectoria. Como consecuencia, estos sistemas deben ser diseñados para mejorar la probabilidad de línea de vista directa, mediante el uso de técnicas dirigidas al haz de luz y mediante el uso de células muy pequeñas.

La necesidad de una pequeña célula no es un problema desde una perspectiva de la capacidad que tiene este sistema así el uso de las frecuencias más en la comunicación se ha convertido en una opción práctica.

### ***1.1.3. Sistematización del problema:***

- A. ¿Influye el limitado espectro radio eléctrico de la tecnología Wifi en la transmisión de datos de las comunicaciones inalámbrica?
- B. ¿Incide la comunicación por luz Visible (LIFI) para mejorar el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas?
- C. ¿Es posible la coexistencia de un sistema combinado wifi y Lifi dentro de un ambiente home?
- D. ¿Contribuye el análisis y diseño de prototipos de sistemas híbridos wifi y lifi para demostrar la coexistencia de ambas tecnologías?

## **1.2. Justificación de la investigación**

La idea de estudiar una nueva forma de comunicación inalámbrica como lo es mediante luz visible se ve justificada ya que con una demanda cada vez mayor de aumentar el ancho de banda en las comunicaciones inalámbricas se hace necesario buscar nuevas alternativas que puedan coexistir conjuntamente con Wifi permitiendo brindar nuevas y mejores experiencias a los usuarios.

Aunque los proveedores inalámbricos están desplegando infraestructura de acceso adicional mediante nuevas celdas y puntos finales WiFi, la limitación se está convirtiendo en el uso excesivo del espectro de RF existente. Esto se manifiesta como contención e interferencia provocando un aumento de latencia (cruce de espectros) y disminución en el rendimiento de red. En busca de dar soluciones a estos inconvenientes, se necesitan nuevos enfoques para mejorar la capacidad del enlace inalámbrico apoyándose en las tecnologías ópticas como Li-Fi conocida también como una comunicación por luz visible (VLC).

Por ejemplo los terminales móviles actuales son potentes centros de comunicaciones que se conectan de múltiples formas con internet a través de tecnologías como 3G, 4G o WiFi. Sin embargo, hay ocasiones en las que estos sistemas se saturan fácilmente, como por ejemplo en lugares con grandes aglomeraciones de gente, y vendría bien poder contar un sistema complementario o incluso más personal.

A esto se suman temas relevantes como la seguridad en la transmisión de datos, el no tener como acceder a la red cuando nos encontramos viajando en un avión, o la restricción del uso de dispositivos que usen el espectro radioeléctrico en los hospitales, son puntos claves que sustentan el estudio de esta tecnología.

Entonces es aquí donde las comunicaciones ópticas entran en juego con nuevas tecnologías de transmisión no guiadas que a diferencia de la fibra utilizan el aire como medio y una de las que parece tener más éxito es la que se conoce como Visible Light Communications (VLC), Comunicaciones por Luz Visible o también denominada Óptica WLAN o Li-Fi.

Las comunicaciones de luz visible (VLC) están emergiendo como una nueva alternativa del espectro radiofrecuencia (RF) existente, ya que cada vez es más apretado, VLC no tiene licencia, tiene gran ancho de banda, es compatible con los nuevos niveles de seguridad debido a la opacidad de las paredes, y se pueden combinar para acceder a comunicaciones de iluminación y de datos para el pequeño aumento neto de los costes energéticos.

Con esta nueva tecnología se puede transmitir datos de alta velocidad al mismo tiempo que se ilumina una habitación. Li-Fi tiene numerosas ventajas. Para empezar, no satura la parte del espectro usado actualmente por otros sistemas como WiFi en sus diferentes versiones, ya que usa luz visible, la información llega por el haz de luz de los LEDs, con lo que podemos o bien crear un haz disperso que proporcione una cobertura amplia o bien un haz muy fino que ilumine pequeñas regiones y transmita datos de forma más direccional.

Esto permite un mayor control sobre a quién están llegando los datos en cada momento y permite redes de corto alcance más seguras. También se puede usar para transmitir grandes volúmenes de datos entre equipos o a dispositivos multimedia. Por ejemplo, podemos enviar un vídeo del móvil a un televisor de forma rápida o copiarlo a un disco duro de red sólo con apuntar teléfono a la tele o al disco duro durante unos segundos, como ahora hacemos con el mando a distancia para cambiar de canal (que por cierto también usa una variante de "Li-Fi" basada en infrarrojos).

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo General***

Realizar el diseño e implementación de las dos tecnologías en un ambiente home para demostrar un marco práctico en que ambas tecnologías puedan coexistir.

### **1.3.2. *Objetivos Específicos:***

Realizar un estado del arte de las tecnologías Wifi y Li-Fi para permitir la identificación de los principales factores, ventajas y desventajas que ofrece cada una de ellas para la posibilidad de su coexistencia.

Diseñar e implementar un prototipo híbrido de enlace ascendente Wifi y enlace descendente Lifi, analizar sus debilidades y fortalezas frente a un sistema wifi tradicional en un ambiente home.

Demostrar la coexistencia de la tecnología Wifi y Lifi dentro de un ambiente home.

### **1.4. Hipótesis**

Diseñar e implementar un prototipo utilizando la tecnología Wifi y Lifi para un ambiente home permitirá demostrar la coexistencia de ambas tecnologías.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Comunicaciones Inalámbricas

##### 2.1.1. *Historia general de las comunicaciones inalámbricas*

En la antigüedad, la luz y las banderas se usaban para la comunicación inalámbrica. Durante el año 1794 Claude Choppe inventó el telégrafo óptico con el que era posible la comunicación inalámbrica de larga distancia. Pero el sistema de telégrafo óptico tenía ciertos inconvenientes. Para superar estos problemas, Michael Faraday ideó otro principio para la comunicación móvil llamado inducción electromagnética durante 1837. Casi en la misma época C. Maxwell sentó las bases teóricas de la inducción electromagnética con su famosa ecuación. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) define la telecomunicación como la transmisión, emisión o recepción de cualquier señal, señal o mensaje por un sistema electromagnético.

La historia de Wi-Fi es realmente la historia de la comunicación moderna. Wi-Fi sin duda no existiría sin una decisión tomada en 1985 por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), una nueva norma fue publicada en 1997, y los ingenieros comenzaron inmediatamente a trabajar en prototipos de equipos para cumplir con ella. En diciembre de 1999 y enero de 2000 se ratificaron dos variantes, denominadas 802.11b (que opera en la banda de 2,4 GHz) y 802.11a (que opera en la banda de 5,8 GHz). 802.11b fue desarrollado principalmente por Richard van Nee de Lucent y Mark Webster de Intersil.

El Wi-Fi fue impulsado por la creciente popularidad de las conexiones de Internet de banda ancha de alta velocidad en el hogar; es la forma más fácil de permitir que varios equipos compartan un enlace de banda ancha. Hasta el día de hoy, el uso principal de Wi-Fi es en redes domésticas. Mientras tanto, la FCC ajustó nuevamente sus reglas para permitir una nueva variante de la tecnología Wi-Fi, conocida como 802.11g. Utiliza una nueva y más avanzada forma de tecnología de espectro ensanchado llamada multiplexación ortogonal de división de frecuencia (OFDM) y puede alcanzar velocidades de hasta 54 megabits por segundo en la banda de 2,4 GHz.

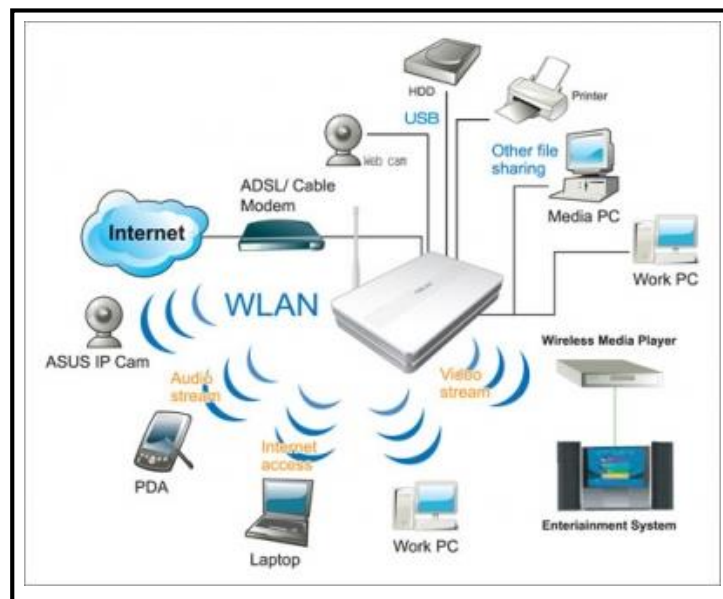


## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Que es Wifi

Las redes Wi-Fi han estado presentes en todos los lados, desde hogares, lugares de trabajo hasta espacios públicos como centros comerciales, estaciones de transporte e incluso las calles de muchas ciudades. Al hablar de esta tecnología nos referimos a una red inalámbrica que utiliza ondas de radio, al igual como es el funcionamiento de los radios, televisores y los teléfonos celulares que a través de un adaptador inalámbrico de una computadora transforman la información en una señal de radio transmitiendo hacia a una antena, entonces el router inalámbrico capta la señal y oportunamente la decodifica para más tarde reenviar estos datos a internet ocupando una conexión física, como por cable.

Comúnmente se transfieren información en frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz, siendo estas frecuencias más altas que las que se consideran para los teléfonos celulares, radios, televisiones y walkie-talkies, teniendo la gran ventaja de poder transmitir mayor cantidad de información. A continuación en el gráfico 1-2 observamos los principales componentes de una red Wifi.



**Gráfico 1-2** Componentes de una red Wifi

Fuente: <http://www.laptoprepairsdubai.com/portfolio/etisalat-router-setup-wifi-setup/>

Wi-Fi es una tecnología de red inalámbrica que permite que las computadoras y otros dispositivos se comuniquen a través de una señal inalámbrica. Describe los componentes de red que se basan en uno de los estándares 802.11 desarrollados por el IEEE y adoptados por Wi-Fi

Alliance. Ejemplos de estándares Wi-Fi, en orden cronológico, incluyen: 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, como se muestra en la tabla 1-2.

**Tabla 1-2** Estándares Wifi

Estándar	Velocidad máxima	Frecuencia	Compatible con modelos anteriores
802.11a	54Mb/s	5 GHz	No
802.11b	11 Mb/s	2,4 GHz	No
802.11g	54Mb/s	2,4 GHz	802.11b
802.11n	600 Mb/s	2,4GHz o 5GHz	802.11a/b/g
802.11ac	1,3 Gb/s (1300 Mb/s)	2,4GHz y 5GHz	802.11a/n
802.11ad	7 Gb/s (7000 Mb/s)	2,4GHz, 5GHz y 60 GHz	802.11a/b/g/n/ac

Fuente: [http://tavoberry.com/osi/estndares\\_wifi.html](http://tavoberry.com/osi/estndares_wifi.html)

### 2.2.1.1. Ventajas de Wifi

Los beneficios de las LAN inalámbricas son varios, principalmente por su conveniencia, rentabilidad, facilidad de integración con otras redes y componentes de red. La mayoría de dispositivos móviles que son vendidos a los consumidores hoy en día vienen equipados con toda la tecnología LAN inalámbrica necesaria.

A continuación describiremos algunas ventajas de la tecnología Wifi:

- **Conveniencia.**- la naturaleza inalámbrica de la red Wifi permite a los usuarios acceder a los recursos de red desde casi cualquier ubicación conveniente, dentro de su entorno de red primario (un hogar u oficina).
- **Movilidad.**- Con el surgimiento de redes inalámbricas públicas, los usuarios pueden acceder a Internet incluso fuera de su entorno de trabajo normal. La mayoría de las cafeterías de cadena, por ejemplo, ofrecen a sus clientes una conexión inalámbrica a Internet a bajo costo o sin costo alguno.
- **Productividad.**- Los usuarios conectados a una red inalámbrica pueden mantener una afiliación casi constante con su red deseada a medida que se mueven de un lugar a otro. Para una empresa, esto implica que un empleado puede ser potencialmente más productivo ya que su trabajo puede realizarse desde cualquier ubicación conveniente.

- **Despliegue.-** la configuración inicial de una red inalámbrica basada en infraestructura requiere poco más que un solo punto de acceso. Las redes cableadas, por otro lado, tienen el costo adicional y la complejidad de los cables físicos reales que se ejecutan en numerosas ubicaciones que incluso pueden ser imposibles para ubicaciones difíciles de alcanzar.
- **Capacidad de expansión.-** las redes inalámbricas pueden atender a un número de clientes repentinamente incrementado con el equipo existente. En una red cableada, los clientes adicionales requerirían cableado adicional.
- **Costo.-** el hardware de redes inalámbricas es, en el peor de los casos, un modesto aumento de las contrapartes cableadas. Este costo potencialmente incrementado casi siempre es más que compensado por los ahorros en costos y mano de obra asociados con la ejecución de cables físicos.

#### *2.2.1.2. Principales desventajas de Wifi*

En los últimos años se ha visto un aumento considerable en la adopción del estándar WiFi por parte de usuarios de todos los niveles, en todas partes del mundo. Es cierto que tiene un gran potencial; sin embargo, como ocurre con cualquier otra tecnología, también tiene algunas desventajas de entre las cuales mencionaremos las siguientes:

- La mayoría de estos estándares certificados por WiFi son muy conocidos en todo el mundo es por esta razón que este aumento acelerado de las comunicaciones amenaza la disponibilidad del espectro radioeléctrico, al utilizar el espectro sin licencia de 2,4 GHz, a menudo se llena con otros dispositivos como Bluetooth, hornos de microondas, teléfonos inalámbricos o dispositivos de envío de vídeo, entre muchos otros. Esto puede causar degradación en el rendimiento.
- El consumo de energía es bastante alto en comparación con otros estándares, lo que hace que la vida de la batería y el calor sean motivo de preocupación para algunos usuarios.
- Las redes WiFi tienen alcance limitado. Un típico router doméstico WiFi puede tener un rango de 45m (150 pies) en interiores y 90m (300 pies) al aire libre. Los rangos también pueden variar ya que WiFi no es una excepción a la física de la propagación de ondas de radio con banda de frecuencia.
- Los puntos de acceso podrían utilizarse para robar información personal y confidencial transmitida por los consumidores WiFi.
- Posee un alto problema en áreas de alta densidad, tales como grandes bloques de apartamentos donde muchos residentes están operando puntos de acceso WiFi.

- Los problemas de interoperabilidad entre marcas o desviaciones pueden causar una conexión limitada o velocidades de salida más bajas.

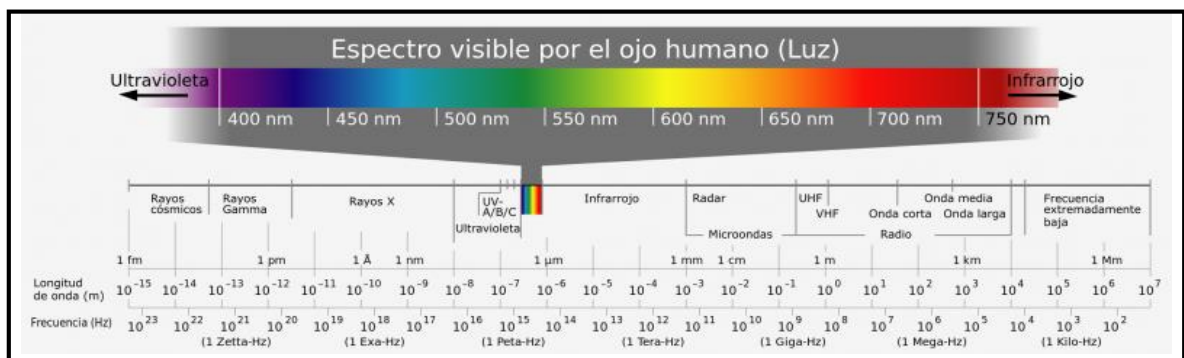
### 2.2.2. Tecnología Li-fi: Una innovadora alternativa para las telecomunicaciones

Buscando corregir y mejorar todos estos inconvenientes mencionados anteriormente aparece una nueva y acertada alternativa como lo es Lifi que utiliza diodos emisores de luz (LEDs) de alta velocidad para la comunicación inalámbrica. El fundamento básico detrás de esta tecnología es que los datos pueden ser transmitidos a través de la luz del LED cuya intensidad varía incluso más rápido que el ojo humano.

El término fue adoptado por Harald Haasand, es una forma de comunicación por luz visible y un subconjunto de las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC) pudiendo ser un complemento de la comunicación RF (Red celular Wi-Fi), o incluso un reemplazo en contextos de radiodifusión de datos.

Hasta el momento, se mide en alrededor de 100 veces más rápido que algunas implementaciones de Wi-Fi, alcanzando velocidades de 224 gigabits por segundo. En la figura se muestra el rango de 400 – 800THz en que se halla el espectro de luz visible pudiendo hacer uso de todo este intervalo para la transición de datos. Li-Fi comprende una amplia gama de frecuencias y longitudes de onda, desde el infrarrojo hasta el espectro ultravioleta. Incluye velocidades de comunicación subgigabit y de clase Gigabit para distancias cortas, medianas y largas, y transferencia de datos unidireccional y bidireccional utilizando la línea de vista o enlaces difusos, reflexiones y mucho más.

En el gráfico 2-2 se muestra el rango de las frecuencias y la longitud de onda para el espectro de luz visible.



**Gráfico 2-2.** Espectro de luz visible

**Fuente:** <https://curiosidadcientifica.wordpress.com/2010/11/06/el-musico-que-descubrio-la-luz-invisible/>

Como mencionamos anteriormente una desventaja de los routers Wi-Fi tradicionales es que múltiples dispositivos dispuestos en un espacio pueden interferirse entre sí mientras que con Li-Fi pueden utilizar varias luces en una habitación sin interferencias. En la actualidad se la llama como la versión optimizada de la tecnología Wi-Fi, otro punto a favor es que la comunicación inalámbrica disminuye los costos enormemente, existen cada día más y más dispositivos que suben día a día las señales de Wi-Fi provocando obstrucción debido al tráfico pesado, es necesario una tecnología de transmisión libre de errores. Y la solución a este problema es sin duda la tecnología Li-Fi. Con Li-Fi es posible codificar los datos en la luz variando la velocidad de parpadeo del LED de encendido y apagado que es demasiado rápido para ser vistos por el ojo humano.

#### *2.2.2.1. ¿Qué es Li-fi?*

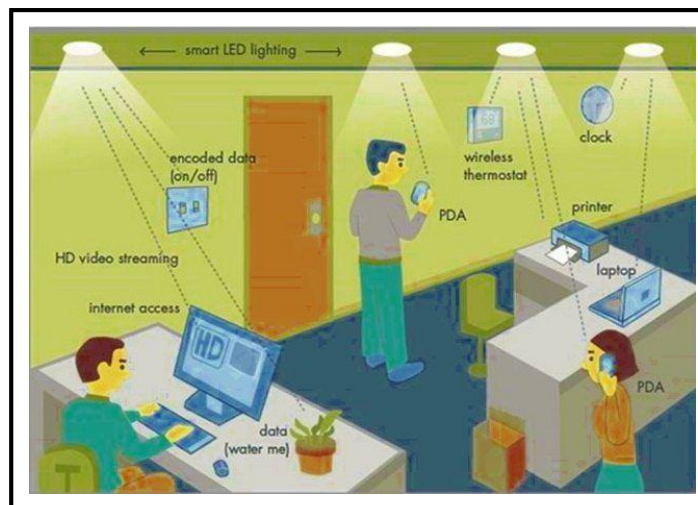
Así como Wi-Fi, Li - Fi es una norma de conexión a internet inalámbrica. Sin embargo, en lugar de operar en las ondas de radio, Li - Fi opera mediante ondas de luz visible se refiere a la tecnología de las comunicaciones basadas en la luz que proporciona una alta velocidad en las comunicaciones móviles bidireccionales de una manera similar a Wi-Fi, sus implementaciones tienen la capacidad de ser usados para proporcionar un enlace descendente de mayor demanda teniendo presente además que la infraestructura de red inalámbrica o cableada existente puede ser utilizada de forma complementaria. Li-Fi ocupa una porción de luz visible del espectro electromagnético para transmitir información a velocidades muy altas. Esto está en contraste con las formas establecidas de comunicación inalámbrica, como Wi-Fi que utilizan señales tradicionales de radiofrecuencia (RF) para transmitir datos.

#### *2.2.2.2. Como funciona Li-Fi*

Con Li-Fi, los datos se transmiten mediante la modulación de la intensidad de la luz, que luego es recibida por un detector fotosensible, y esta señal de la luz es demodulada en forma electrónica. Esta modulación se realiza de tal manera que no es perceptible para el ojo humano. Li-Fi es una categoría de las Comunicaciones Ópticas Inalámbricas (OWC). OWC incluye las comunicaciones de infrarrojos y ultravioleta, así como la luz visible. Sin embargo, Li-Fi es único en que la misma energía de la luz visible usada para la iluminación también puede ser usada para la comunicación.

La tecnología utiliza protocolos similares a los protocolos 802.11 de RF, con estándares adicionales para eliminar los efectos de las interferencias y los efectos de la luz ambiental. A pesar de esto, sin embargo, la tecnología no puede ser desplegada todavía al aire libre en la luz

del sol. Mientras que Li-Fi viene con la ventaja de no interferir con las señales de radio, una gran cantidad de beneficios son dominados por el simple hecho de que la luz visible no puede viajar a través de las paredes, un factor esencial que se le confiere al tradicional sistema Wi-Fi que por un lado puede venir siendo una gran ventaja. Pero así mismo esta limitación de la línea de visión hace que el sistema sea más seguro y da un mejor control de las emisiones, pero no está claro cuál sería la distancia mínima para la recepción de la señal si se logra una clara línea de visión directa. En el gráfico 3-2 se observa cómo sería una comunicación a través de pulsos de luz.



**Gráfico 3 -2** Comunicación de datos a través de la luz

**Fuente:** <http://www.masterenapps.com/blog/li-fi-los-datos-tambien-viajan-por-la-luz-visible>

El espectro de la luz visible es 10.000 veces más grande que el espectro de ondas de radio en el que todas nuestras comunicaciones inalámbricas tienen lugar, Lifi es potencialmente mucho más eficiente energéticamente que Wi-Fi ya que esta última requiere equipos costosos que consumen mucha energía para funcionar. La infraestructura para Li-Fi, por su parte, ya está parcialmente en su lugar, y una conexión podría con el tiempo ser tan simple como encender una lámpara. Usando esta técnica, la información de alta velocidad puede ser transmitida a través de una bombilla de luz LED.

Mientras que las comunicaciones por radiofrecuencia requieren circuitos de radio, antenas y receptores complejos, Li-Fi es mucho más simple que utiliza métodos de modulación directas similares a las utilizadas en los dispositivos de comunicaciones de infrarrojos de bajo costo, tales como unidades de control remoto. Hay que tener en cuenta que la comunicación de infrarrojos está limitada en potencia debido a los requisitos de seguridad de los ojos, mientras

que las bombillas LED tienen altas intensidades que pueden alcanzar velocidades de datos muy grandes. El Dr. Harass logró en 2011 la creación de una red inalámbrica de 800 Mbps usando nada más bombillas normales de color rojas, azules, verdes y blancas LED, por tanto, la idea ha estado presente en nuestro alrededor por todo este tiempo y varios otros equipos globales también vienen explorando sus avances. Li-Fi es un sistema de comunicación inalámbrica en el que la luz se utiliza como una señal portadora de radiofrecuencia en lugar de tradicional como en Wi-Fi. Li-Fi es una tecnología que utiliza diodos emisores de luz para transmitir datos de manera inteligente. En la tabla 2-2 se muestra algunas comparaciones de entre las dos tecnologías Wifi y Lifi.

**Tabla 2-2** Parámetros comparativos Wifi vs. Lifi

Parameter	Li-Fi	Wi-Fi
<b>Medium through which data transfer</b>	Light medium	Radio waves
<b>Privacy</b>	In Li-Fi, light is blocked by the walls and hence will provide more secure data transfer	In Wi-Fi, RF signal can not be blocked by the walls and hence need to employ techniques to achieve secure data transfer.
<b>Data Transfer Speed</b>	About 1Gbps	150Mbps
<b>Frequency of operation</b>	100THz	2.4GHz, 4.9GHz and 5GHz
<b>Coverage distance</b>	About 10 meters	About 32 meters (WLAN 802.11b/11g), vary based on transmit power and antenna type

Fuente: <http://minecraftmin.net/index.php?topic=12135.0>

### 2.2.2.3. Infrarrojos antesala de Li-fi

Li-fi o también llamada comunicación por luz visible (VLC), utiliza pulsos rápidos de la luz para transmitir información sabiamente. Ya se ha utilizado tecnologías parecidas pero que trabajan a diferentes longitudes de onda como los infrarrojos que pueden estar en el rango de los 390nm a los 780nm, un ejemplo de la aplicación de estos rayos tenemos en los controles remotos que manejamos continuamente pero con Li-Fi la comunicación se la hace con luz invisible. A continuación en el gráfico 4-2 se muestra una comparación ilustrativa de cómo sería la comunicación Lifi y de cómo con Infrarrojos. (GONZALES. A, 2016).



**Gráfico 4-2.** Comparación entre la comunicación por infrarrojos con Lifi

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/comunicacion-optica-inalambrica-li-fi/>

Claramente se puede apreciar que la figura de la parte derecha se refiere a la comunicación por luz visible ya que la transmisión es simultánea en un mismo instante de tiempo.

### 2.2.3. Acerca del Estándar Lifi

El estándar Wi-Fi, 802.11 a/g, proporciona velocidades de comunicación de datos de hasta 54Mbps. Sin embargo, hay técnicas disponibles para extender esto a 1 Gbps.

La Universidad de Edimburgo, socio de pureVLC y sede del Prof. Harald Haas el padre de Li-Fi han demostrado que se puede tener velocidades de 3Gbps en un solo color. Entonces si tenemos LEDs de color (R, G, B) se podría comunicarse a velocidades de hasta 9Gbps.

Al igual que Wi-Fi, Li-Fi es inalámbrica y utiliza protocolos similares 802.11; Pero utiliza la comunicación de luz visible (en lugar de ondas de radiofrecuencia), que tiene un ancho de banda mucho más amplio. (AHMED. F, 2015).

Una parte de VLC es modelada después de los protocolos de comunicación establecidos por el grupo de trabajo IEEE 802. Sin embargo, el estándar IEEE 802.15.7 está desfasado, no tiene en cuenta los últimos avances tecnológicos en el campo de las comunicaciones ópticas inalámbricas, específicamente con la introducción de métodos de modulación por división de frecuencia ortogonal (O-OFDM) que han sido optimizadas para las velocidades de transmisión de datos, acceso múltiple y la eficiencia energética.

No obstante, el estándar IEEE 802.15.7 define la capa física (PHY) y la capa de control de acceso a medios (MAC). El estándar es capaz de entregar suficientes tasas de datos para transmitir audio, video y servicios multimedia. Tiene en cuenta la movilidad de la transmisión óptica, su compatibilidad con la iluminación artificial presente en las infraestructuras y la

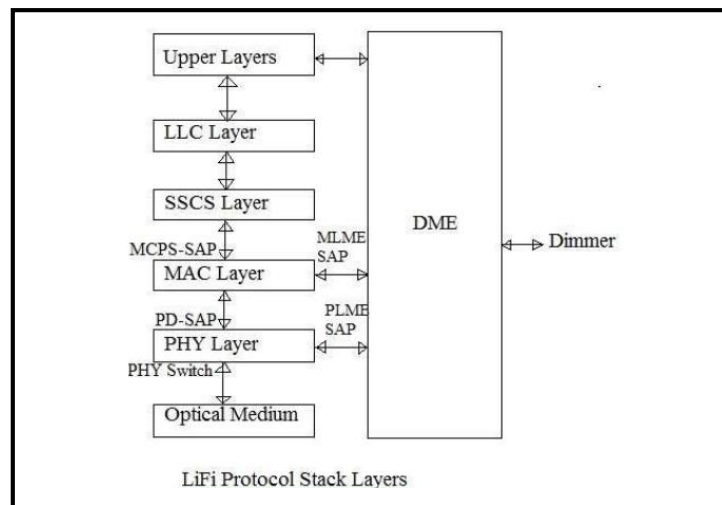


interferencia que puede generar la iluminación ambiental. La capa MAC permite el uso del enlace con las otras capas como con el protocolo TCP/IP.

El estándar define tres capas PHY con diferentes velocidades:

- El PHY 1 se estableció para aplicaciones en exteriores y funciona desde 11,67 kbit / s hasta 267,6 kbit / s.
- La capa PHY 2 permite alcanzar velocidades de datos de 1,25 Mbit /s a 96 Mbit /s.
- El PHY 3 se utiliza para muchas fuentes de emisiones con un método de modulación particular llamado cambio de color (CSK). PHY III puede ofrecer velocidades de 12 Mbit/s a 96 Mbit/s.

### 2.2.3.1. Pila de protocolos LiFi



**Gráfico 5-2.** Capas de la pila del protocolo Lifi

**Fuente:** <http://ieeexplore.ieee.org/document/7831599>

El gráfico 5-2 representa la pila de protocolos utilizada en un dispositivo VPAN típico. Como se muestra la pila de protocolo se compone de PHY, MAC y capas superiores. La capa física alberga un transceptor ligero. PHY alojado en interfaces de capa PHY con SAP óptico que lo conecta al medio óptico. El medio óptico compuesto de una o múltiples fuentes ópticas o detectores ópticos (por ejemplo, diodos láser o fotodiodos). (LIANG Y, 2015).

La capa MAC proporciona acceso al canal para todos los tipos de datos y transmisiones de mensajes de control, la capa superior consta de la capa de red y capa de aplicación. La capa de red se encarga de proporcionar configuración de red, manipulación de red, enrutamiento de mensajes, etc. La capa de aplicación se encarga de proporcionar la funcionalidad deseada según lo necesite el dispositivo VPAN o LiFi.

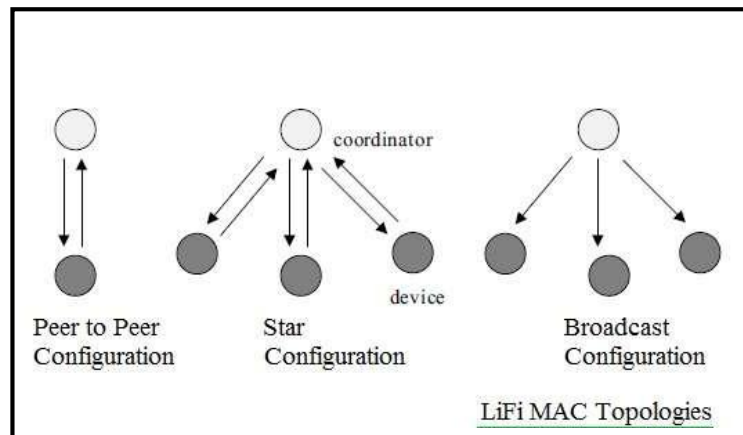
La capa física se divide en tres tipos: PHY I, II y III.

- **PHY I:** está diseñado para aplicaciones de velocidad de datos al aire libre. Proporciona velocidades de datos que oscilan entre 12 - 267 kbit /s. Los códigos convolucionales y Reed Solomen se pueden utilizar para la corrección de errores hacia adelante, y OOK o VPPM se utilizan para la modulación.
- **PHY II:** está diseñado para su uso en interiores con velocidades de datos moderadas en el intervalo de 1,25 - 96 Mbit / s. Los códigos Reed Solomen se pueden utilizar para la corrección de errores hacia adelante, y OOK o VPPM se utilizan para la modulación. Tenga en cuenta que para lograr 96 Mbit / s, se requiere una velocidad de reloj de 120 MHz óptica, que la mayoría de fuera de la plataforma dispositivos ópticos no apoyarán. A la velocidad de reloj más realista de 15 MHz una velocidad de datos de 9,6 Mbit / s se puede lograr.
- **PHY III:** está diseñado para aplicaciones en las fuentes y detectores de RGB. Proporciona velocidades de datos que oscilan entre 12 - 96 Mbit / s. Una vez más códigos Reed Solomen se pueden utilizar para la corrección de errores hacia adelante y esta vez CSK con constelaciones de color 4, 8 o 16 se pueden utilizar.

#### ***2.4.5. Topologías que soporta LiFi***

LiFi funciona sobre el principio de Comunicación de Luz Visible (es decir, VLC). La red también se denomina VPAN (red de área personal VLC). El VLC transmite datos por modulación de intensidad, utiliza LEDs y diodos láser (o foto detectores) en los extremos de transmisión y recepción, respectivamente.

Estos dispositivos funcionan en una de las tres topologías representadas en el gráfico 6-2.



**Gráfico 6-2.** Topologías de una red Lifi

Fuente: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7402263/>

En la topología en estrella, la comunicación se establece entre el controlador central (es decir, el coordinador) y los dispositivos. En la topología peer to peer, uno de los dispositivos debe convertirse en coordinador en el momento de establecer la comunicación.

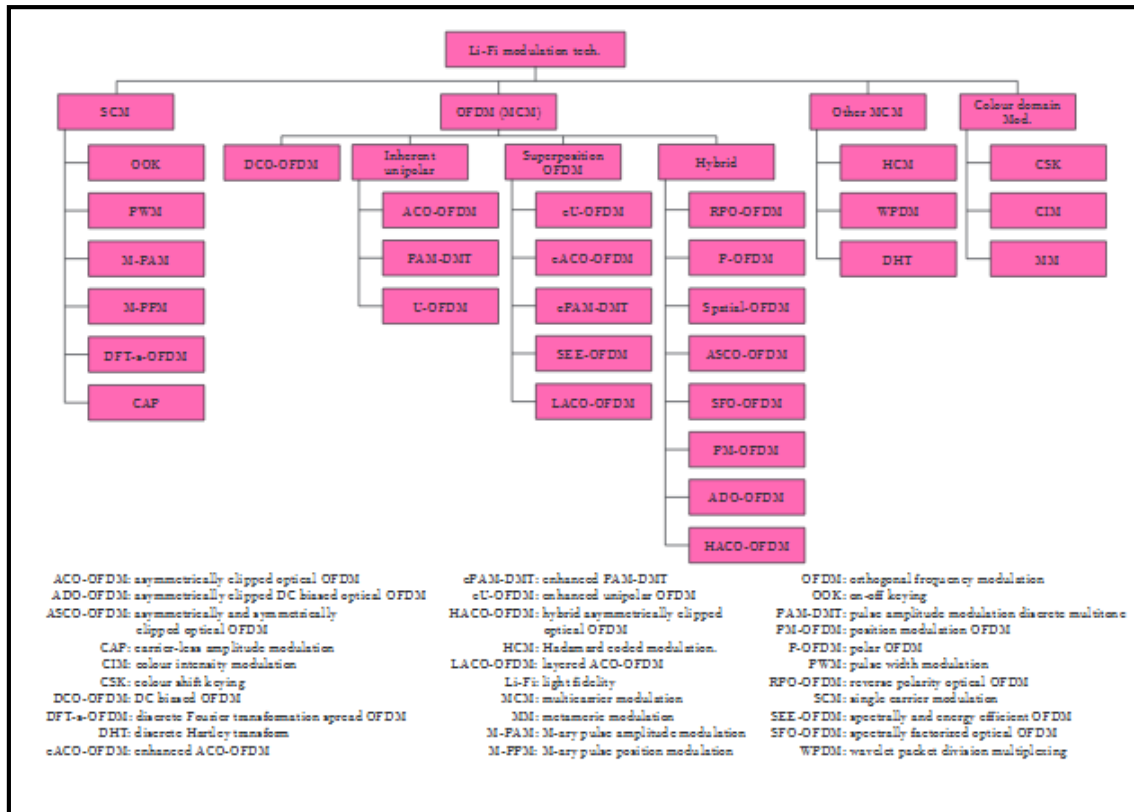
#### 2.4.6. Técnicas de Modulación para Li-Fi

En esta sección, se resumen las técnicas de modulación digital generalmente utilizadas para LiFi, y se discuten algunas cuestiones y requisitos especiales. En principio, LiFi también depende de la radiación electromagnética para la transmisión de información. Por lo tanto, las técnicas de modulación utilizadas típicamente en la comunicación RF también pueden aplicarse a LiFi con las modificaciones necesarias. En el gráfico 7-2 se muestran algunas técnicas.

Además, debido al uso de luz visible para la comunicación inalámbrica, LiFi también proporciona una serie de formatos de modulación únicos y específicos. Las técnicas de modulación de una sola portadora son fáciles de usar en Li-Fi, sin embargo, se requieren complejos procesos complejos de ecualización en canales Li-Fi selectivos en frecuencia. Por otro lado, las técnicas de modulación multiportadora ofrecen una solución viable para Li-Fi en términos de potencia, rendimiento espectral y computacional. En particular, las técnicas de modulación basadas en la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) ofrecen una solución práctica para Li-Fi, especialmente cuando se consideran las técnicas de desplazamiento continuo de corriente continua y de bits adaptativos y de carga de potencia.

En Li-Fi, la luz se modula en los cambios sutiles de la intensidad de la luz, por lo tanto, el enlace de comunicación se vería afectado por la no linealidad de la característica voltaje luminiscencia. Como solución, se propusieron técnicas de pre-distorsión para mitigar la

distorsión no lineal. Los sistemas Li-Fi también deben ser considerados como un sistema de iluminación con capacidad de comunicación no al revés, aquellas que exploran dominios de tiempo, frecuencia y color. (ELGALA, 2015).



**Gráfico 7-2** Clasificación de las Técnicas de Modulación Lifi

**Fuente:** <http://ieeexplore.ieee.org/document/7975997/>

#### 2.4.6.1. Técnicas de Modulación de Portadora Única

Las técnicas de modulación, tales como OOK, modulación de amplitud de pulso (PAM), modulación de ancho de pulso (PWM) y PPM, son sencillas de implementar para Sistemas Li-Fi. En general, las técnicas de modulación de una sola portadora son candidatos adecuados para Li-Fi cuando se requieren aplicaciones de datos moderadas.

Al conmutar el LED entre los estados "on" y "off", los bits entrantes se pueden modular en la intensidad de la luz. El control de iluminación puede ser soportado ajustando las intensidades de luz de los estados "on" y "off", sin afectar el rendimiento del sistema.

Se proponen símbolos de compensación en el estándar de comunicaciones de luz visible, IEEE 802.15.7, para facilitar el control de iluminación a expensas de reducir el SE (eficiencia espectral). Si el presupuesto del enlace ofrece altas relaciones señal / ruido (SNR), M-PAM puede usarse para modular los bits entrantes en la amplitud del impulso óptico.

La posición del impulso óptico se modula en chips de menor duración en PPM con un índice de posición que varía dependiendo de los bits entrantes. El PPM es más eficiente de energía que OOK, sin embargo, requiere más ancho de banda que OOK para soportar velocidades de datos equivalentes.

#### *2.4.6.2. Optical OFDM*

Las técnicas de modulación de una sola portadora requieren un proceso de igualación complejo cuando se emplean a altas velocidades de datos. Además, los efectos tales como la interferencia de la corriente continua y la interferencia parpadeante de las luces fluorescentes pueden influir en el rendimiento del sistema en las regiones de frecuencia más baja del ancho de banda utilizado. Por otro lado, las técnicas de modulación de portadora múltiple tales como OFDM pueden convertir el desvanecimiento selectivo en frecuencia del canal de comunicación en un desvanecimiento plano empleando el ecualizador de una sola toma eficiente desde el punto de vista computacional. Además, OFDM soporta la potencia adaptativa y la carga de bits que puede adaptar la utilización del canal a la respuesta de frecuencia del canal. Esto puede maximizar el rendimiento del sistema. Apoyar sistemas de comunicación multiusuario es una ventaja inherente de OFDM, donde cada usuario podría ser asignado a ciertas subportadoras.

En el transmisor OFDM, los bits entrantes se modulan en formatos de modulación específicos tales como M-QAM. Los símbolos M-QAM se cargan después en subportadoras ortogonales con espaciado de subportadora igual a múltiplo de la duración del símbolo. Los símbolos paralelos pueden entonces multiplexarse en una salida en el dominio del tiempo en serie, usualmente usando transformación de Fourier rápida inversa (IFFT). (ELGALA, 2015).

El enlace físico de Li-Fi se logra mediante el uso de los dispositivos opto electrónicos, tales como LED y foto detectores (PD). Debido al hecho de que estas fuentes de luz producen una luz incoherente, las formas de onda OFDM time-domain se usan en Li-Fi para modular la intensidad de la fuente LED. Por lo tanto, estas formas de onda deben ser tanto unipolares como reales. Los esquemas de modulación OFDM unipolar se introdujeron principalmente para proporcionar alternativas OFDM ópticas eficientes energéticamente a DCO-OFDM.

#### *2.4.6.3 Técnicas OFDM híbridas*

OFDM se modificó en muchos estudios para adaptar varios aspectos específicos de los parámetros del sistema Li-Fi. Se utiliza una matriz de múltiples LED para transmitir la señal

OFDM de manera que las subportadoras se asignen a diferentes LED. A medida que aumenta el número de LEDs en la matriz, se reduce el PAPR de las señales eléctricas OFDM. Cuando el número de subportadoras es igual al número de LEDs en la matriz, el PAPR alcanzaría su valor mínimo de 3 dB ya que la señal eléctrica sería una onda sinusoidal ideal. (YADAV, 2017).

Se ha informado que el OFDM óptico espacial (SO-OFDM) tiene ganancias de rendimiento de BER sobre DCO-OFDM a una SNR alta debido a la reducción de PAPR y la robustez frente a las no linealidades de LED. Se propuso OFDM óptico de polaridad inversa (RPO-OFDM) para permitir un mayor grado de control de iluminación en los sistemas Li-Fi basados en OFDM.

#### *2.4.6.4. Li-Fi Técnica de modulación única*

La frecuencia de modulación en los sistemas Li-Fi no corresponde a la frecuencia portadora del LED. Todas las técnicas de modulación mencionadas anteriormente son técnicas de modulación en banda base. Es prácticamente difícil modular la frecuencia portadora de los LEDs, sin embargo, es prácticamente sencillo cambiar su color. Esta característica añade un nuevo grado de libertad a los sistemas Li-Fi. Los LEDs ajustables en color, como el LED rojo verde azul (LED RGB) pueden iluminarse con diferentes colores según la intensidad aplicada en cada elemento LED. (ELGALA, 2015).

El estándar IEEE 802.15.7 propone el cambio de color (CSK) como técnica de modulación para VLC. Los bits entrantes se asignan en una constelación de colores del espacio de color cromático CIE 1931, como se muestra en la Fig. 7. El CIE 1931 es el modelo de iluminación ampliamente utilizado para la percepción del color del ojo humano. Cualquier color en el modelo puede ser representado por la dimensión de cromaticidad  $[x, y]$ . En CSK, la intensidad global del color de salida es constante, sin embargo, las intensidades relativas entre los múltiples colores usados se cambian.

Por lo tanto, se modula el color instantáneo del LED multicolor. Siete longitudes de onda se definen en IEEE 802.15.7 especifican los vértices de un triángulo donde se encuentra el punto de constelación. La intensidad de cada elemento RGB-LED se cambia para que coincida con el punto de constelación manteniendo una potencia óptica constante y un color de iluminación constante. Esto es deseable en sistemas Li-Fi, ya que el color de iluminación constante naturalmente mitiga cualquier parpadeo. Un atenuador de amplitud se utiliza para el control de brillo en CSK.

#### **2.4.7. Ventajas de utilizar el sistema LiFi**

Los beneficios de Li-Fi emergen como resultado de desbloquear la gran cantidad de espectro electromagnético de licencia libre, que se encuentra en las regiones infrarrojas y de luz visible.

Los principales beneficios son:

- Infraestructura inalámbrica mejorada al proporcionar una capa adicional de células pequeñas ("attocélulas");
- Evitar el cruce del espectro de radiofrecuencia (10.000 veces más capacidad);
- Habilitar tasas de datos pico muy altas (10 Gbps)
- La habilitación de Internet de Cosas (100 veces más dispositivos)
- Comunicación inalámbrica segura mejorada (reducción de la interceptación de señales)
- Mayor eficiencia energética combinando comunicación de datos e iluminación (100 veces reducción de energía)
- Eliminación completa de los problemas de salud.

### **2.3. Análisis de Sistemas Híbridos de acceso inalámbrico**

Las redes inalámbricas híbridas o también llamadas heterogéneas son capaces de aprovechar de forma efectiva las diferentes tecnologías de acceso para proporcionar una amplia variedad de áreas de cobertura, contienen las capacidades potenciales de mejorar la eficiencia de la utilización de recursos espectrales. La coexistencia de WiFi (una tecnología de acceso inalámbrico de área local) y Lifi (una tecnología de acceso inalámbrico complementaria emergente), puede considerarse como un típico sistema de prototipo.

La demanda de servicios multimedia de internet en tiempo real (videos en alta definición) prevalece actualmente. A pesar de que se implementan celdas pequeñas adicionales y puntos de acceso WiFi (AP) para acomodar el creciente número de usuarios móviles, la abrumadora demanda de alto rendimiento y baja demora es más frecuente.

Esta creciente demanda ha dado como resultado una disminución de la calidad del servicio (QoS) con un espectro al límite. Para aliviar este problema, enfoques novedosos que utilizan un espectro adicional se han investigado.

#### **2.3.1. Redes Li + WiFi (HetNets)**

En términos de topología de red, las redes heterogéneas (HetNets) desempeñarán un papel importante en la integración de un espectro diverso para proporcionar alta calidad de servicio

(QoS), especialmente en ambientes interiores donde hay infraestructura localizada que soporta acceso inalámbrico direccional de corto alcance.

Las Het-Nets de múltiples niveles utilizan una combinación de macrocélulas que proporcionan servicios amplios de menor frecuencia, pequeñas células de RF (RF-SCs) que proporcionan una mejor cobertura en las ubicaciones ocupadas por los usuarios y células pequeñas LiFi que proporcionan capacidad adicional mediante el uso del espectro óptico. (MICHAEL, 2015)

Los RF-SCs interiores, incluyendo las femtocélulas con licencia y/o puntos de acceso WiFi (APs) sin licencia, desplegados bajo cobertura de macrocélulas, pueden hacerse cargo de la conexión cuando se mueven en interiores. El estado de las comunicaciones inalámbricas y móviles excepto en las densas redes WiFi, donde la contención es posible, la alta potencia de la señal en las redes WiFi de acceso a interiores es un indicador de una conexión WiFi rápida y fiable.

En un edificio con diferentes tipos de paredes y otras obstrucciones, a medida que aumenta la distancia, la intensidad de la señal WiFi es atenuada. En consecuencia, si en una habitación la intensidad de la señal es muy atenuada, los usuarios WiFi experimentan una mala conectividad y una velocidad lenta.

La conectividad lenta también es causada por la señal alta de interferencia de los APs WiFi vecinos o a su vez debido a múltiples usuarios activos que comparten el ancho de banda limitado de un AP WiFi.

Mientras que las implementaciones de redes inalámbricas de área local (WLAN) IEEE 802.11ad (WiGig) están comenzando a llegar al mercado de consumo de productos de tres bandas (2,4 GHz, 5 GHz y 60 GHz), sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC) (VLC), también llamada LiFi, ofrecen una funcionalidad dual para transmitir datos sobre la intensidad de las fuentes ópticas (iluminación simultánea con la comunicación de datos).

Por lo tanto, la transmisión multiusuario simultánea se utiliza en WiFi como un paso siguiente, similar a la habilitada multiusuario de múltiples entradas y múltiples salidas (MU-MIMO) en Long-Term Evolution (LTE). Sin embargo, se necesita un gran esfuerzo de normalización para definir este nuevo modo de transmisiones simultáneas a múltiples usuarios que deben seguir siendo compatibles con versiones anteriores. Además, hay límites de complejidad con un mayor número de antenas, debido a estos problemas de estandarización, escalabilidad y



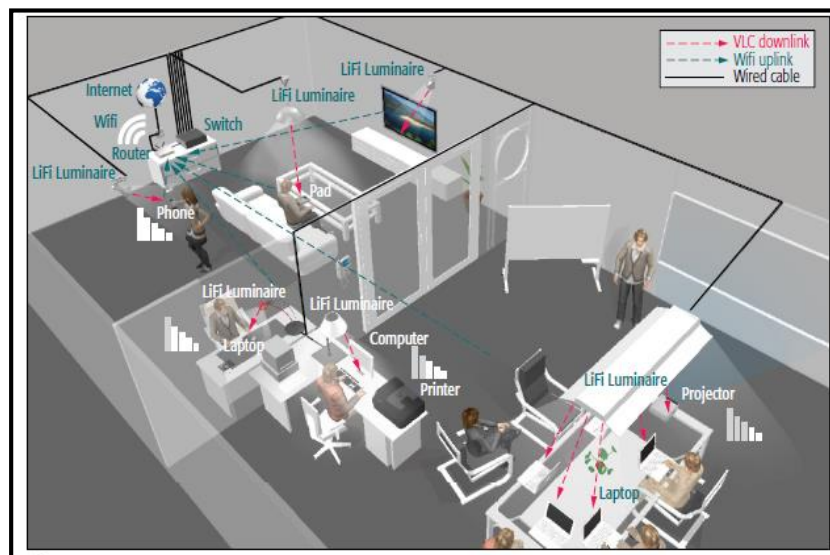
complejidad, y debido a la creciente demanda de WiFi, la escalabilidad es limitada y hay razones para considerar otros medios inalámbricos.

### 2.3.1.1. *Cómo llegar a alta capacidad y densidad*

Las luminarias que se pretende utilizar en interior para LiFi (luces) son del tipo SCs ópticos (O-SCs) propios en una HetNet compuesta por una red de tres capas macrocélulas RF, RF-SCs y O-SCs. Buscando descargar el tráfico de los sitios más localizados, se espera que LiFi mejore el rendimiento de acceso a los APs de WiFi, descargar tráfico de alta velocidad con una conectividad perfecta. (SHIUA & SHAO, 2016).

La propuesta Li + WiFi ofrece también nuevas características interesantes, como mejorar la seguridad en O-SC un resultado que parecería obvio porque la luz visible no penetra a través de las paredes, y mejor posicionamiento al tener una mayor resolución comparado con otros sistemas basados en Tecnologías RF, incluyendo WiFi.

Varios operadores móviles coinciden que el 80 por ciento del tráfico móvil ocurre dentro; Por lo tanto, la combinación de LiFi y WiFi tiene un gran potencial en el futuro de la Tecnología HetNets, incluyendo las telecomunicaciones móviles de próxima generación (5G).



**Gráfico 8-2.** Necesidades Estacionarias y Cuasi-estacionarias

**Fuente:** <http://ieeexplore.ieee.org/document/7402263/>

Como se muestra en el gráfico 8-2 existen necesidades estacionarias y cuasi-estacionarias, los usuarios estacionarios disponen de acceso a los datos a través de las luminarias compatibles con

LiFi utilizando un lenguaje de iluminación y los usuarios con mayor movimiento podrán recurrir a la cobertura más amplia del WiFi. En la red Li + WiFi, los dispositivos de usuario (UDs) deben estar habilitados para LiFi.

Aunque la red Li + WiFi es probable que sea una red asimétrica con LiFi como enlace descendente, esta agrupación de tecnologías ofrece liberar la capacidad del sistema WiFi para cualquier crecimiento futuro en la carga de tráfico. Debiendo superar algunos retos de alineación del enlace, deslumbramiento y consumo de energía.

Pero a pesar de la asimetría, los beneficios del canal VLC son significativos. Aspectos centrales en el diseño y gestión de un sistema Li + WiFi incluyen tratar aspectos del cómo una UD se une a la red, la manera en que soportará una eminente movilidad, como un dispositivo se mueve de una célula a otra y entre redes, y cómo múltiples usuarios son atendidos.

En última instancia, el rendimiento combinado de las redes LiFi y WiFi deben al menos garantizar una conectividad rápida y distribuir de manera óptima los recursos entre los usuarios.

### ***2.3.2. Vínculos múltiples y agregación***

Es común ver que las luminarias se distribuyan en la mayoría de nuestros espacios de vida este hecho puede ser explotado utilizando un receptor multicanal, entonces la infraestructura de iluminación puede ser potencialmente MIMO usando un UD de múltiples detectores. Sin embargo, el enlace o enlaces óptimos que impliquen una o más luminarias en presencia de múltiples UDs es un reto.

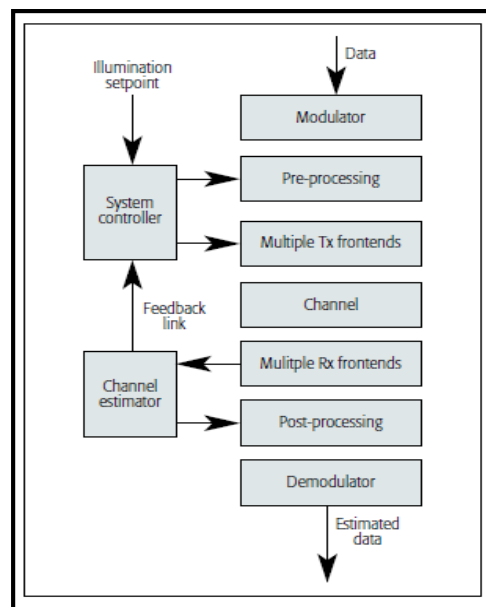
Esto es más complicado ya sea por la movilidad y orientación cambiante de la UD. Por lo tanto, la detección fiable de enlace de calidad entre luminarias individuales dentro del campo de visión del receptor UD es crítico y requiere una cuidadosa investigación.

Por otro lado, la conexión de un usuario con múltiples canales ópticos podría ser una ventaja, siempre que la aplicación necesite un alto rendimiento ya que varias luminarias habilitadas para LiFi en cada sala, sub-bandas de frecuencia de modulación y longitudes de onda puedan ser reutilizadas a cierta distancia para de esta manera lograr un mayor rendimiento. Carrier y agregación de canales, similar a LTE advanced, podría ser un enfoque clave para aumentar el ancho de banda en la transmisión.

La realización de la agregación en La red Li + WiFi necesitaría métodos eficientes para dividir el tráfico global de entre el de RF y el óptico, para manejar adecuadamente los paquetes en los

enlaces, y para reordenar los paquetes, en consecuencia estos problemas afectarían claramente a los protocolos de la capa superior tales como el protocolo de control de transmisión (TCP) ya sea en escenarios en los que un usuario puede ocupar una única luminaria (configuración SISO) o simultáneamente a múltiples luminarias (configuración MIMO), entonces tres posibles escenarios de acceso pueden ser considerados. Si el usuario es atendido por una única luminaria que le proporciona la mejor calidad de enlace.

Otro caso puede presentarse cuando múltiples luminarias sirven a un solo usuario satisfaciendo sus necesidades sin embargo este número de luminarias deberán manejarse dependiendo de la disponibilidad del recurso. Las actividades de investigación siguen centradas sobre MIMO en LiFi considera el MIMO con un único usuario (SU-MIMO) un solo UD de múltiples detectores comunicándose con un solo LED multi-chip o luminarias de múltiples distribuciones.



**Gráfico 9-2** Descomposición de valores basados en MIMO

Fuente: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7035746>

Como se muestra en el gráfico 9-2, para un SU-MIMO, la descomposición de valores singulares (SVD) basados en la transmisión MIMO pueden idealmente apoyarse en enlaces paralelos para maximizar su capacidad. Sin embargo, los canales de LiFi de SU-MIMO tendrían que tener una adaptación de rango común y tasa de adaptación al canal similar de enlaces inalámbricos de RF.

En un MU-MIMO, el rango del canal MIMO puede ser mejorado dependiendo de las ubicaciones de usuario seleccionadas. Múltiples luminarias pueden enviar señales a UD de múltiples detectores para servir a estos múltiples usuarios en paralelo. Teniendo en cuenta que

tales transmisiones paralelas ya son comunes en comunicaciones de RF, pero de esto apenas están saliendo del laboratorio algunos prototipos. (MARCOS KATZ, 2015).

El concepto SU-SVD-MIMO se puede utilizar para evitar interferencias y mantener la iluminación de destino. El SVD se usa para descomponer el canal MIMO en subcanales SISO paralelos, permitiendo la multiplexación espacial sin interferencias. En el receptor, y después de estimar el canal, la información necesaria para preprocesar y post-procesar las señales en el transmisor y el receptor, respectivamente, y el punto de ajuste de iluminación (brillo de la sala) está disponible en el canal de realimentación, para extraer los Canales SISO paralelos.

### ***2.3.3. Movilidad y acceso a medios***

La cuestión de la superposición y no superposición de cobertura necesitaran una cuidadosa distribución de las luminarias ya que tendrán un gran impacto en la transferencia no sólo entre WiFi y LiFi, sino también entre las propias luminarias. El mecanismo de traspaso también puede incluir información sobre la ubicación UD, que puede realizarse utilizando ambas tecnologías, siendo LiFi probablemente más precisa. La asignación de recursos y la programación son aspectos importantes del soporte de QoS en redes inalámbricas.

La asignación de recursos y la programación son aspectos importantes del soporte de QoS en redes inalámbricas. Para apoyar la movilidad, necesitan la adaptación al cambio de canales en escalas de tiempo lentas y rápidas. Mientras que el enlace LiFi cambia más lento, ya que la potencia de la señal instantánea es proporcional a la integral de la potencia óptica sobre la superficie del detector, el enlace WiFi está sujeto al desvanecimiento rápido donde el canal de radio se puede desvanecer aleatoriamente a lo largo de unos pocos centímetros y pocos milisegundos. (RAHAIM, 2015).

Además y como se ha expuesto anteriormente, el inconveniente de CSMA / CA en WiFi es particularmente notable en escenarios donde se requiere baja latencia para múltiples usuarios en paralelo, además las normas WiFi son compatibles con ambientes típicos, con una mezcla de clientes y protocolos no alcanzan el máximo rendimiento especificadas en las normas, estos problemas WiFi podrían ser solucionados mediante MU-MIMO y la formación de un haz coordinado.

Al descargar datos de los usuarios con canales de alta calidad en los enlaces ópticos, WiFi CSMA / CA puede ser mejorado en cuanto tiene que ver con asuntos de equidad de asignación

de recursos, además, la descarga elimina la congestión e interferencias dentro de la misma WLAN y otras redes en el área.

Mantener una conectividad continua para los usuarios móviles es el primer desafío. La transferencia de la misma tecnología de acceso inalámbrico es necesaria debido a la pequeña área de cobertura creada por cada luminaria, así como el número limitado de luminarias por habitación. Por lo tanto, la movilidad del usuario provoca la conmutación frecuente entre los O-SCs, dando como resultado pérdidas de conectividad y / o latencia no deseada.

Este traspaso puede, por lo tanto, ser complementado por un segundo mecanismo de traspaso, en el que el tráfico desde una UD es redirigido de O-SC a RF-SC y viceversa, en multi-nivel y / o HetNets, se da a menudo una preferencia para conectar los SCs esto se debe a la mejora agregada del rendimiento que brindan las redes densas.

La transferencia entre los SCs de la misma tecnología y entre SCs de una tecnología diferente (O-SCs a RF-SCs y viceversa) se combinan usando acceso múltiple ortogonal de división de frecuencia (OFDMA). Como sabemos en OFDMA, los datos se transmiten en subportadoras ortogonales de banda estrecha, en las que se asignan a los usuarios grupos de sub portadoras para permitir transmisiones simultáneas. En este esquema OFDMA, la complejidad del sistema es relativamente mayor en comparación con CSMA / CA, porque la transmisión necesita una estrecha coordinación de asignación de recursos en toda la red. Alternativamente, y mientras se apunta a la equidad entre los usuarios, se propone un protocolo MAC de transmisión en paralelo (PT-MAC) que contiene tanto el algoritmo CSMA / CA como la transmisión paralela, este protocolo PT-MAC mejoraría el rendimiento y eficiencia de la red híbrida (IEEE 802.11n y VLC). (MARCOS KATZ, 2015).

La información de movimiento también puede considerarse como una métrica importante y distintiva en la función de utilidad para el enrutamiento de tráfico y transferencia en sistemas Li + WiFi, así también se hace indispensable realizar un seguimiento de la información de usuario en tiempo real (por ejemplo, ubicación del usuario, dirección de movimiento y velocidad).

Este enfoque minimizará el número de luminarias implicadas en el mecanismo de traspaso al tiempo que mantiene una transición sin problemas.

#### ***2.3.4. Un Prototipo de Prueba de Concepto y Resultados***

En la actualidad a través de una asociación entre investigadores del Instituto Fraunhofer Heinrich Hertz, el Instituto Tecnológico de Nueva Jersey, la Universidad Estatal de Chicago y la Universidad de Boston, ya han implementado un sistema de prototipo Li + WiFi HetNet de prueba de concepto. Describiremos brevemente los diversos componentes del sistema y mostraremos los resultados de rendimiento de los datos experimentales obtenidos del prototipo.

#### ***2.3.5. Capacidades de los Transceptores LiFi:***

El sistema Li + WiFi HetNet propuesto está compuesto por dispositivos bidireccionales en el transceptor LiFi de alta velocidad que satisfacen la entrega de datos en tiempo real y alcanzan las capas 1 y 2 de la pila de protocolos OSI. El dispositivo, cuyo principio se muestra en la Fig. 3, utiliza un convencional lighting-grade high-power phosphorus-converted LED (PC-LED) que realiza tanto la iluminación y la transmisión de los datos en paralelo. Un controlador de LED utilizado para permitir un ancho de banda de modulación analógica de hasta 180 MHz. En el receptor, se utiliza un fotodiodo PIN de silicio de alta velocidad de gran área junto con un amplificador de impedancia (TIA). En el LED y en el fotodiodo se utiliza un lente plano - convexo para concentrar el haz y ampliar el área de recepción, respectivamente.

Detrás de los circuitos analógicos de transmisor y receptor, se utiliza una unidad de banda base digital (BBU) para convertir los paquetes ethernet en señales de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) polarizadas en DC y viceversa. Las señales OFDM tienen un ancho de banda de 70 MHz. La BBU realiza estimación de canal asistida por piloto y ecualización de dominio de frecuencia para reconstruir las constelaciones de símbolos recibidas. A partir de la secuencia piloto recibida, se mide la magnitud del vector de error (EVM), y esta información se devuelve al transmisor. (SIHUA & MOUSSA, 2015)

Dependiendo de la calidad del canal en función de la frecuencia, se adapta la carga del bit. La velocidad de datos se incrementa tanto como sea posible para que no se produzcan errores después de la corrección de errores hacia adelante.

Gracias a las técnicas utilizadas en la adaptación de enlaces, implementadas en tiempo real como bucle cerrado, se logra la velocidad de datos deseable, evitando interrupciones debido a condiciones cambiantes del canal tales como niveles de iluminación variables.

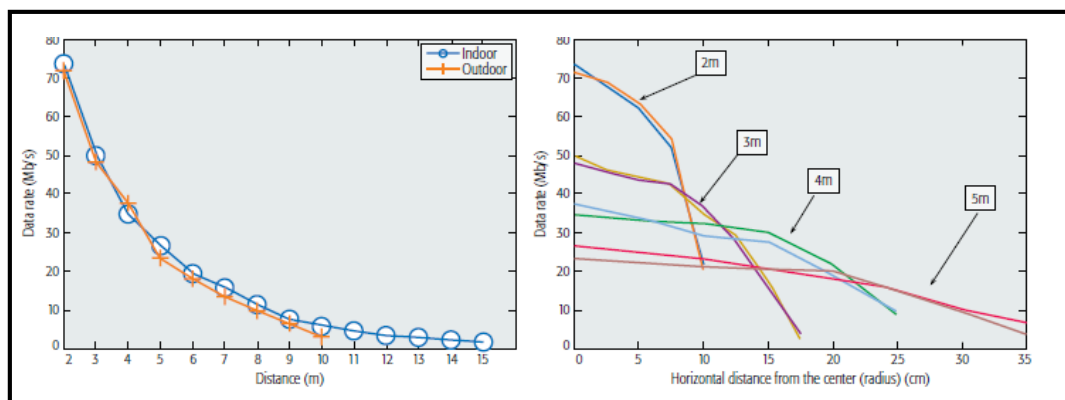
Cada transceptor está equipado con una fuente de alimentación externa y un conector Ethernet RJ45 1 Gb/s estándar. En conjunto, es posible una velocidad de datos bruta y neta de 500 Mb/s

y 270 Mb/s, respectivamente, con una latencia unidireccional de aproximadamente 10 ms, independientemente de la velocidad de datos

### 2.3.6. Rendimiento de los enlaces de LiFi de interior y exterior

En los experimentos realizados en interiores y exteriores para medir el rendimiento alcanzable de los frontales LiFi. La distancia entre el transmisor y el receptor varía en el rango de 2-15 metros y 2-10 metros para el interior y exterior.

En un despliegue en interiores, la distancia representa el rango vertical del O-SC. El rendimiento también se mide en diferentes puntos alejados del centro del haz de luz que representa la distancia horizontal dentro del área de cobertura del O-SC.

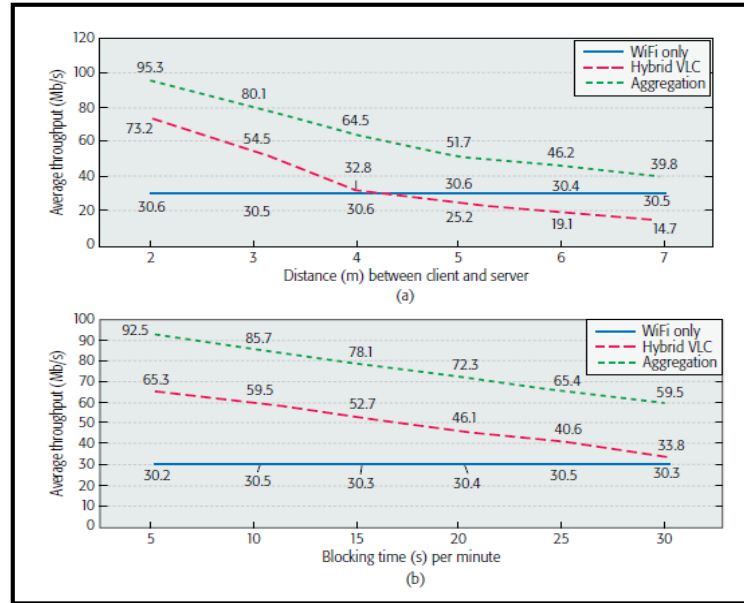


**Gráfico 10-2** Rendimiento alcanzado en Mb/s por distancia vertical y horizontal

Fuente: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6162563/>

El gráfico 10-2 muestra que el rendimiento alcanzado es de 74 Mb/s y 25 Mb/s a una distancia vertical de 2 m y 5 m, respectivamente. Teniendo en cuenta que la distancia vertical estará en este rango para la mayoría de las aplicaciones interiores. La velocidad de datos ofrecida por los dispositivos LiFi se ve reducida debido al amplio haz del transmisor formado por una lente de apertura de 1 pulgada, los resultados se reducen aún más utilizando un LED blanco y midiendo el rendimiento en la capa de aplicación.

A pesar de estas limitaciones prácticas, el rendimiento de un solo usuario logrado con LiFi es mayor que lo que se puede lograr con dispositivos WiFi actuales basados en el modo hasta 54 Mb/s (Gráfico 11-2).

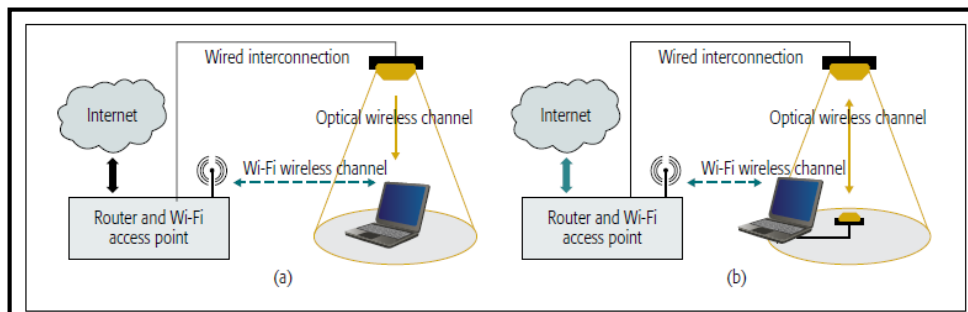


**Gráfico 11-2** Rendimiento de un sistema híbrido, solo wifi y agregación

Fuente: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6162563/>

Debido a la pequeña área de cobertura para el O-SC, el through-put total puede incrementarse significativamente mediante la reutilización espacial del espectro óptico si se despliegan múltiples O-SCs que sirven a múltiples usuarios en paralelo.

Se experimentaron tres eventos, en el primer sistema, el WiFi sólo se utiliza para conectarse a Internet. El segundo sistema, denominado sistema híbrido, es el mismo que el primero, pero el enlace descendente de uno de los usuarios está conectado a través de un enlace LiFi. En el tercer sistema, denominado sistema agregado, un usuario está conectado en paralelo a WiFi y LiFi. El gráfico 12-2 representa las configuraciones del sistema híbrido (a) y sistema agregado (b).



**Gráfico 12-2** Configuraciones del sistema híbrido (a) y del sistema agregado (b)

Fuente: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6162563/>



En el sistema híbrido, el enlace unidireccional LiFi es explotado para complementar el enlace descendente WiFi convencional, mientras que en el sistema agregado, ambos enlaces bidireccionales WiFi y LiFi se utilizan completamente para mejorar el rendimiento alcanzable y proporcionar una conectividad de red robusta.

El gráfico 12-2 (a) muestra el rendimiento promedio de los tres sistemas medidos a diferentes distancias entre los frontales WiFi y LiFi. En esta configuración, los frontales LiFi están estrictamente alineados. El modo del enrutador WiFi se selecciona como hasta 54 Mb/s para proporcionar conectividad robusta en un entorno atestado. Aunque el esquema de señalización de WiFi depende en principio de la SNR recibida, el rendimiento de WiFi mostrado en la Fig. 6a es casi constante en el área de cobertura del AP LiFi porque la degradación del rendimiento de WiFi ocurrirá cuando la distancia aumenta hasta 25 metros, donde la conectividad de VLC ya no está disponible.

El sistema híbrido duplica el rendimiento cerca del AP LiFi, mientras se degrada rápidamente a medida que aumenta la distancia. El rendimiento de WiFi sólo sobrepasa el del sistema híbrido cuando la distancia se incrementa a alrededor de 4,1 m, porque a medida que aumenta la distancia, la capacidad de enlace descendente de LiFi disminuye con la distancia, eventualmente llegando a ser insignificante. Hay que tener en cuenta que los resultados de rendimiento del sistema VLC híbrido dependen sólo de la capacidad del enlace descendente LiFi.

El sistema agregado triplica el rendimiento promedio alcanzable, y su límite más bajo es más alto que el promedio de rendimiento de WiFi solamente, por lo tanto, la técnica de agregación no sólo mejora el ancho de banda integrado disponible, sino que también proporciona una comunicación de red fiable. Debido a la inherente propiedad de corto alcance de LiFi, un rendimiento mucho mejor se puede alcanzar cerca de la LiFi AP para los usuarios individuales.

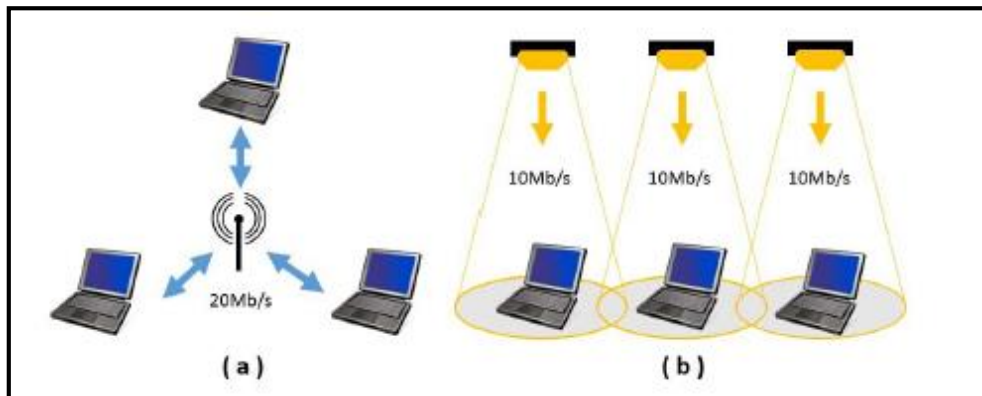
Tenga en cuenta también que los usuarios LiFi y WiFi pueden ser servidos en paralelo dentro y fuera de esta área de cobertura limitada. Considerando que los dispositivos móviles pueden tener movimientos irregulares, el bloqueo del canal LiFi puede ser un aspecto significativo que se mitiga por la solución híbrida.

La Figura 12-2 (b) muestra el rendimiento medio conseguido por los tres sistemas con la variación de los períodos en los que el enlace LiFi se bloqueó de 5s a 30s por minuto. Las distancias entre los frontends WiFi y LiFi se fijan a 2 metros. Se observa que incluso si el enlace LiFi se bloquea el 50 por ciento del tiempo, mientras el usuario se mueve, el sistema híbrido supera al sistema WiFi-only. (SIHUA SHAO, 2014).

## 2.4. Sistema inalámbrico híbrido WiFi-VLC para acceso a Internet

La comunicación por luz visible no tiene licencia, tiene un amplio ancho de banda, soporta nuevos niveles de seguridad debido a la opacidad de las paredes y puede combinarse para proporcionar tanto iluminación como comunicación de datos.

Como parte de un sistema de iluminación, VLC es ideal como una tecnología de enlace descendente en la que los datos se entregan de las luminarias hacia a los receptores que estarán en el área del campo de iluminación. La tecnología VLC provista de dispositivos LED se caracteriza por una alta eficiencia espectral de área, gran ancho de banda, no tiene licencia, alta seguridad y naturaleza de doble uso.



**Gráfico 13-2** Densidad de ancho de banda de (a) RF y (b) VLC

Fuente: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7402263/>

El gráfico 13-2 muestra cómo LIFI puede reutilizar el espectro de manera eficiente en un área pequeña. El caso a) muestra un canal de RF en el que los tres usuarios comparten un ancho de banda de 20 Mb/s, comparado con el caso b), un entorno VLC (LIFI) habilitado, en el que tres usuarios utilizan canales LIFI individuales de 10 Mb / s, proporcionando 10Mb / s más ancho de banda agregado que el Canal de RF individual. Como un enfoque complementario de las soluciones RF inalámbricas existentes, VLC está preparada para superar el espectro de radio en sistemas altamente localizados y convertirse en un prometedor candidato de acceso inalámbrico de banda ancha para resolver la "crisis del espectro".

El VLC o Lifi de interiores basado en LEDs ha atraído gran atención desde hace mucho tiempo atrás debido a sus propiedades físicas innatas incluyendo la eficiencia de energía y un menor costo operacional comparado con el convencional incandescente y fluorescente. Las investigaciones actuales de VLC se centran principalmente en las características de la capa

física (PHY) analizando factores como la atenuación de atenuación, atenuación de parpadeo y modulación. Estos esfuerzos buscan mayores tasas de datos posibles.

Bajo un modelo de doble uso, VLC nos proporcionaría iluminación y también acceso a datos, sin embargo, proporcionar un enlace ascendente en un sistema de este tipo es un desafío debido a las limitaciones potenciales de energía de los dispositivos móviles (que de otra manera no necesitan producir luz) y el deslumbramiento potencial de la luz producida. En aplicaciones sensibles a RF y de alta seguridad, es posible un enlace ascendente óptico con una velocidad de transmisión relativamente alta.

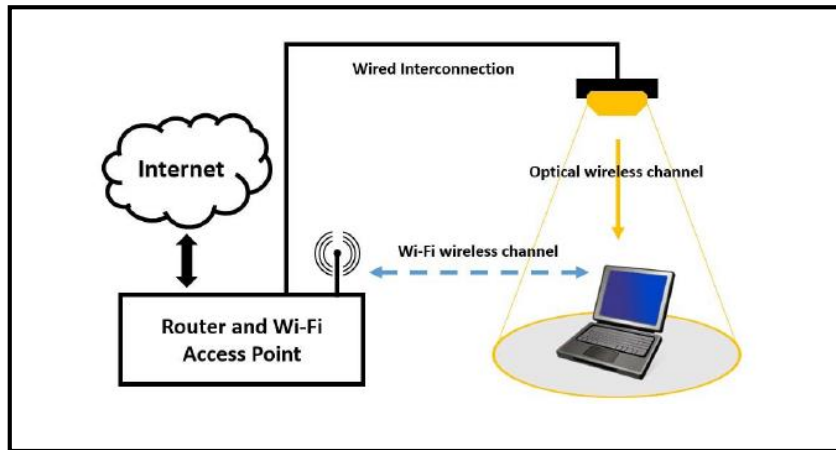
Sin embargo, en la mayoría de los lugares insensibles a RF, como hogares, escuelas, oficinas y supermercados, un enlace ascendente óptico es más difícil de justificar. Los dispositivos móviles (por ejemplo, tableros de espera, teléfonos inteligentes, tabletas) ya están energizados y no sería práctico equipar estos dispositivos con una fuente de luz con mucha energía.

Para ser eficientes, los enlaces ascendentes de VLC necesitarán utilizar estrechos tamaños de haz que conducirían a problemas debido al movimiento y orientación del dispositivo con respecto a los receptores fijos de enlace ascendente. De igual manera, los enlaces ascendentes de VLC pueden producir deslumbramiento que es incómodo e indeseable para los usuarios. Por lo tanto, VLC sigue siendo un contendiente fuerte para el canal de enlace descendente, pero es mejor si se complementa con una tecnología alternativa de enlace ascendente como Wi-fi.

Esquemas heterogéneos alternativos, tales como VLC e infrarrojo, han sido investigados con el fin de resolver el problema que presenta VLC de enlace ascendente en la capa PHY. Sin embargo, todavía tenemos que abordar retos en la realización de protocolos de capa superior cuando adopta un modelo asimétrico. Por otra parte, la naturaleza omnipresente de WiFi con su característica omnidireccional puede ser fácilmente explotada como un enlace ascendente, especialmente si el uso de VLC reduce la congestión de enlace RF funcionando como una red heterogénea. (MOHAMED K, 2015).

#### ***2.4.1. Sistema híbrido compuesto por la tecnología IEEE 802.11 y un enlace VLC***

El canal VLC unidireccional es explotado para complementar el canal RF convencional de enlace descendente.



**Gráfico 14-2** Configuración básica de una red Heterogénea

Fuente: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7293077/>

El gráfico 14-2 muestra la configuración básica de esta red heterogénea. Este sistema no sólo alivia la congestión causada por la contención de acceso WiFi, sino que también resuelve los problemas potenciales de la transmisión de enlace ascendente en redes VLC. Se ha experimentado con los siguientes diseños: i) El diseño de un sistema asimétrico compuesto de enlace ascendente WiFi y enlace descendente VLC para incrementar la capacidad de red global con múltiples usuarios. ii) La implementación de un enlace híbrido integrado que permite el acceso inalámbrico a internet vía enlace descendente VLC y enlace ascendente WiFi. Y iii) análisis y experimentación para evaluar el rendimiento bajo TCP y UDP cargando para el tráfico interactivo del navegador web con diferentes niveles de congestión.

#### **2.4.2. Investigaciones Relacionadas**

Los primeros trabajos sobre sistemas híbridos que integran RF y VLC se basaron en simulación y análisis. A nuestro leal saber y entender, todavía con ninguno de estos sistemas híbridos se ha logrado una implementación práctica del sistema que genere una comunicación funcional basada en IP que soporte la navegación web u otro acceso a Internet. (TOMAS, 2014)

En este modelo, los canales de VLC de radiodifusión / enlace descendente se proponen para complementar un canal de RF existente. Las técnicas de transferencia están definidas para resolver discontinuidades debido a la movilidad y específicamente para transferir entre un enlace RF simétrico y el enlace VLC-RF asimétrico cuando un dispositivo transita por un espacio interior.

El costo del dispositivo y el consumo de energía en relación con el rendimiento de datos han sido investigados para un sistema VLC híbrido. Los autores muestran ventajas para un enlace

ascendente de RF comparado con un enlace ascendente de VLC, pero principalmente como relacionado con el costo de energía para la transmisión.

Este sistema híbrido inalámbrico WiFi-VLC, permite la típica conexión TCP entre cliente y servidor sin ninguna reconfiguración en el lado del servidor. Los paquetes de datos generados por las aplicaciones de usuario se transmitirán a través de WiFi y los datos solicitados desde el servidor se recibirán a través de la interfaz VLC.

### ***2.4.3. Oportunidades futuras de investigación***

De los análisis descritos anteriormente son considerables las oportunidades en el trabajo futuro en esta área. En primer lugar, ambas tecnologías experimentarán una evolución posterior a mayores velocidades de transmisión de datos. LiFi permite Gb/s de rendimiento utilizando mayor ancho de banda, LEDs monocromáticos o láser junto con multiplexación por división de longitud de onda, así como sistemas MIMO.

WiFi también se actualiza mediante el uso de más antenas y más ancho de banda, además de APs WiFi sin licencia, se necesitan investigaciones para explorar los posibles efectos de la descarga de datos de LiFi cuando se incluyen en el sistema las femtoceldas internas y las macroceldas externas. Los resultados obtenidos darán una imagen completa y ofrecerán primeras percepciones en un práctico HetNet de varias capas bajo restricciones prácticas de iluminación (por ejemplo, cumplimiento de los estándares de iluminación para iluminación de oficina). Un diseño de sistema adecuado debe considerar cuidadosamente las cualidades de iluminación y servicios únicos de espacios y aplicaciones individuales para lograr el mejor compromiso entre el rendimiento de VLC y las necesidades de iluminación.

Otra oportunidad es estudiar la coexistencia y evolución posterior de CSMA/CA y OFDMA en el HetNet propuesto, incluyendo la adaptación de lazo cerrado previsto para LiFi y redes WiFi mejoradas. Es importante gestionar la equidad proporcional entre los usuarios, lo que significa que cada uno de los  $N$  usuarios obtendría una fracción constante del ancho de banda al estar solo en una combinación de ambos canales LiFi y WiFi

La agregación de canales de Li + WiFi es otro desafío interesante. Dos modelos son de interés:

- Agregación de canales de una tecnología de acceso
- Agregación de canales de diferentes tecnologías de acceso

Estos pueden incluir múltiples canales dentro de RF o el espectro óptico. Ambos enfoques pueden implementarse en diferentes capas del modelo de referencia OSI que van desde el enlace de datos hasta la capa de aplicación. La movilidad de los usuarios es también una consideración importante ya que puede restringir el tener una conectividad transparente y es necesaria para evaluar correctamente el rendimiento de la red Li + WiFi, las técnicas de capa física (PHY) pueden usarse para mejorar el rendimiento de Li + WiFi en escenarios multiusuario.

Por último, se necesitan más medidas experimentales para proporcionar información sobre el despliegue práctico de redes Li + WiFi para así atraer el interés de la industria por las soluciones más prometedoras, por lo tanto, se necesita un banco de pruebas para investigar y realizar redes Li + WiFi usando diferentes configuraciones y para evaluar las soluciones y algoritmos más prometedores para la integración. El hecho de que los frontales de VLC de alta velocidad que utilizan soluciones de procesamiento de banda base existentes ya están disponibles permite realizar experimentos tempranos en las capas de protocolo más altas que combinan WiFi y LiFi con sofisticación creciente.

Por supuesto, los frontends ópticos disponibles todavía necesitan desarrollo adicional. La investigación del uso de múltiples colores y del procesamiento de señales digitales completamente definido por software permitirá la intervención en todas las capas de protocolo. Hay una gran oportunidad de investigación para redes Li + WiFi heterogéneas.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación

Este proyecto utilizó una metodología fundamentada en un modelo constructivo de soluciones, el mismo que nos proporcionó las herramientas adecuadas esenciales para sustentar una solución de calidad, oportuna y con costos competitivos al problema planteado en este estudio, apoyado en los fundamentos teórico prácticos del desenvolvimiento tecnológico de la comunicación por luz visible como una alternativa al actual sistema inalámbrica Wifi, investigando además las propuestas actuales que nos ofrecen las empresas que ofertan esta tecnología.

Dicha metodología la podemos clasificar en 3 partes:

- **Estudio de pre-factibilidad.** Como primer punto se investigó las principales características del problema en las comunicaciones inalámbricas Wifi buscando otorgar soluciones viables y razonables, mediante la innovadora tecnología Li-Fi en el desarrollo de las telecomunicaciones.
- **Formulación del proyecto.** En este punto se examinaron todos los elementos técnicos fundamentales que tengan o hayan tenido relación con la construcción de prototipos híbridos Wifi - Lifi, buscando información en las principales empresas gestoras de esta tecnología, alcanzando así los objetivos propuestos en esta investigación.
- **Ejecución del proyecto.** En esta etapa se realizó la ejecución de una prueba piloto del prototipo híbrido construido, con el fin de comprobar su operatividad y eficacia, extrayendo los principales parámetros que me permitieron demostrar la coexistencia de ambas tecnologías en un ambiente home y compararlas frente a un sistema Wifi tradicional.

Esta investigación podemos considerar que tuvo un cierto nivel exploratorio ya que se examinaron los problemas más relevantes que aquejan al momento a las actuales redes Wifi, un nivel descriptivo porque se determinaron las variables de estudio, profundizando en las causas que provocan el problema, a quienes afecta y cómo, un nivel correlacional ya que se estableció

una posible convivencia de ambas tecnologías y predictiva debido a los problemas que pueden afectar en un futuro la coexistencia de ambas tecnologías.

### **3.2. Desarrollo Del Prototipo Híbrido Wifi - Lifi**

#### ***3.2.1. Requisitos para el diseño del prototipo híbrido para un ambiente home.***

De los análisis del capítulo anterior se determinó que al combinar la luz visible como un medio para la transmisión de información sería una excelente solución para los sistemas actuales de radiofrecuencia, en ambientes donde existen grandes dificultades de emisión electromagnética algo que ya se pronosticaba para un futuro no muy lejano de que ambas tecnologías convivirían, LiFi vendría siendo un alivio del espectro Wi-Fi, e incluso reemplazaría a Wi-fi en entornos donde se carezca de una buena cobertura.

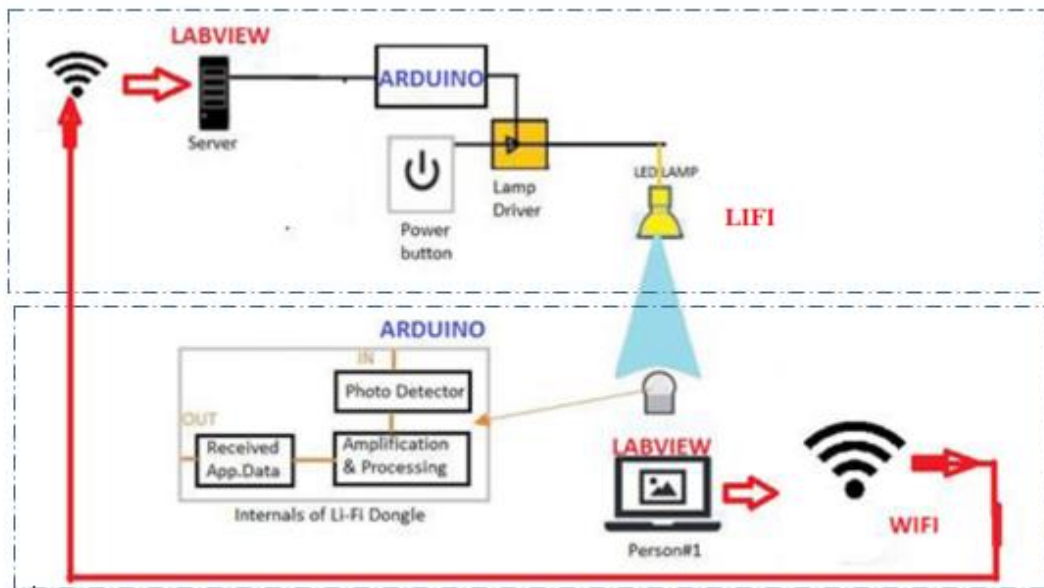
A continuación se menciona algunos requisitos mínimos que se consideró para el diseño del prototipo de comunicación Wifi – Lifi:

- Ser de un costo moderado y accesible
- De fácil instalación y manipulación al momento de su operación
- Crear una red híbrida que combine Li-Fi con sistemas RF.
- Ser portable para poder analizar su comportamiento en diferentes condiciones
- Transmitir datos a través de la red Wifi y recibir la información a través de Lifi.
- Ser de bajo consumo eléctrico
- Mantener una comunicación estable
- No causar interferencia a los sistemas de comunicación de RF existentes

#### ***3.2.2. Esquema general del sistema híbrido Wifi – Lifi***

El diseño general propuesto para el prototipo híbrido Wifi – Lifi se representa en el gráfico 1-3 en donde se puede distinguir los dos módulos inalámbricos que establecen la comunicación. De enlace ascendente Wifi y enlace descendente Lifi.





**Gráfico 1-3** Diagrama de bloques del prototipo Emisor Lifi Receptor Wifi

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

- **Módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi.** Este módulo estuvo estructurado por un microprocesador Arduino Uno, conectado a una tarjeta transceiver NRF24L01 programados para ejecutar la transmisión por RF (Emisor Wifi). La segunda parte de este módulo estuvo compuesto por un foto transistor que fue el encargado de recibir los caracteres que le eran enviados a través de los pulsos de luz (Receptor Lifi).

Las líneas de código programadas en el Sketch del micro controlador Arduino UNO conectado a la tarjeta transceiver NRF24L01 se encargaron de automatizar el inicio y fin de la comunicación de Radio Frecuencia entre los módulos. Es decir en este punto se estableció una comunicación sincronizada, mientras se producía el enlace ascendente de datos vía Wifi, al mismo tiempo en la otra etapa del sistema se activaba una alerta de detección mediante una rutina de interrupción de servicio con el propósito de monitorear si existe información válida que se haya detectado en el foto transistor, en el caso de ser afirmativo se la almacenaba para decodificarla y mostrarla en pantalla.

Para la correcta manipulación del prototipo se programó una interfaz gráfica (HMI) en LABVIEW en donde el usuario ingresaba los caracteres que se transmitirán al pulsar el botón de envío, como segunda opción se le incorporó otra alternativa para el ingreso de datos siendo esta de manera aleatoria y automática consiguiendo así una transmisión

continua de envío y recepción de caracteres. LabView mediante la instalación del API VISA estableció la comunicación USB con el microprocesador Arduino.

- **Módulo Receptor Wifi – Trasmisor Lifi**

Este módulo al igual que el anterior se constituyó con un microprocesador Arduino Uno conectado a una tarjeta transceiver NRF24L01 pero ahora programados para realizar la recepción de RF (Receptor Wifi). La segunda parte de este módulo estuvo compuesto por una matriz de diodos que fueron los encargados de enviar la información codificada como pulsos de luz de vuelta al usuario (Trasmisor Lifi).

Igual que en el primer módulo la programación del microcontrolador en conjunto con la tarjeta transceiver NRF24L01 se encargaron de automatizar el de inicio y fin de la comunicación de Radio Frecuencia entre los módulos. Los caracteres recibidos por wifi fueron procesados y codificados para poder ser reenviados al usuario mediante la matriz de diodos led. Estableciéndose una comunicación de enlace descendente de datos vía Lifi.

### ***3.2.3. Diseño del Hardware del prototipo del sistema híbrido Wifi – Lifi***

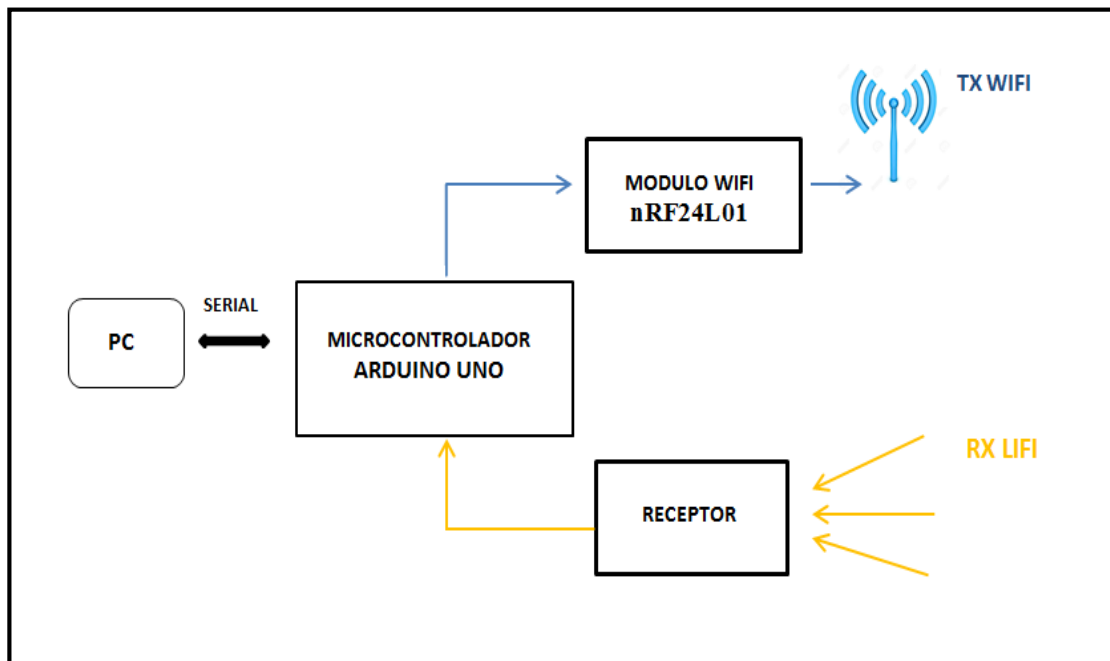
Ya determinado los requerimientos necesarios para la construcción de nuestro prototipo híbrido wifi-lifi en un ambiente home procedimos a diseñar cada módulo que conformaba nuestro sistema.

#### ***3.2.3.1. Módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi***

En el gráfico 2-3 se muestra el diagrama de bloques que describen al módulo Emisor Wifi – receptor Lifi, que iniciaba la transmisión solicitando al usuario el ingreso de caracteres a través de una interfaz amigable desarrollada en Labview conectado al puerto serial mediante los API VISA. Los datos ingresados eran mostrados en pantalla para posteriormente ser codificados y procesados en la tarjeta arduino UNO siendo luego enviados al bloque nRF24L01 que representaban nuestro trasmisor Wifi. Y al mismo tiempo el detector de luz tenía que estar en constante verificación de que le hayan llegado caracteres a través de la luz visible.

Cuando una corriente constante se aplica a una bombilla de luz LED un flujo constante de fotones son emitidos desde el bulbo que se observa como la luz visible. Si la corriente se varía lentamente la intensidad de salida de la luz se atenúa de arriba hacia abajo. Debido a que las bombillas LED son dispositivos semiconductores la corriente en la salida óptica, puede ser

modulada a velocidades extremadamente altas que puede ser detectada por un dispositivo foto detector y convertida de nuevo a la corriente eléctrica. La modulación de la intensidad es imperceptible para el ojo humano, y por lo tanto la comunicación es tan transparente como RF.



**Gráfico 1-3.** Diagrama de bloques del prototipo emisor Wifi receptor Lifi

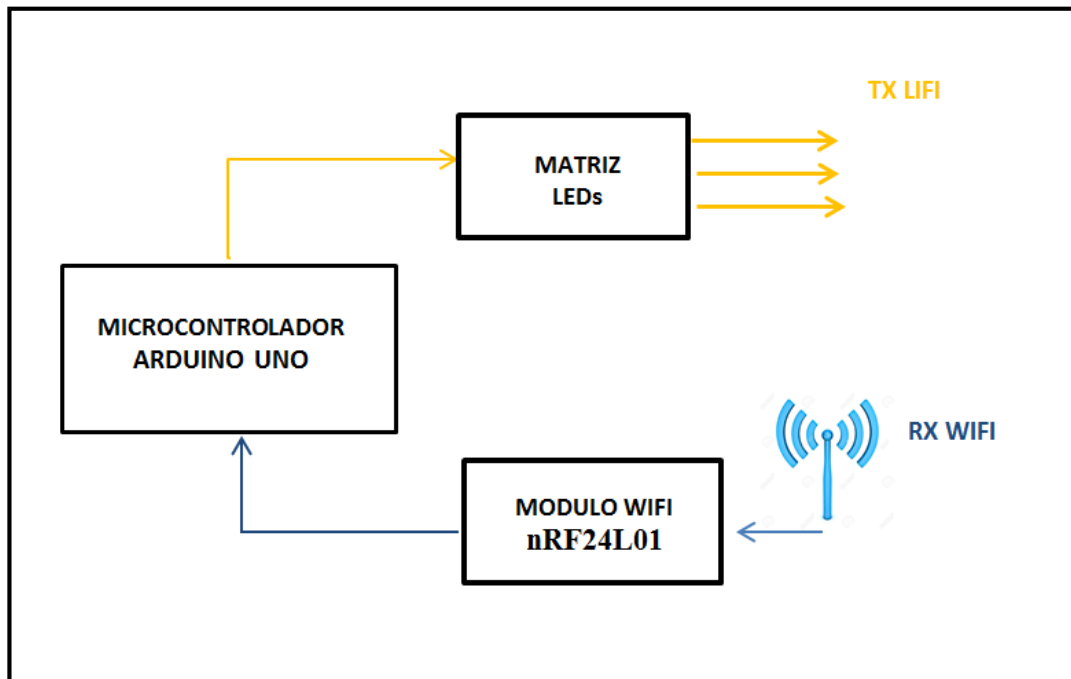
Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

La interfaz del módulo se la programó para que nos ofrezca dos alternativas para el ingreso de caracteres a ser transmitidos. La primera forma de ingreso fue manualmente y la segunda era automáticamente enviando caracteres aleatorios.

### 3.2.3.2. Módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi

En el gráfico 3-3 se muestra al igual que en el caso anterior el diagrama de bloques del emisor Li-fi - receptor WiFi, que como su nombre lo indica su primera misión fue el de recibir los caracteres que le llegaban a través del canal de RF.

Al detectar que los caracteres detectados eran válidos, se los almacenaba para codificarlos y prepararlos para ser enviados como pulsos de luz a través de los diodos led. Estos diodos led al ser utilizados como transmisores de luz visible, sólo pueden conseguir técnicas de modulación directa por intensidad.



**Gráfico 2-3** Diagrama de bloques del prototipo emisor Lifi receptor Wifi











**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

Se puede observar en el gráfico 3-3 la estructura en bloques del módulo emisor Lifi - receptor Wifi compuesto por un micro controlador, la matriz led encargada de iluminar y a su vez transmitir información y el nRF24L01 que receptaba los caracteres que le llegaban por el canal de RF.

#### 3.2.4. Selección de dispositivos para el prototipo del sistema híbrido Wifi –Lifi.

A continuación en la tabla 3-3 se detalla las principales características de algunas tarjetas de desarrollo: Arduino Uno, Arduino Nano, Arduino Leonardo entre otras.

**Tabla 3-3** Clasificación de las tarjetas Arduino

										
<b>Fabricante</b>	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Netduino	Texas Instruments	Fundación Raspberry Pi
<b>Modelo</b>	Pro Mini	Nano	Uno	Mega / Mega 2560	Leonardo	Micro	Due	Netduino 2	Stellaris Launchpad LM4F120	Raspberry Pi Mod.B
<b>Microcontrolador</b>	AVR Atmega 168 ó 328 8bits	AVR ATmega 168 ó 328 8bits	AVR ATmega 328 8bits	AVR ATmega2560 8bits	AVR ATmega 32u4 8bits	AVR ATmega 32u4 8bits	ARM SAM3X8E Cortex-M3 32bits	ARM STMicro STM32F2 Cortex-M3 32bits	ARM LM4F120H5QR Cortex-M4 32bits	ARM Broadcom BCM2835
<b>Frecuencia</b>	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	84Mhz	120Mhz	80Mhz	700Mhz
<b>Memoria RAM</b>	2KiB	2KiB	2KiB	8KiB	2.5KiB	2.5KiB	96KiB (64+32KiB)	60KiB	32KiB	512MiB
<b>Memoria EEPROM</b>	1KiB	1KiB	1KiB	4KiB	1KiB	1KiB	0	0	-	-
<b>Memoria FLASH</b>	16 ó 32KiB	16 ó 32KiB	32KiB	128 ó 256KiB	32KiB	32KiB	512KiB	192KiB	256KiB	-
<b>Pines digitales entradas/salidas</b>	14/14	14/14	14/14	54/54	20/20	20/20	54/54	20/20	43/43	8/8
<b>Tensión/corriente pines digitales</b>	3.3v ó 5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	3.3v 3~15mA (130mA entre todos)	3.3v~5v 25mA (125mA entre todos)	5v	-
<b>Pines analógicos entradas/salidas</b>	6/0	8/0	6/0	16/0	12/0	12/0	12/2	6/0	-	-
<b>Tensión/resolución pines analógicos</b>	3.3v ó 5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	3.3v 12bits (4096 valores)	5v 12bits (4096 valores)	-	-
<b>Pines con interrupción externa</b>	2	2	2	6	2	2	-	-	-	-
<b>Pines PWM</b>	6	6	6	15	7	7	12	6	-	-
<b>Conexiones Serial / UART</b>	1	1	1	4	1	1	4	4	8	Si
<b>Conexiones I2C / TWI</b>	1	1	1	1	1	1	2	1	4	Si
<b>Conexiones ISP / ICSP</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	-	Si
<b>Conexión USB</b>	No (necesita adaptador externo)	Si	Si, USB-B	Si, USB-B	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, Nativa, MicroUSB	Si, MicroUSB
<b>Conexión USB de depuración</b>	No	No	No	No	No	No	Si, MicroUSB	Si, MicroUSB	Si, MicroUSB	-
<b>Conexión Bluetooth</b>	No	No	No	No	No	No	No	No	No	-
<b>Conexión WiFi</b>	No	No	No	No	No	No	No	No	No	-
<b>Conexión Ethernet</b>	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
<b>Conexión USB Host</b>	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si	Si
<b>Almacenamiento por SD</b>	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
<b>Corriente en el pin de 5v</b>	-	500mA	500~800mA	500~800mA	500~800 mA	500mA	800mA	-	-	-
<b>Corriente en el pin de 3.3v</b>	-	50mA	50mA	50mA	50mA	50mA	800mA	-	-	-
<b>Voltaje de alimentación por el USB</b>	3.3v ó 5v (sin usb)	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v	5v
<b>Voltaje de alimentación recomendado por el Jack</b>	3.35 -12 V (modelo 3.3V) ó 5 - 12 V (modelo 5V)	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7~12v	7.5~9v	-	-
<b>Voltaje de alimentación límite por el Jack</b>	-	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	6~20v	-	-	-

Fuente: <http://nosinmiarduino.blogspot.com/2014/07/tipos-de-placas-arduino.html>

### 3.2.5. *Arduino UNO*

Por la simplicidad, flexibilidad y adaptación a los requerimientos técnicos de nuestro sistema híbrido wifi.-Lifi la tarjeta de desarrollo escogida para utilizarse fue Arduino UNO. Que estuvo presente tanto en el módulo de transmisión como en el módulo de recepción del sistema.

Arduino que es una empresa de hardware y software, proyecto y comunidad de usuarios que diseña y fabrica hardware de código abierto de computadora, software de código abierto y equipos basados en microcontroladores para construyendo dispositivos digitales y objetos interactivos se pueda detectar y controlar dispositivos físicos, nos proporciona un entorno de desarrollo integrado (IDE) basado en un lenguaje de programación denominado Processing, que también soporta los lenguajes C y C ++. Sus especificaciones de diseño de hardware están abiertos, los tableros de Arduino pueden ser producidos por cualquier persona.

Por eso se lo tomó en cuenta para nuestro sistema híbrido Wifi-Lifi ya que arduino UNO es una herramienta poderosa a la hora de recolectar todo tipo de información en cualquier lugar y condición, procesar, comprobar, y desde luego el transportar dicha información de manera rápida y efectiva hasta el lugar de almacenamiento para que pueda ser verificada y analizada según los requerimientos. Tanto en la comunicación por radio frecuencia como en la comunicación por luz infrarroja nos permitió recaudar información en tiempo real ya que posee una variedad de capacidades que nos permite explotar su productividad, visualización y facilidad de interconectarse con PCs.

Arduino Uno es un tablero de microcontrolador basado en el ATmega328P. Contiene todo lo necesario para soportar una comunicación; simplemente hay que conectarlo a un ordenador con un cable USB o con un adaptador AC-DC o batería para empezar. "Uno" fue elegido para marcar el lanzamiento de Arduino Software (IDE) 1.0. El tablero Uno y la versión 1.0 de Arduino Software (IDE) fueron las versiones de referencia de Arduino, ahora evolucionaron a versiones más recientes. La placa Uno es la primera de una serie de placas USB Arduino, y el modelo de referencia para la plataforma Arduino; para una lista extensa de tableros actuales, lo podemos observar en el gráfico 4-3.

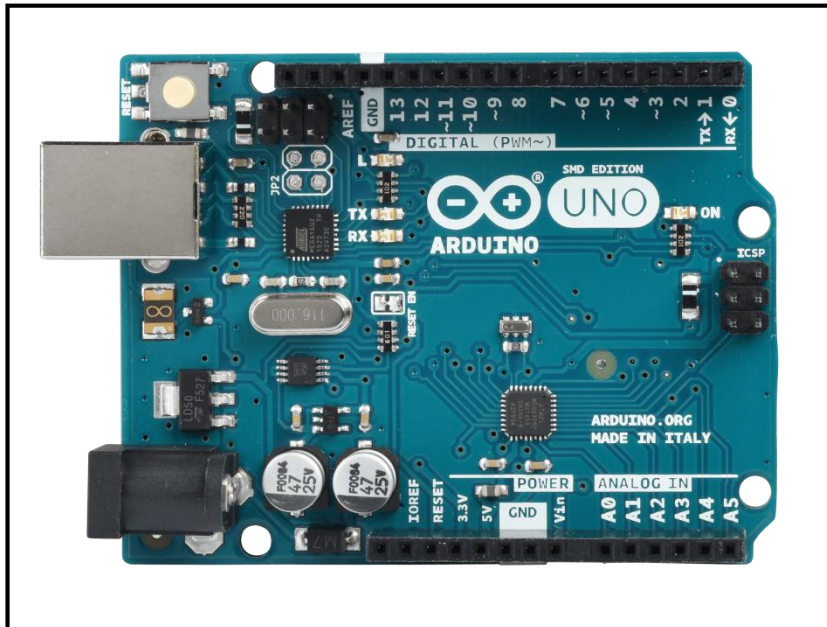


Gráfico 3-3 Tarjeta Arduino Uno

Fuente: <https://roboteshop.com/shop/arduino/arduino-board/arduino-uno>

Y en el gráfico 5-3 se observa una descripción detallada de los componente que forman parte de la tarjeta arduino UNO.

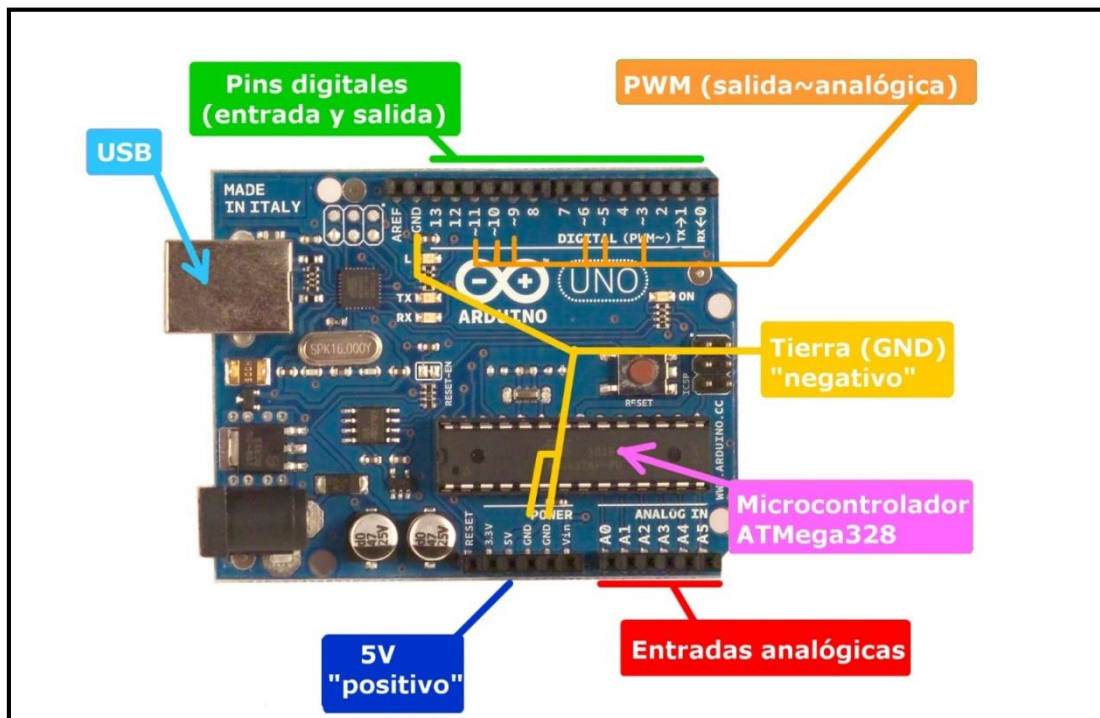


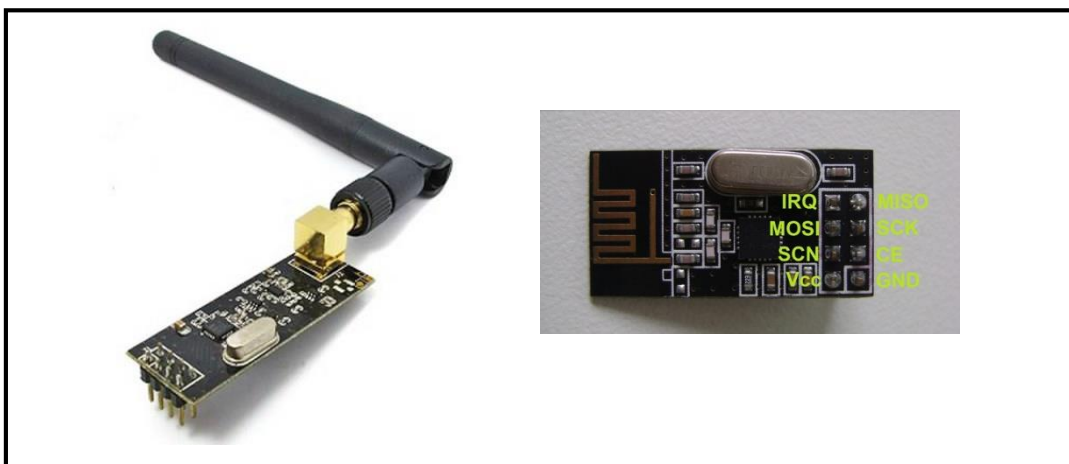
Gráfico 4-3. Descripción de elementos de un Arduino Uno

Fuente: <https://roboteshop.com/shop/arduino/arduino-board/arduino-uno>

- **Pines Digitales.** Tiene 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM).
- **Pines Analógicos.** posee 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio.
- **Conector de alimentación.** Este se lo suele utilizar para alimentar la placa Arduino sino no se ha conectado a un puerto USB. Los voltajes de alimentación están entre los 7 y 12 V.
- **Botón Reset.** Resetea al micro controlador es decir lo pone en cero.
- **Pines GND y 5V.** Con estos pines podemos proporcionar a otros circuitos externos a la tarjeta Arduino un voltaje de +5V y GND.
- **Pin 13 LED.** Esta determinado como salida se lo utiliza para ejecutar los primeros programas, LED ocupado para la depuración.

### 3.2.6. *Los Módulos de Radio NRF24L01*

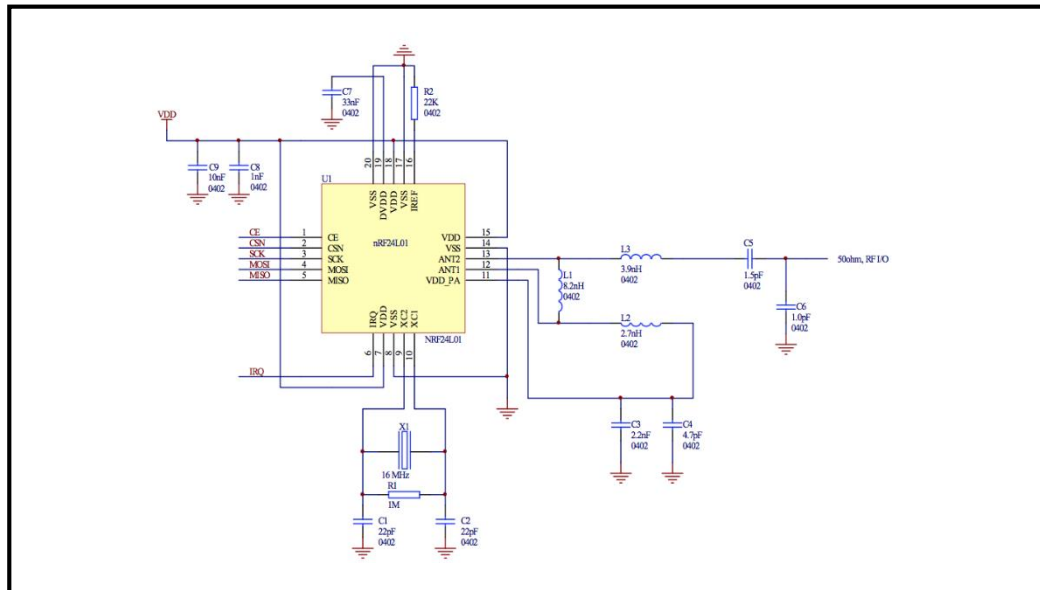
Se utilizaron dos módulos nRF24L01 junto con Arduino para establecer la comunicación RF debido a que este circuito se controla mediante un puerto SPI y permite enviar y recibir datos digitales en la frecuencia de 2.4Ghz que es a la misma frecuencia que trabaja la tecnología Wifi. Este dispositivo está basado en un nuevo transceiver de 2,4GHz de Nordic Semiconductor, el NRF24L01 posee una variedad de características, una de ellas es su consumo ultra bajo (ULP). El chip Nordic nRF24L01 integra un completo transceiver de 2.4Ghz, Sintetizador RF, y lógica como el mejorado ShockBurst™, que es un acelerador de protocolo por hardware para comunicación por SPI con micro controlador. En el gráfico 6-3 se muestra la forma física del módulo y en el gráfico 7-3 el diseño interno con sus componentes del módulo nRF24L91.



**Gráfico 5-3.** Módulo nRF24L91

**Fuente:** <https://www.promotec.net/producto/nrf24l01/>





**Gráfico 6-3.** Esquema del módulo nRF24L91

**Fuente:** <https://sites.google.com/site/angmuz/home/proyecto-32-3-arduino>

### Especificaciones Técnicas

- La alimentación del módulo está entre los 1.9 V a 3,6 V
- Su puerto IO se alimenta de 0 a 3.3 V (puede tolerar hasta 5V)
- La tasa de transmisión viene dada por + 7dB
- Su sensibilidad de recepción es de < -90 dB
- La transmisión en zonas despejadas puede llegar a los 250 m
- Sus dimensiones son de 15x29mm

### Principales Características

- Se considera como un transceptor IC
- Tiene 3 velocidades de datos que puede ser: 250Kbps, 1Mbps y 2 Mbps
- Trabaja en la banda ISM de 2,4 GHz, no posee licencia
- La energía que consume es considerablemente baja
- Compatible con todas las series nRF24L Nordic
- Bajo costo
- Manejo de paquetes automáticos
- Antena incorporada de 2.4Ghz.
- tienen 125 canales

Aplicaciones:

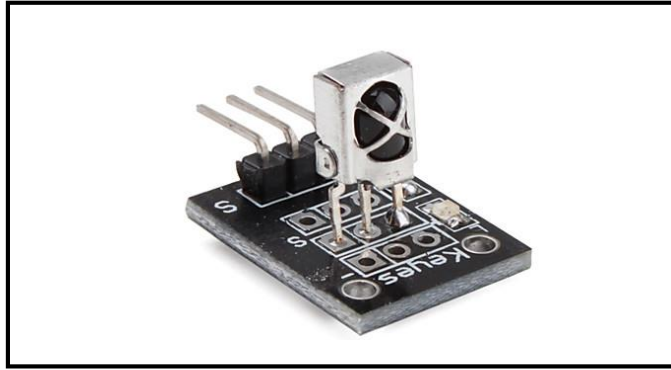
- Control de periféricos de las computadoras
- Para controles remoto Advanced Media Center
- Sensores
- En electrónica de consumo en mandos de RF
- Juegos
- Automatización

Estos módulos nos ofrecen comunicación multipunto y de salto de frecuencia para satisfacer las necesidades de comunicación, viene con hardware incorporado, detección de errores CRC, control de direcciones de comunicación multipunto. Se los puede conectar directamente a una variedad de micro controladores, la programación de software es muy conveniente. Existen dos librerías básicas que nos permiten trabajar con los módulos NRF2401 en Arduino que son la NRF 24 y la MIRF.

### **3.2.7. Foto Transistor**

Para la detección de la señal modulada como pulsos de luz se utilizó un foto transistor TEKT5400S, debido a que nos ofrecen una respuesta inmediata al detectar cualquier tipo de radiación óptica, incluyendo la luz visible, infrarroja, ultra violeta, etc. y las convierten en señales eléctricas. En nuestro prototipo al ser la luz el medio de transporte de la información entre el trasmisor y el receptor debían de tener necesariamente una línea de visión directa sin obstáculos para no interrumpir la transmisión. Se debió además que considerar que su haz de luz es susceptible a ser reflejado por elementos reflectantes como por ejemplo los espejos.

Su alcance de trasmisión fue limitado por lo que su distancia de comunicación vino especificada, por lo general es inferior a los 5m. La distancia de la trasmisión por lo tanto estuvo estrictamente ligado al ángulo de emisión, reduciendo considerablemente a medida que nos desviábamos de una visión frontal. Gráfico 8-3.



**Gráfico 7-3.** Foto Transistor

**Fuente:** <http://teslabem.com/modulo-tsop.html>

### **Características:**

- Es ligero y muy rápido en decodificar las señales IR y además usa muy poca memoria.
- Aunque no decodifica todo, acepta las normas de NEC, Panasonic y compatibles. Lo que nos da un 85% de probabilidades de que reconozca el mando.
- Funciona por interrupciones, lo que la hace muy ligero y rápido
- Es de los pocos que es capaz de decodificar las señales simultáneas de varios mandos diferentes, con diferentes protocolos cada uno.

La transmisión de información en el prototipo al igual que en cualquier otra transmisión común debió cumplir ciertas normas como el tiempo de duración, forma que tiene los pulsos, distribución de la información y otros más, parámetros que debieron ser conocidos tanto por el transmisor como por el receptor para así no tener dificultades al momento de la comunicación.

En cuanto a los protocolos acogidos como estándar no es uno solo. Cada fabricante se ha encargado de imponer los suyos propios. Por ejemplo está el RC-5 y RC-6 de la compañía Philips, SIRC que pertenece a Sony, y un tercero tenemos el protocolo NEC creado por la empresa japonesa Nippon Electronic Company, entre varios otros que se caracterizan por su propio estándar.

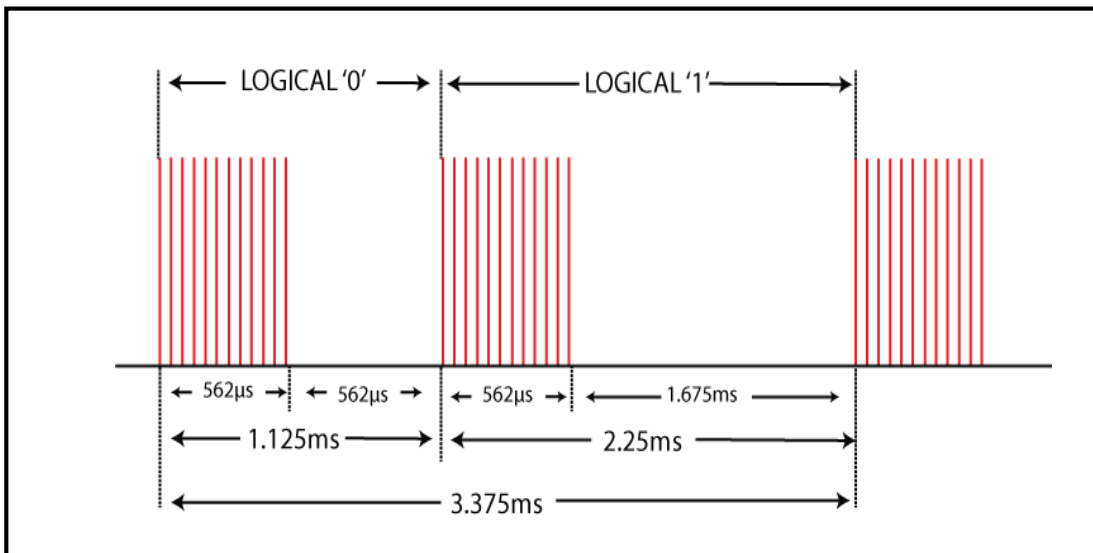
Así también, es necesario indicar que el mensaje nunca se transmitió directamente como un pulso, si no que se mezcla conjuntamente con una señal portadora. Con el propósito de mejorar las condiciones de rechazo al ruido o a cualquier luz ambiental por lo tanto fue necesario enviarla modulada en una onda portadora. Según el protocolo que se emplea será la frecuencia

de onda portadora pero en nuestro caso variaba en el orden de los 36-50 kHz, típicamente se ocupa la de 38 kHz.

Para nuestro prototipo se ocupa el protocolo NEC que se acopla sin dificultades a nuestra tarjeta Arduino, emplea una onda portadora de 38 kHz y modulación por distancia de pulsos (PDM Pulse Distance Modulation).

La onda portadora está distribuida de tal manera que el periodo dura  $26\mu\text{s}$ , y se distingue entre un valor bajo (0) y un valor alto (1) por la duración que tiene los pulsos. Gráfico 9-3.

- Logical 0 – Un pulso de  $562.5\mu\text{s}$  seguido por un espacio de  $562.5\mu\text{s}$ .
- Logical 1 – Un pulso de  $562.5\mu\text{s}$  seguido por un espacio de  $1.675\text{ms}$ .

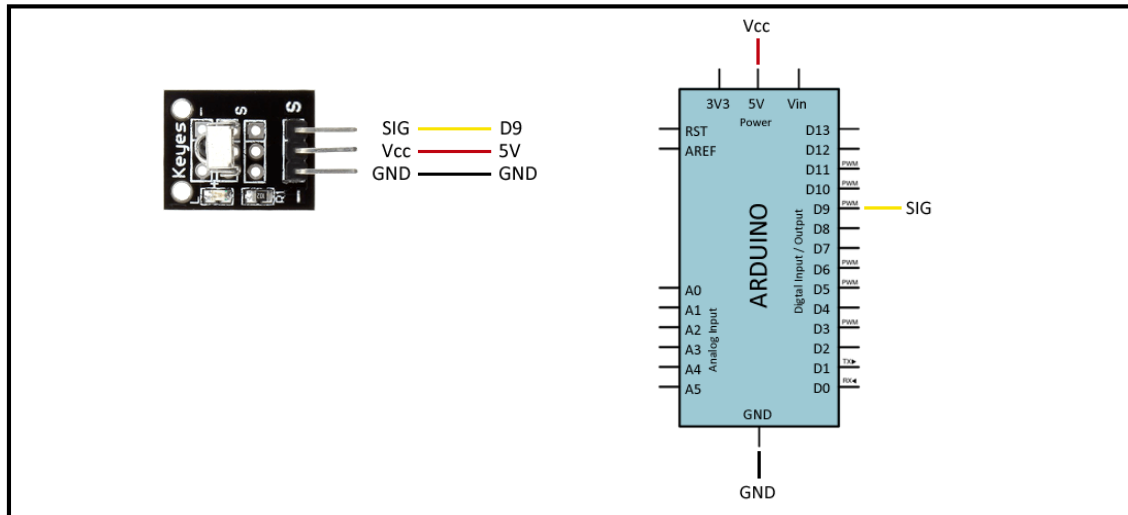


**Gráfico 8-3.** Protocolo NEC para el envío de 0 lógico y 1 Lógico

Fuente: <https://microstronic.blogspot.com/2015/06/protocolo-nec-pic-ir-control-remoto.html>

### 3.2.7.1. Esquema de conexiones del foto transistor con el micro Arduino UNO

La conexión de los terminales entre el micro Arduino con el foto transistor se la observa en el gráfico 10-3 cada unión se lo representa con un color diferente. El voltaje de alimentación para el foto transistor se lo obtuvo conectándolo respectivamente a los pines de 5V y Vcc de la tarjeta Arduino. De igual forma, se conectó el pin Sig de salida del foto detector hacia el pin D9 programado como entrada digital en la tarjeta Arduino.



**Gráfico 9-3.** Esquema de conexión del receptor de luz con el micro arduino

Fuente: <https://www.prometec.net/nrf2401/>

### 3.2.8. Diodos Led

Los diodos LED utilizados en nuestro proyecto para convertir la energía eléctrica en energía luminosa fueron los de alta potencia específicamente los de 1W, ya que utilizan diseños más completos que incluyen diversas alternativas de ópticas de control del flujo luminoso; este tipo de LED son utilizados principalmente para la iluminación concentrada en aplicaciones exteriores, permitiendo generar amplias posibilidades creativas de diseño y efectos de color.

Además vienen en una gran variedad de tamaños, formas y colores siendo más eficientes energéticamente, por lo que no tienden a calentarse como las bombillas convencionales.

Es básicamente sólo un tipo especializado de diodo, ya que tienen características eléctricas muy similares a un diodo de unión PN. Esto significa que un LED pasará la corriente en polarización directa emitiendo una luz coloreada a una longitud de onda espectral particular, pero bloqueará el flujo de corriente en conexión inversa. Su representación se ve en el gráfico 11- 3.



**Gráfico 10-3.** Diodo led de potencia 1W

Fuente: <http://www.tallerdetecnologia.es/joomla/diodoled>

Algunas características que tienen estos diodos led de alta potencia (1W) utilizados son:

- Vida promedio de 50,000 horas.
- Flujo luminoso de 55 lúmenes.
- Eficacia de 55 lm/W.
- Voltaje de operación de 3-4 Volts de corriente directa.
- Corriente de operación de 350 mA.
- Ángulo de apertura del haz luminoso de 120° sin óptica secundaria
- Bajas pérdidas por disipación de calor.
- Colores blanco, azul y verde fabricados de Nitruro de Galio e Indio (InGaN).

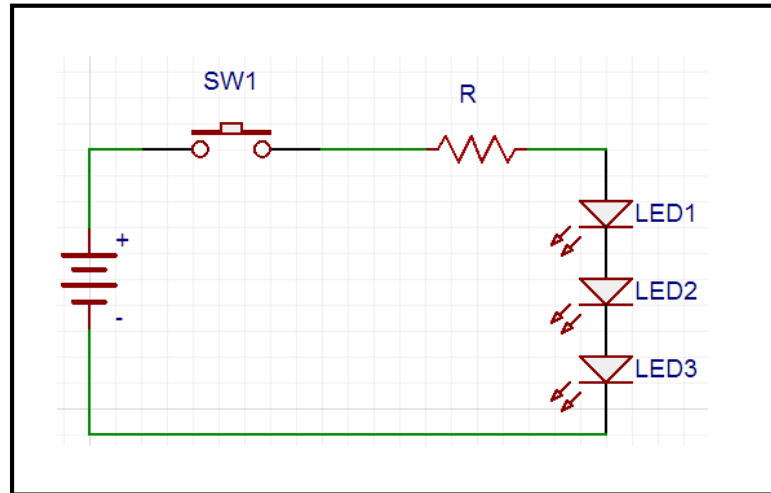
Es de considerar que no todos los tipos de led tienen iguales características por consiguiente su resistencia limitadora son diferentes y por lo tanto se tendrá que hacer un cálculo distinto para cada uno. En la tabla 4-3 se muestra algunas especificaciones para sus distintos colores.

Tabla 4-3 Especificaciones por su color de los diodos led de potencia 1W

Y Colores disponibles	Longitud de onda [nm] / Temperatura de Color [Tc]	Voltaje de Operación [V]		Consumo [W]	Flujo Luminoso [lm]	
		Min	Máx		Min	Máx
R	600-650	2.0	2.6	1.0	35	55
G	490-540	2.0	2.6	1.0	50	70
B	450-500	3.0	3.8	1.0	10	25
Y	550-600	2.0	2.6	1.0	25	45
WW	3000-5000 K	3.0	3.8	1.0	50	80
W	5000-7000 K	3.0	3.8	1.0	70	100

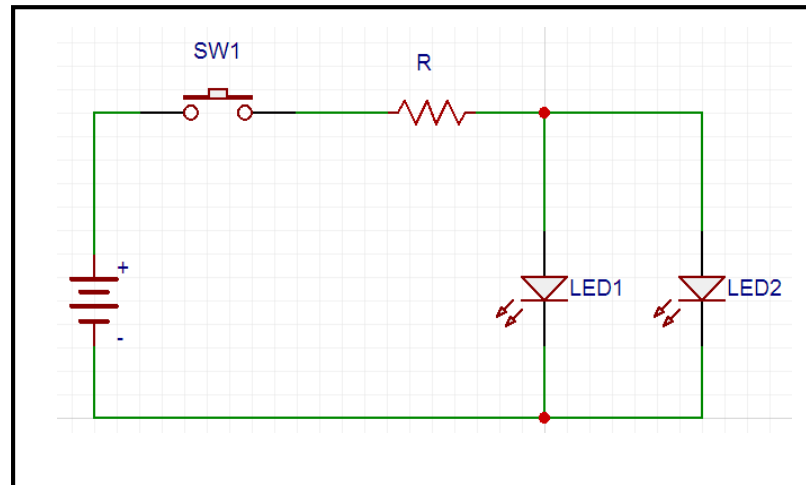
Fuente: <http://www.tallerdetecnologia.es/joomla/diodoled>

Para la estructura de nuestra matriz de leds se combinaron las configuración de los dos tipos serie como se ve en el gráfico 12-3 y paralelo como se observa en el gráfico 13-3 dependió de nuestras necesidades del querer que compartan un mismo voltaje o corriente.



**Gráfico 11-3.** Esquema de un circuito en serie de diodos led

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.



**Gráfico 12-3** Esquema de un circuito en paralelo de diodos led

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

### 3.2.8.1. Cálculo de resistencias limitadoras de corriente necesarias para la matriz de leds

Fue fundamental calcular la resistencia necesaria para el correcto funcionamiento de los diodos leds, para ello nos valimos de la aplicación de la ley de Ohm que se explica a continuación:

$$R = \frac{V_{cc} - V_f}{I_f}$$

En donde:

R representa la resistencia que limita la corriente.

V<sub>cc</sub> viene siendo la alimentación del circuito

V<sub>f</sub> es el voltaje típico que soporta un Led

I<sub>f</sub> es la corriente que soporta el led

Otro aspecto que no se pudo descuidar era el cálculo de la potencia que se disipará en la resistencia. Este parámetro también fue necesario conocerlo a la hora de elegir la resistencia adecuada, que podía ser de una potencia levemente superior a la calculada para prevenir su saturación y daños posteriores. Así aplicamos la siguiente formula:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

El Utilizar resistencias que soportaban una potencia estándar o mayor a la calculada nos permitió tener un mayor margen de trabajo.

A continuación de detalla todo el cálculo efectuado con los valores reales para la construcción de la matriz de diodos leds:

#### Aplicando la ley de OHM

$$I = V/R$$

$$P = V \times I$$



- **Led de Alto Brillo Azul**

**Datos**

Tensión de alimentación: 12 V  
Voltaje de Led: 3.1 V  
Corriente de Led: 20 mA  
Cantidad de leds: 1

Caída de tensión = Voltaje Fuente – Voltaje Led

$$CT = 12\text{ V} - 3,1\text{ V}$$

$$CT = 8,9\text{ V}$$

$$\begin{aligned} R &= V/I \\ &= 8,9/0,02 \\ &= 445\text{ OHM} \sim 470\text{ OHM Valor Comercial} \end{aligned}$$

**POTENCIA**

$$\begin{aligned} P &= \frac{V^2}{R} & \frac{1}{4} &= 250\text{ mW} \\ &= \frac{(8,9)^2}{470} & \frac{1}{2} &= 500\text{ mW} \\ & & 1 &= 1\text{ W} \\ &= 0,168\text{ W (168 mW)} \sim \frac{1}{4}\text{ W} \end{aligned}$$

- **LED en Paralelo**

**Datos:**

Tensión de alimentación: 12 V  
Voltaje del LED: 3.1 V  
Corriente del LED: 20 mA  
Cantidad de LEDs : 2

En este tipo de circuito el voltaje que circula por los leds es igual para todos, es decir cada led necesita 3,1 V, entonces si conectamos 2, 4 o 6 en paralelo usan el mismo voltaje alimentados directamente por la fuente de 3,1 V, mas no así la corriente que dependerá de la cantidad de diodos para que exista mayor o menor circulación de corriente.

$$CT = 12\text{ V} - 3,1\text{ V}$$

$$R = \frac{V}{(I_1 + I_2)}$$

$$= \frac{(8,9)}{(0,02 + 0,02)}$$

$$= 222,5 \text{ OHM} \sim 220 \text{ OHM}$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$P = \frac{(8,9)^2}{(220)}$$

$$= 0,360 \text{ W} = 360 \text{ mW} \rightarrow \frac{1}{2} \text{ W Resistencia}$$

- **Cálculo Leds en Serie**

**Datos:**

Voltaje de alimentación: 12 V

Voltaje de cada led: 3,1 V

Corriente de cada Led: 20 mA

Cantidad de leds: 2

$$CT = 12 - (6,2)$$

$$= 5,8 \text{ V}$$

$$R = \frac{(VA - (V_1 + V_2))}{I}$$

$$= \frac{(12 - (3,1 + 3,1))}{I}$$

$$= \frac{(12 - 6,2)}{0,02}$$

$$= 290 \text{ OHM} \sim 300 \text{ OHM} \quad \text{Valor comercial}$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$P = \frac{(5,8)^2}{300}$$

$$= 0,112 W = 112 mW = \frac{1}{4} W$$

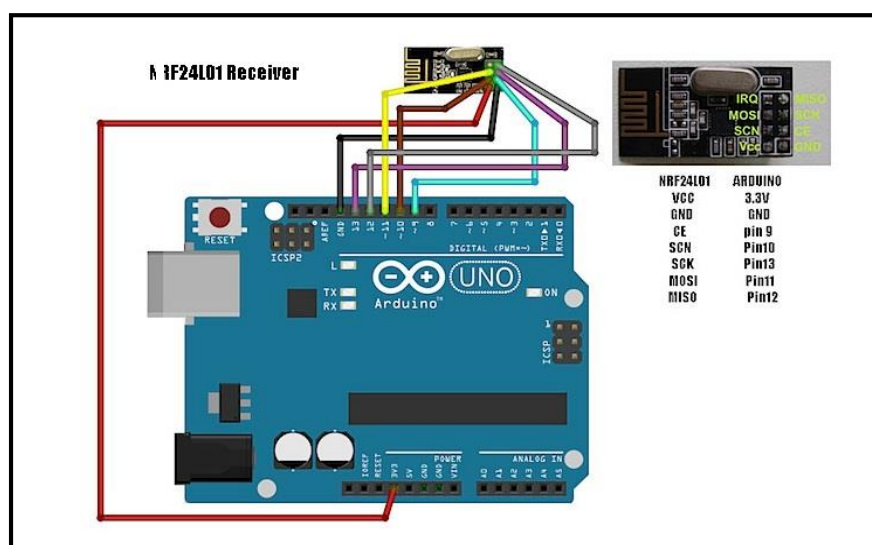
Para la construcción de la matriz de leds del prototipo híbrido se combinó diodos tanto en serie como en paralelo buscando aumentar la potencia de comunicación óptica y así mejorar la distancia de transmisión.

### 3.2.9. Esquema de conexiones de los módulos que integran el sistema híbrido Wifi - Lifi

Luego de describir cada uno de los dispositivos y elementos electrónicos que conforman el prototipo se muestra los diagramas de conexión de cada módulo que fueron diseñados con la ayuda del software Proteus Versión CAD V8.0.

#### 3.2.9.1. Diagrama de conexión del módulo nRF24L01 con la tarjeta Arduino UNO

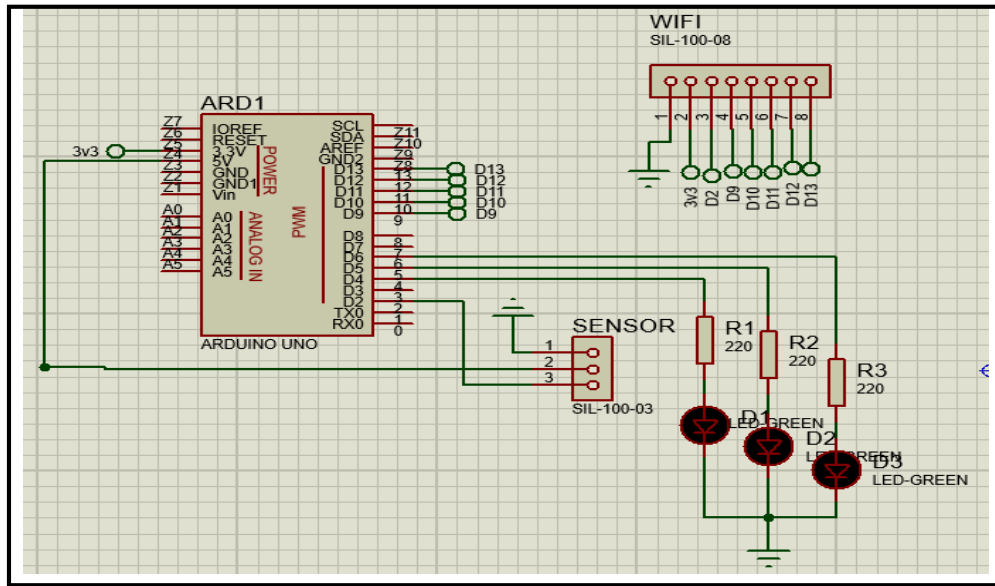
En el gráfico 14-3 se muestra las conexiones de cada uno de los pines del módulo de radio frecuencia nRF24L01 con el micro Arduino UNO que será la misma para los dos casos es decir tanto para el bloque de transmisión Wi-fi como el de recepción Wi-fi ya que estos módulos nRF24L01 actúan como transceptores pudiendo enviar o recibir información y dependerá entonces únicamente de la configuración que se realice en el eskech de Arduino para que se los configure como transmisor RF o receptor RF respectivamente.



**Gráfico 13-3** Diagrama de Conexión Arduino con el modulo nRF24L01

**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

3.2.9.2. Plano electrónico diseñado en ISIS del módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi

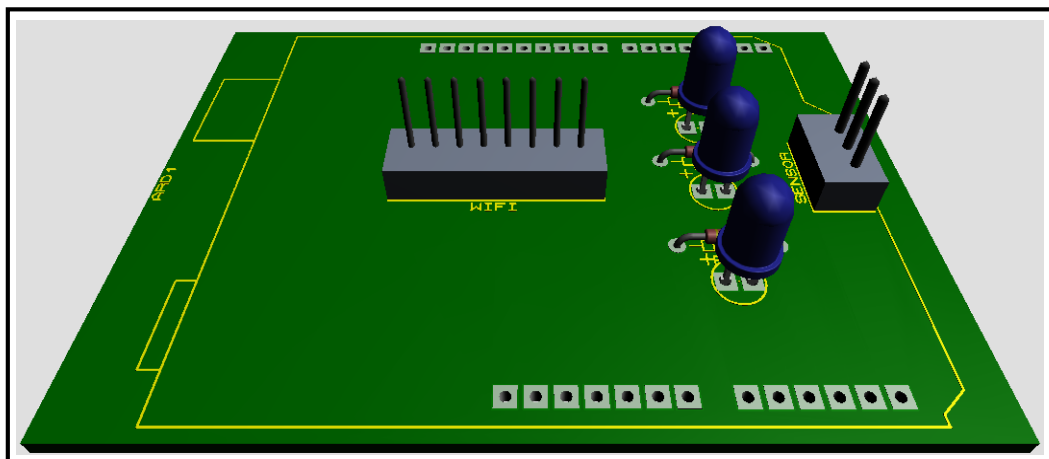


**Gráfico 14-3** Diseño en ISIS del módulo emisor Wifi - Receptor Lifi

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

3.2.9.3. Vista 3D de la placa del módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi

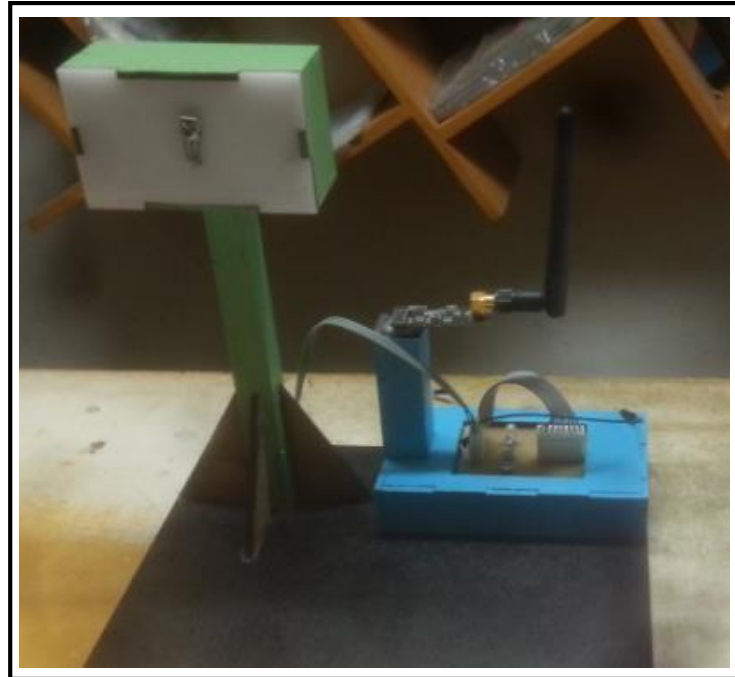
En el gráfico 16-3 se observa al7trasmisor Wifi y Receptor Lifi en tercera dimensión (3D)



**Gráfico 15-3** Vista 3D modulo emisor Wifi - Receptor Lifi

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

#### 3.2.9.4. *Módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi armado y terminado*

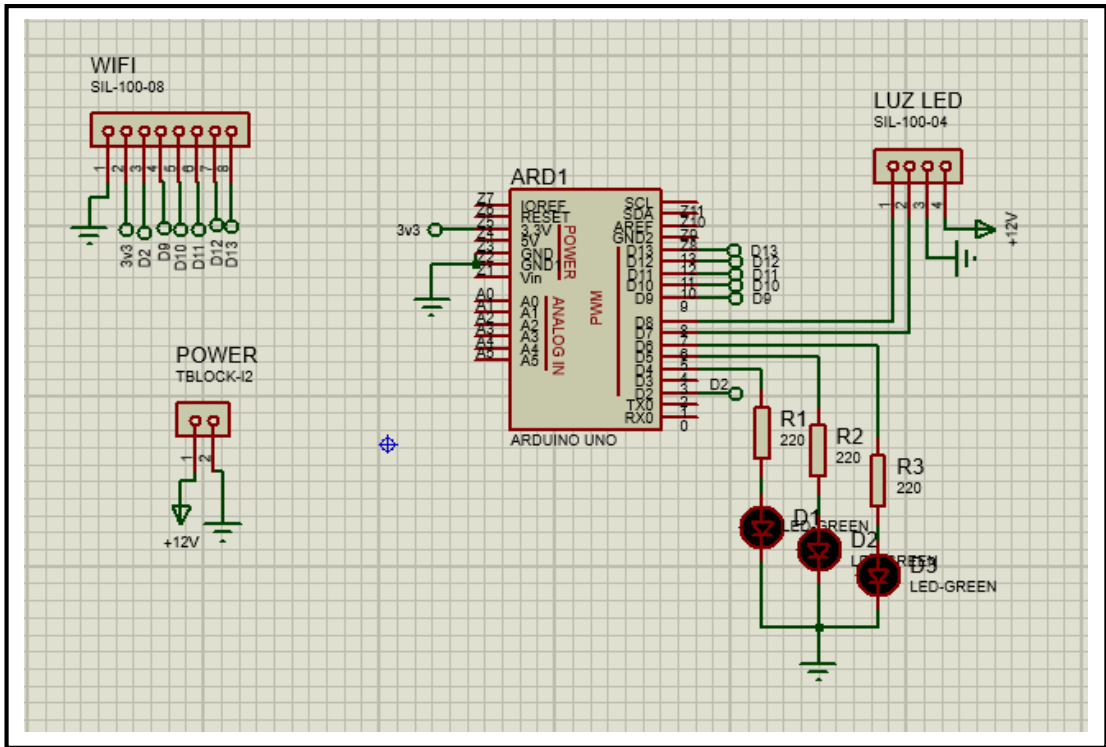


**Gráfico 16-3** Módulo terminado del emisor Wifi - Receptor Lifi

**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

#### 3.2.10. *Plano electrónico diseñado en ISIS del módulo receptor Wifi – Emisor Lifi*

En el gráfico 18-3 se detallan las conexiones del módulo receptor Wi-fi, emisor Li-fi. Se puede apreciar en el esquema que por los pines 7 y 8 son las salidas del micro por los cuales sale la información modulada hacia la matriz de leds para ser transmitida mediante pulsos de luz, mientras que los pines 4,5, 6 están conectados a diodos leds que actúan como indicadores para saber si se está enviando o receptando datos. El led verde me indicara el estado del circuito si está activo o no, el blanco se encenderá cuando exista una transmisión Lifi.

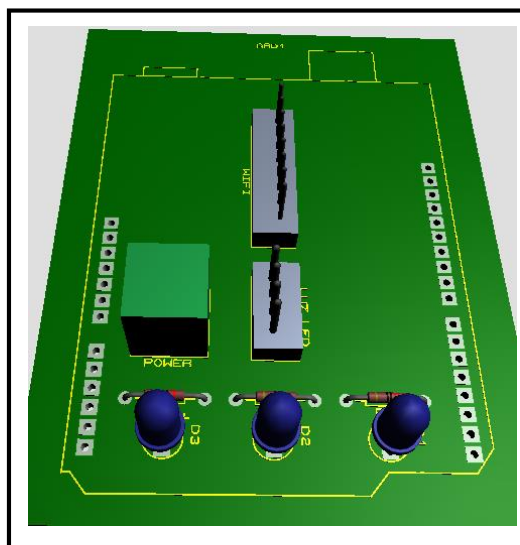


**Gráfico 17-3** Diseño en ISIS del módulo emisor Lifi – Receptor Wifi

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

### 3.2.10.1. Vista 3D de la placa del módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi

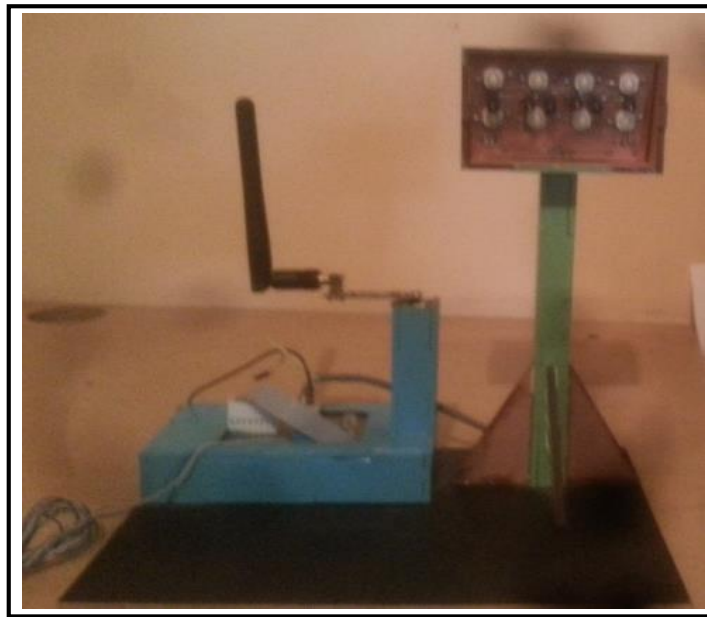
En el gráfico 19-3 se observa al circuito Receptor Wifi – Emisor Lifi en tercera dimensión (3D)



**Gráfico 18-3.** Vista en 3D del módulo emisor Lifi – Receptor Wifi

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

### 3.2.10.2. Módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi armado y terminado

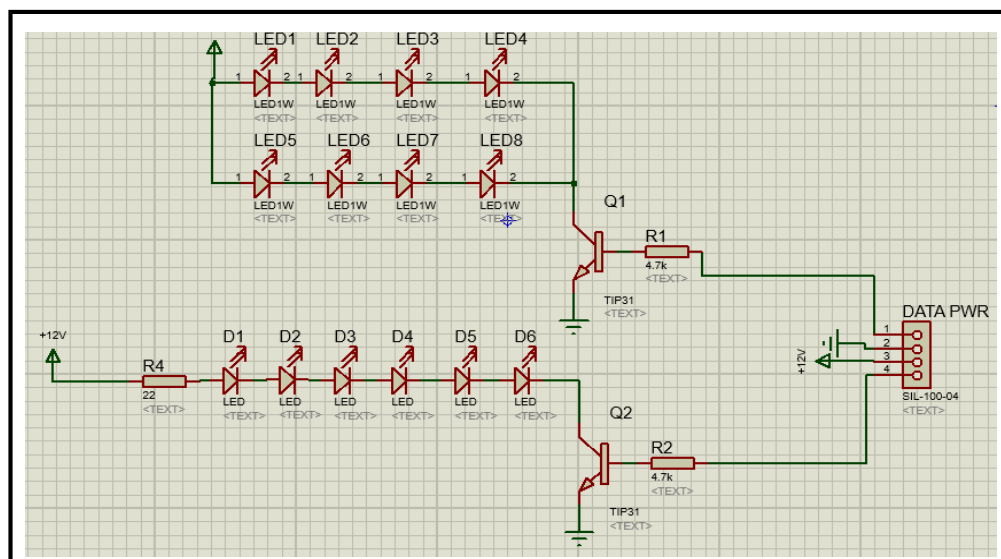


**Gráfico 19-3.** Módulo emisor Lifi – Receptor Wifi terminado

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

### 3.2.11. Plano electrónico diseñado en ISIS de la matriz de Leds

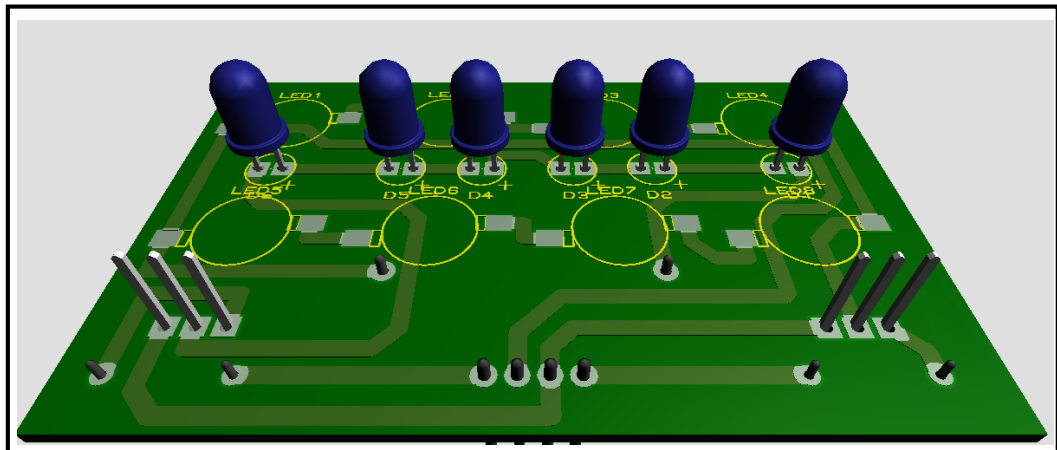
En el gráfico 21-3 se observa el diseño realizado para la matriz de leds que es una combinación mixta de 14 leds que se encienden y apagan a la máxima frecuencia que trabaja el micro. La alimentación del circuito era de 12V.



**Gráfico 20-3** Matriz de diodos leds

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

### 3.2.11.1. Vista 3D de la placa de la matriz de Leds



**Gráfico 21-3.** Vista en 3D Matriz de diodos leds

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

### 3.2.11.2. Matriz de Leds armado y terminado



**Gráfico 22 -3.** Matriz de diodos leds terminado

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

## 3.3. Diseño del software para la realización del prototipo del sistema híbrido Wifi – Lifi

Conforme se analizaron las redes inalámbricas se palpó que con la llegada del internet de las cosas cada vez se hace más indispensable que exista una estrecha relación entre el hardware y software, para poder comunicarse entre ellos. A continuación se describen algunos requisitos mínimos que se considero debía tener el software aplicado en el micro para un eficaz funcionamiento del sistema híbrido.



### **3.3.1. *Requisitos del software del Sistema Híbrido***

Para que exista una correcta optimización de recursos enumeraremos algunos parámetros que se consideraron fundamentales debía de tener el software a utilizar.

- Ser claro y de fácil manejo
- Tener una interfaz amigable para el usuario tanto para el ingreso de datos como para la presentación de resultados transmitidos y recibidos.
- Tener un reset para poder ingresar información nueva cada vez y cuando ya se haya procesado la información inicial.
- Poseer una secuencia de control al momento de receptor y transmitir información
- Visualizar en el monitor los datos enviados y receptados.
- Ser portable

### **3.3.2. *Descripción del software aplicado en los módulos de comunicación***

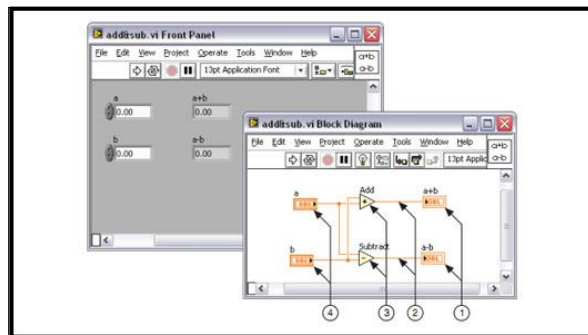
Se utilizó la aplicación Proteus Design para la construcción de los esquemas electrónicos en todas sus etapas, mientras que la programación aplicada para el manejo del sistema Híbrido Wifi- Lifi tenía una programación en LabView para el entorno gráfico que es donde el usuario interactuaba y otra programación abierta de base estructurada para lo que es el control del micro controlador Arduino mediante la ejecución de funciones.

Por lo tanto los software de programación aplicados en nuestro prototipo fueron los siguientes:

**LabView.-** LabVIEW que es un entorno de programación gráfica diseñado para ayudar a ingenieros y científicos a visualizar, crear y codificar sistemas de ingeniería garantizando la calidad de los dispositivos conectados. Combina una sintaxis de programación gráfica para disminuir el tiempo que empleamos para la programación simplificando de esta forma el desarrollo de complicados sistemas con herramientas IP. Su naturaleza intuitiva de programación lo hace muy apetecible por investigadores y profesionales que en la actualidad necesitan un enfoque moderno para el diseño y generación de prototipos:

**Panel Frontal.-** la ventana del panel frontal es la interfaz de usuario para el VI. El panel frontal tiene controles e indicadores, que son los terminales interactivos de entrada y salida, respectivamente, del VI. Los controles e indicadores colocados en el panel frontal se colocan automáticamente en el diagrama de bloques. Consulte el tutorial "Diagrama de bloques" para obtener más información sobre los terminales del diagrama de bloques.

**Diagrama de Bloques.-** El diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico de un programa LabVIEW. El concepto del diagrama de bloques es separar el código fuente gráfico de la interfaz de usuario de una manera lógica y sencilla. Los objetos del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloques. Los terminales del diagrama de bloques reflejan los cambios realizados en sus correspondientes objetos del panel frontal y viceversa. En el gráfico 24-3 vemos algunos indicadores de la interfaz del panel frontal y como se los ve trasladados en el diagrama de bloques.



**Gráfico 23-3.** Panel frontal y bloques de un programa LabVIEW

**Fuente:** <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/environment>

- **Proteus Design Suite**

Este paquete de programación se lo utilizó para el diseño de los esquemas electrónicos, construcción de placas de circuito impreso de nuestros módulos Wifi – Lifi se hizo uso del software Proteus V 8.6 que nos ofrece un entorno amigable y de fácil de manipulación. Es una herramienta adecuada para la ejecución de proyectos de construcción podemos diseñar el esquema electrónico, la placa impresa, depurar errores entre otras. Está compuesto de dos programas que son:

- **ISIS.- (Sistema de Enrutado de Esquemas):** este programa me permite construir los planos electrónicos de los circuitos completos con sus diferentes componentes desde los más básicos hasta microprocesadores para posteriormente ser simulados en tiempo real.
- **ARES (Software de Edición y Ruteo Avanzado).-** recibe la lista completa de dispositivos con sus respectivas conexiones para realizar el diseño de las placas impresas. Asegurando que nuestra placa tenga todas las redes de conexión entre los pines de los dispositivos, cualquier cambio echo en el diseño electrónico automáticamente se ve reflejado en las demás ventanas de Proteus.

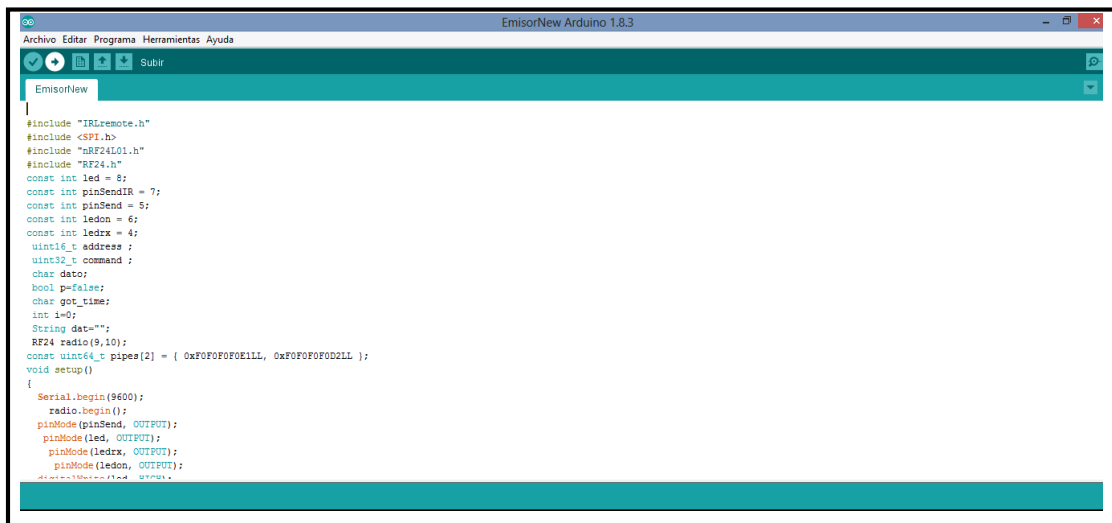
- **Módulo VSM (Sistema Virtual de Modelado).**- mediante esta herramienta se puede construir el ciclo completo de trabajo empezando por el diseño hasta la construcción completa del circuito impreso, puede simular y a la vez al mismo tiempo el funcionamiento del software y hardware para tener un panorama óptimo del comportamiento de cada dispositivo y del código interno de los microprocesadores.

- **IDE Arduino**

El arduino al tener una plataforma de hardware libre nos proporcionó un software de entorno de desarrollo (IDE) escrito en Java que implementa el lenguaje de programación que era ejecutado en la placa del microprocesador.

Se caracterizó por su facilidad al escribir su código y cargarlo al micro. Este se lo puede ejecutar en sistemas operativos como Windows, Linux, Mac OS X. Es de resaltar que el código basado en procesamientos es abierto pudiendo ser compatible en cualquier placa Arduino. Su editor permite algunas funciones útiles al momento de la programación como el copiado, cortado, pegado etc., y por supuesto un compilador encargado de transformar el código escrito en instrucciones legibles.

El sketch es el nombre que Arduino utiliza para un programa. Es la unidad de código que se carga y se ejecuta en una placa Arduino. En el gráfico 24-3 se presenta la interfaz de Arduino IDE al momento que se cargó el código.



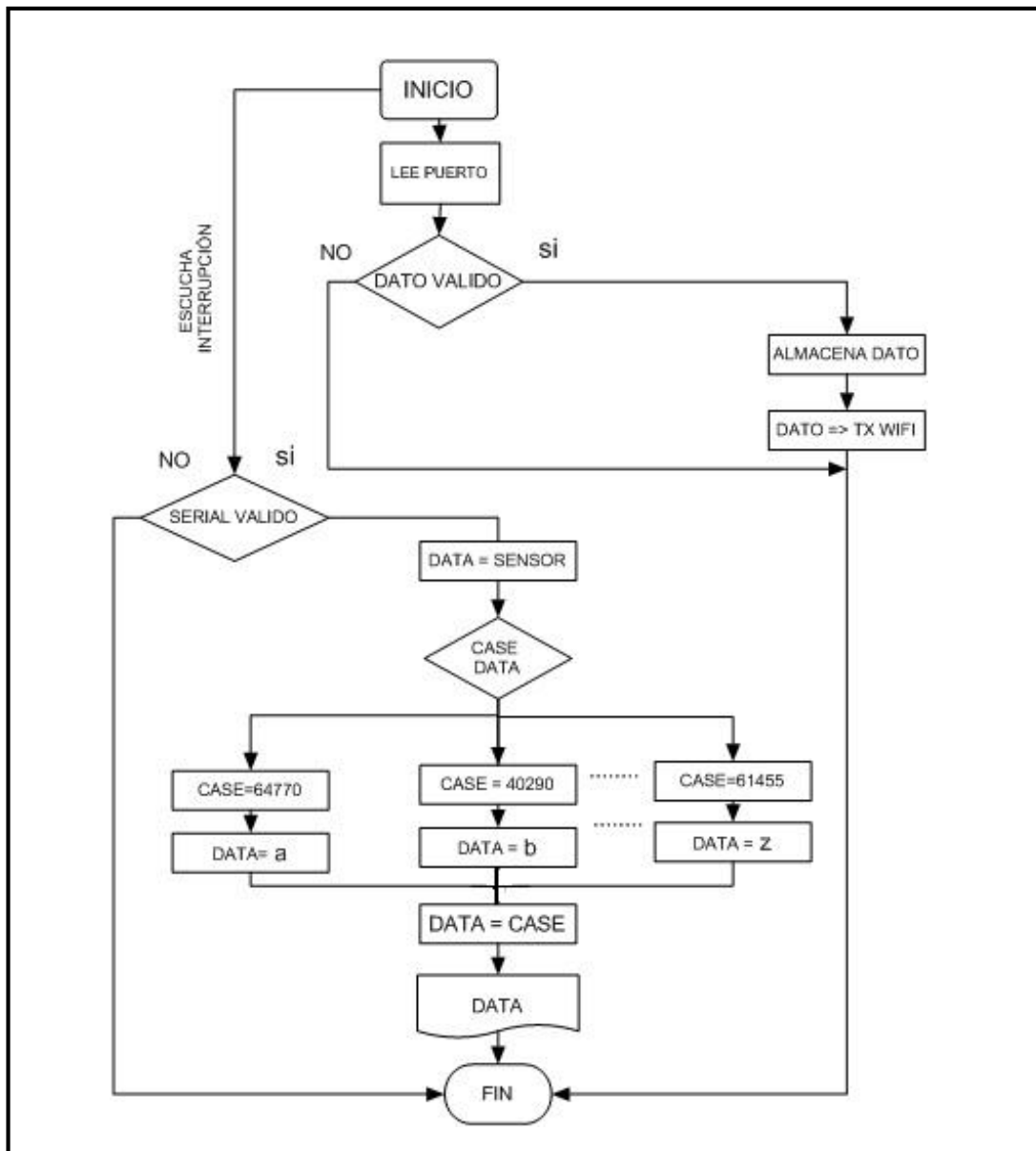
**Gráfico 24-3.** Sketch de la programación Arduino

**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

### 3.3.3. Código de Programación del módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi

La programación realizada en el IDE de Arduino para nuestro modulo se encuentra en el Anexo B la versión utilizada fue la 1.8.3. En el gráfico 25-3 se observa un diagrama de flujo simplificado que describe la programación de funciones y rutinas que desempeñaron cada bloque.

#### 3.3.3.1. Diagrama de Flujo del módulo modulo Emisor Wifi – Receptor Lifi



**Gráfico 25-3.** Diagrama de flujo del módulo Emisor Wifi - Receptor Lifi

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

En el gráfico 25-3 se muestra el diagrama de flujo para el módulo Emisor Wifi Receptor Lifi que se describe a continuación:

- **Inicialización**

Se empieza declarando todas las librerías, constantes y variables que intervienen en el programa.

- **Lee puerto**

Con el inicio de sesión VISA se procedió a la lectura de datos válidos del puerto serial, ingresados a través de la interfaz gráfica de labview.

- **Lazo de repetición indefinido**

Cuando se pulsó la opción enviar se activaron cada una de las funciones programadas, es decir el dato válido obtenido del puerto serial era almacenado y enviado mediante el transmisor Wi-fi que al mismo tiempo empezaba a controlar frecuentemente que al sensor de luz le haya llegado información valedera si era afirmativo inmediatamente imprimía el carácter detectado en la pantalla y finalmente se reiniciaba el modulo para continuar repitiendo el mismo ciclo. Las funciones del primer módulo fueron:

- **Dato valido:** analizaba la información del puerto serial y filtraba dejando pasar solo la información valedera más no datos basura ni datos que no correspondían.
- **Almacenamiento de datos:** se almacenaba en orden secuencial uno a uno los datos validos ingresados
- **Transmisor Wifi:** se encargaba de transmitir los datos almacenados a través de los módulos RF en un determinado tiempo.
- **Data Sensor:** Este cumplía con la función de monitorear en cada instante si le ha llegado información reconocible en forma de pulsos de luz.
- **Case Data:** Se encargaba de comparar a que carácter le corresponde los códigos de información numérica obtenida.

- **Data:** Se imprimía en pantalla los caracteres recibidos con éxito.

### 3.3.3.2. *Bibliotecas ocupadas en el modulo Emisor Wifi – Receptor Lifi*

**IRremote.h:** permite recibir o transmitir códigos de control remoto por infrarrojos en múltiples protocolos como Sony, NEC, Phillips etc., puede guardar los códigos recibidos para posteriormente retransmitirlos. (<https://github.com/shirriff/Arduino-IRremote>).

Esta biblioteca le permite comunicarse con dispositivos SPI, con el Arduino como el dispositivo maestro.

**SPI.h (Serial Peripheral Interface):** Es un protocolo de datos en serie síncrono utilizado por microcontroladores para comunicarse con uno o más dispositivos periféricos rápidamente en distancias cortas.

Con frecuencia SPI es utilizado por otras bibliotecas (como Ethernet) que proporcionan un acceso fácil a un dispositivo SPI específico. ([http://www.pjrc.com/teensy/td\\_libs\\_SPI](http://www.pjrc.com/teensy/td_libs_SPI)).

**nrf24l01.h:** Esta biblioteca fue creada para simplificar el uso del módulo de radio nrf24l01 con los microcontroladores. Proporciona un conjunto relativamente corto de funciones que permiten al usuario aprovechar todas las funciones principales del nrf24l01 sin necesidad de preocuparse por el hardware del radio. Cada una de las definiciones de comandos está en Hexadecimal. (<http://www.arduino-libraries.info/libraries/rf24>).

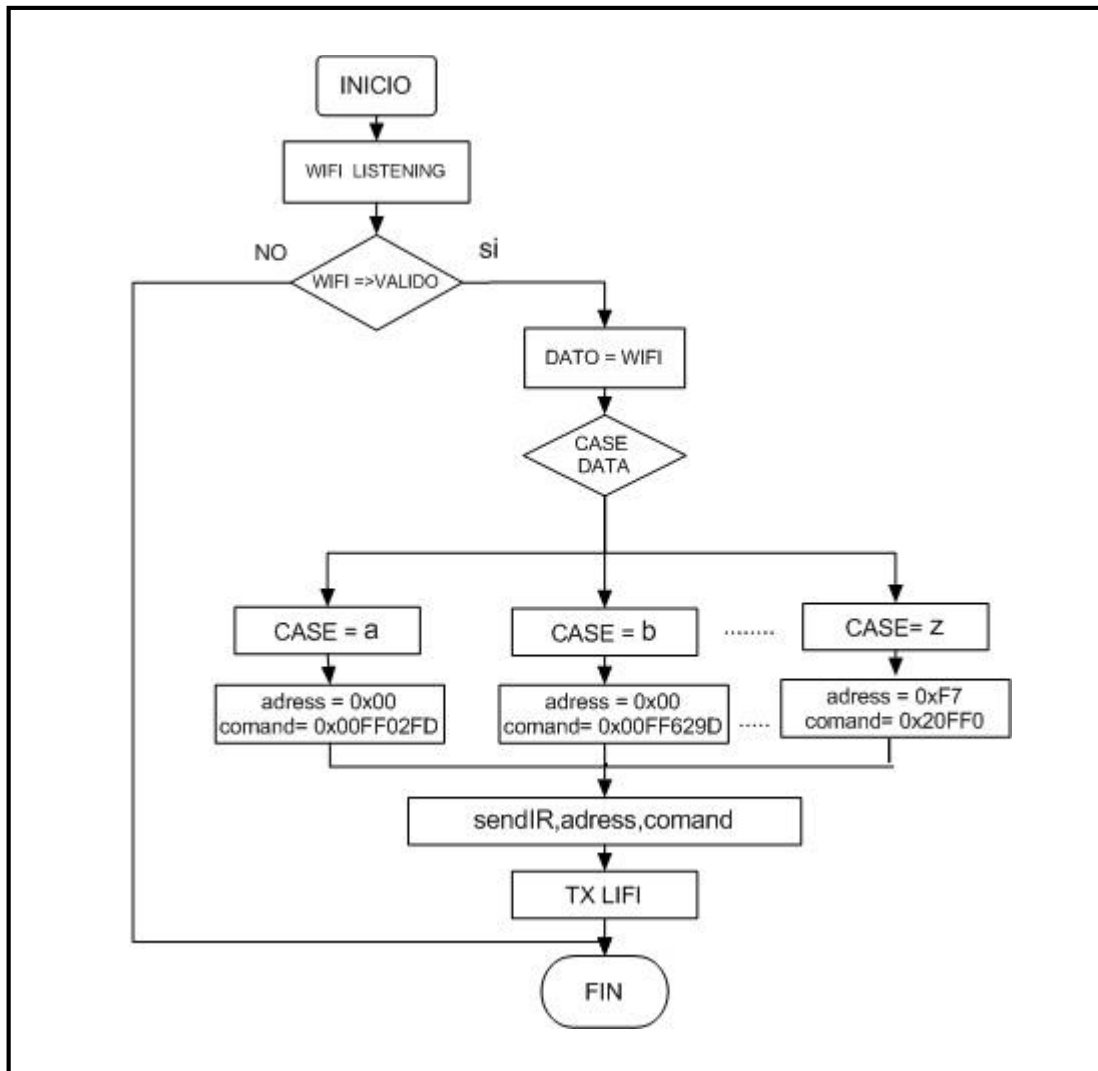
**RF24:** es una de las librerías más útiles para simplificar el uso de una radio NRF24L01. Esta clase implementa una capa de red OSI usando radios nRF24L01 (+) impulsadas por la nueva bifurcación optimizada de la biblioteca RF24. ([http://tmrh20.github.io/RF24/RF24\\_8h](http://tmrh20.github.io/RF24/RF24_8h)).

### 3.3.4. *Software para el modulo Emisor Lifi – Receptor Wifi*

Al igual que en el módulo anterior la programación para el modulo que emite Lifi y recibe Wifi fue realizada en el IDE de Arduino versión 1.8.3 y así mismo se presenta su diagrama de flujo con su respectiva explicación de cada función o rutina presentes. Su programación total se adjunta en el anexo C.

#### 3.3.4.1. *Diagrama de Flujo del módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi*

En el gráfico 26-3 se muestra el diagrama de flujo para el módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi que se describe a continuación:



**Gráfico 26-3.** Diagrama de Flujo del módulo Emisor Lifi Receptor Wifi

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

En el gráfico 26 - 3 se observa el diagrama de flujo para el módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi que se describe a continuación:

- **Inicialización**

Igual que en el caso anterior se declararon todas las librerías, constantes y variables ocupadas.

- **Lazo de Repetición Indefinida**

Cuando el receptor Wifi detectaba la presencia de datos válidos, estos eran almacenados y codificados para poder ser reenviados a través del trasmisor Lifi. Reiniciandose de igual forma

las rutinas para continuar con el mismo ciclo. La descripción de las funciones del segundo módulo se detalla a continuación:

- **Wifi listening:** se encargaba de detectar algún carácter enviado por el trasmisor WIFI.
- **Dato valido:** Filtraba la información valedera de otra que no correspondía.
- **Almacenamiento de Datos:** almacenaba secuencialmente los caracteres que eran llegados.
- **Case Data:** asignaba a cada carácter recibido una dirección y código de identificación único, para luego de ser modulado y enviado como pulso de luz poder recuperarlo en forma de código binario.
- **Trasmisor Lifi:** luego de que al carácter se le asignó una dirección y un código de identificación individual el trasmisor Lifi procedía a reenviarlo por el canal de luz hacia el usuario que empezó la comunicación.

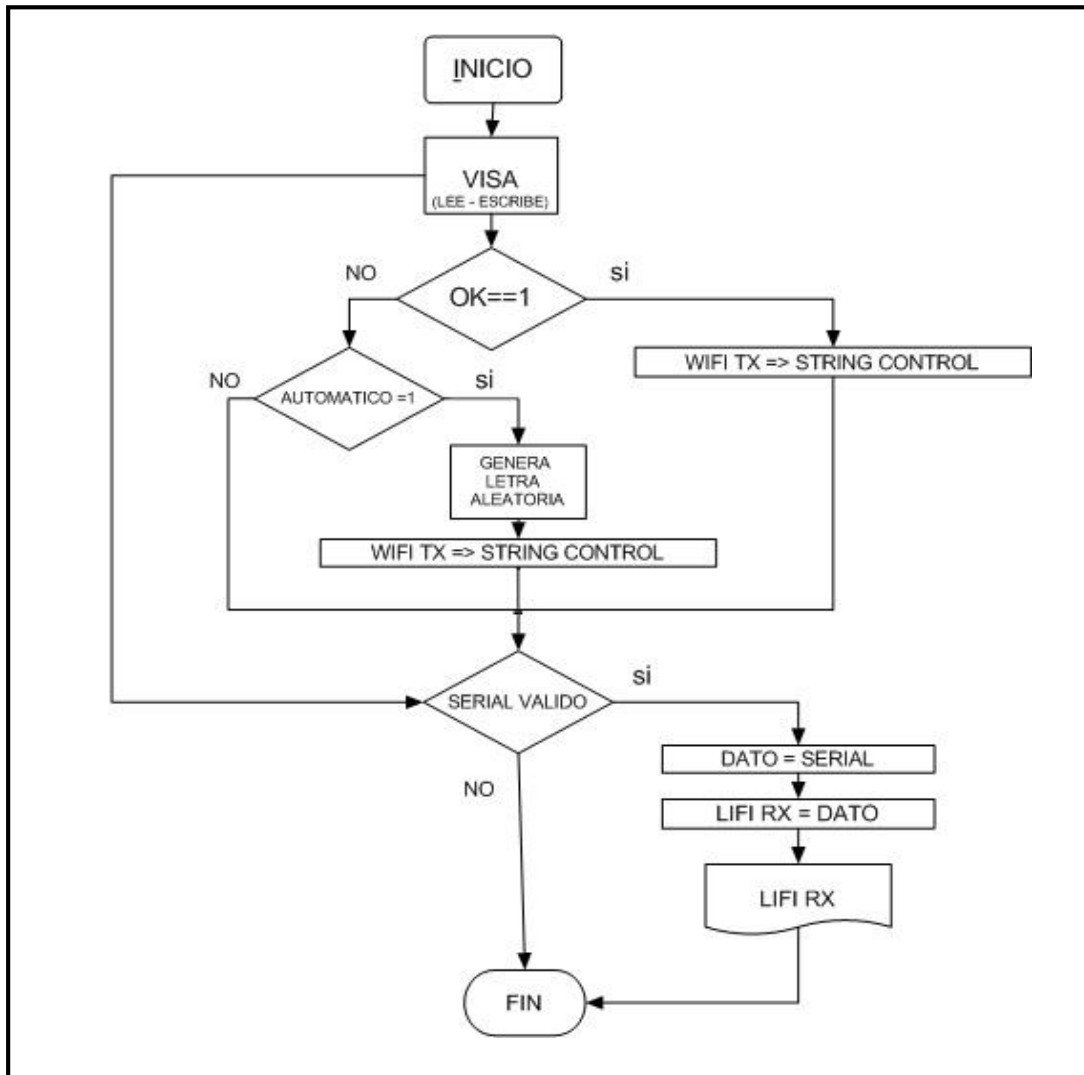
### **Bibliotecas utilizadas dentro del código del módulo Receptor Wifi – Emisor Lifi**

En este módulo se ocuparon casi en su totalidad las mismas librerías necesarias para establecer la comunicación tanto por RF como por luz que se describió en el módulo anterior por lo que simplemente las enumeraremos: IRremote.h, SPI.h, nrf24L01.h, RF24.

### **3.3.5. Software del entorno gráfico del módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi.**

Para el entorno grafico que permitió la interacción del usuario con los módulos se utilizó el software LabView 2017. Se presenta de igual manera su respectivo diagrama de flujo con la descripción de sus funciones en el gráfico 27-3.





**Gráfico 27-3.** Diagrama de flujo interfaz gráfica en LAbView de módulo ingreso

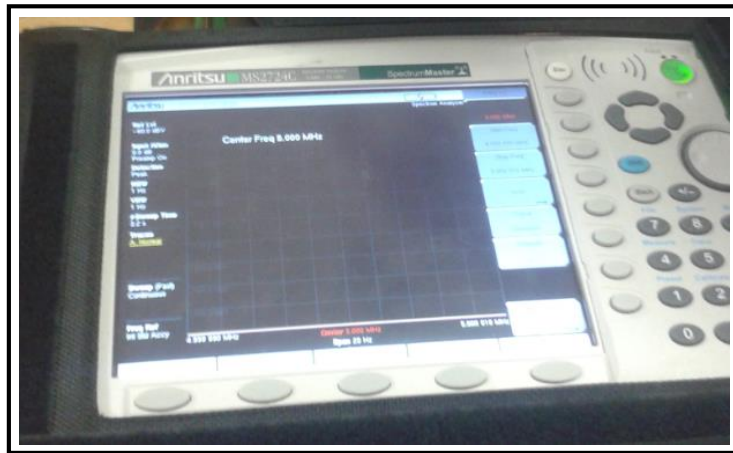
Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

- **VISA:** para escribir o leer la información desde el puerto serial cuando utilizamos una interfaz elaborada en LAbView fue necesario instalar los drivers de NI VISA. Se configuraron todos los parámetros con un “VISA Serial Port Configuration” para que sincronice el computador con el microprocesador. Únicamente se puede leer con un “VISA Read” o escribir con un “VISA Write”, en los dos casos era necesario cerrar la sesión con “VISA CLOSE”
- **ENVIAR:** Cuando se pulsaba el botón enviar el carácter almacenado pasaba a la etapa de codificación y posterior al módulo de transmisión Wifi.
- **AUTOMATICO:** En el caso que no se presionaba el botón de envío la otra instrucción preguntaba si el botón automático estaba activo, de ser así generaba caracteres aleatorios y continuos cada 500ms para ser enviados al módulo de transmisión wifi.

## CAPITULO IV

### 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

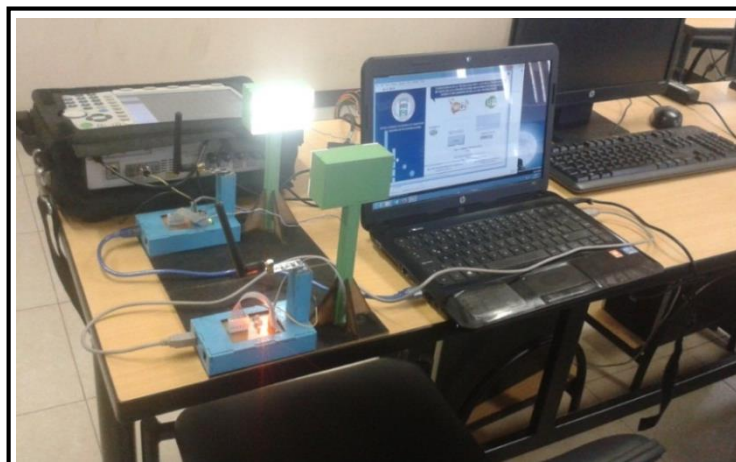
Una vez desarrollado el prototipo híbrido Wifi – Lifi las pruebas de funcionamiento se las realizó en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, con la ayuda de un osciloscopio y el analizador de espectro marca ANRITSU como se observa en el gráfico 1-4.



**Gráfico 1-4.** Analizador de Espectro ANRITSU

**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

En el gráfico 2-4 se observa la puesta en funcionamiento del sistema híbrido para obtener las frecuencias de funcionamiento de cada módulo.



**Gráfico 2-4** Funcionamiento del prototipo híbrido Wifi-Lifi

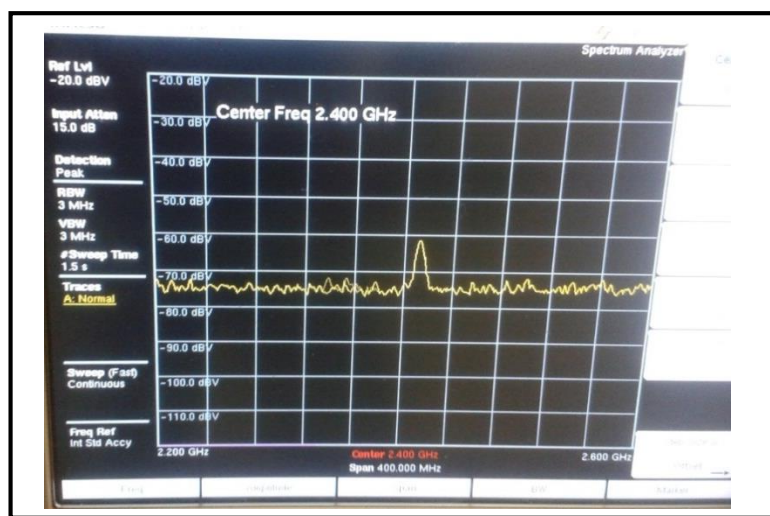
**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

Para analizar las frecuencias de operación tanto de transmisión y recepción de datos se plantearon los siguientes escenarios:

#### 4.1. Escenarios del Prototipo

##### 4.1.1. Escenario Uno

En este escenario como primer punto se analizó la frecuencia de operación de los módulos nRF24L01 que se utiliza para en envío de los caracteres, que representa el enlace ascendente a través de Wifi. Para esta prueba se utilizó una antena microstrip de 2,4 GHZ.

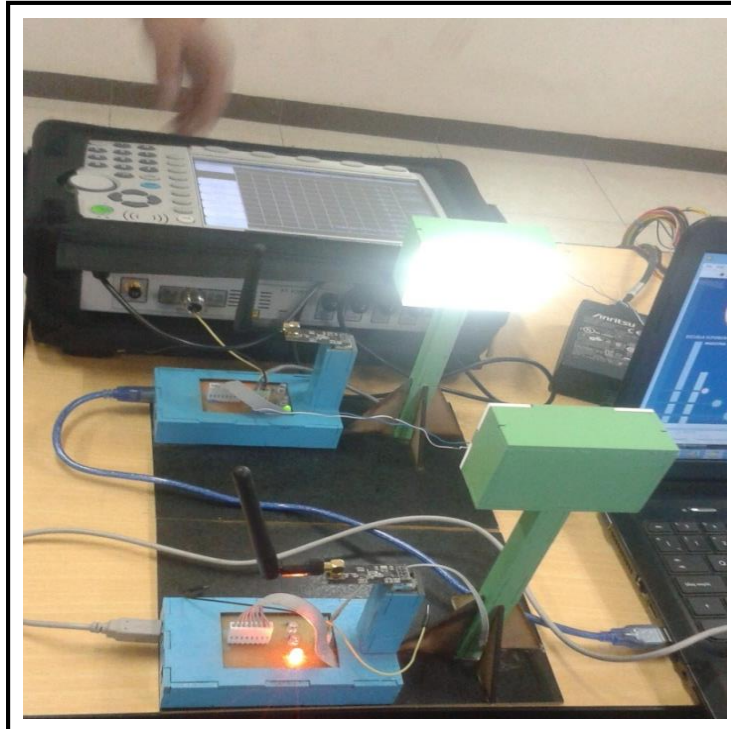


**Gráfico 3-4** Frecuencia de operación de los módulos nRF24L01

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

Como se observa en el gráfico 3-4 el rango establecido para captar la frecuencia de operación de los módulos de RF es de 2.2 GHZ a 2.6 GHZ obteniendo como frecuencia central 2,4 GHZ que es donde se halla el pico más alto del espectro.

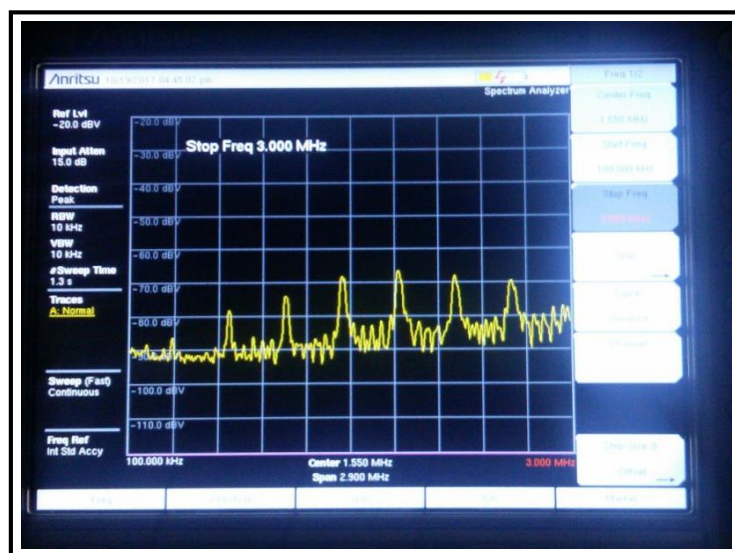
A continuación se procedió a medir la frecuencia de salida del micro Arduino Uno en el pin 8, que era la frecuencia a la cual se enviaban los caracteres como pulsos de luz a través de la matriz de leds una vez que habían sido asignados con una cabecera y un código de identificación.



**Gráfico 4-4.** Medición de la frecuencia de envío de los datos a través de la luz

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

En el gráfico 4-4 se observa la conexión del módulo receptor wifi - emisor Lifi hacia el analizador de espectro.



**Gráfico 5-4.** Medición de la frecuencia de envío de datos a través de la luz

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

Como se ve en el gráfico 5-4 el rango para captar la frecuencia de salida del micro es de 100 KHZ a 3 MHZ, obteniendo como frecuencia central 1,5 MHZ.

La otra medición se la hizo después del foto receptor de luz en un rango de 4 MHz a 7 MHz teniendo una frecuencia central de operación de 2 MHz. Gráfico 6-4.



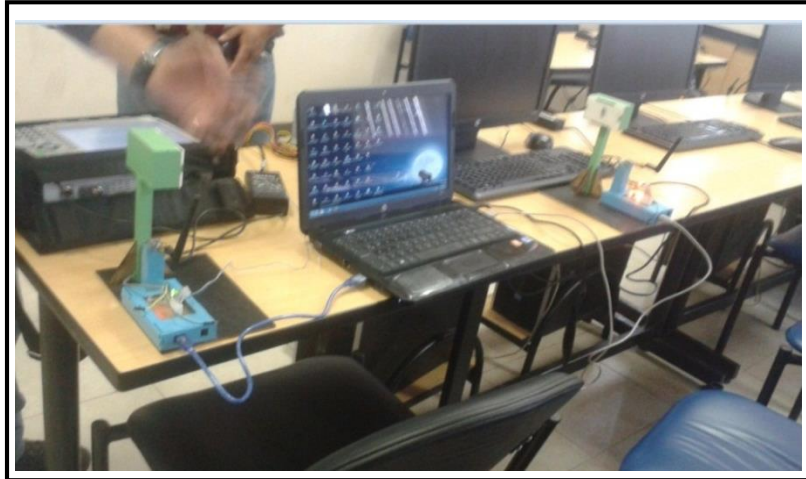
**Gráfico 6-4.** Medición de la frecuencia de recepción de datos a través de la luz

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

En nuestro experimento, la velocidad de descarga del sistema híbrido, estuvo restringida por los dispositivos usados y por el tiempo de procesamiento que le tomaba al microprocesador para ejecutar las funciones.

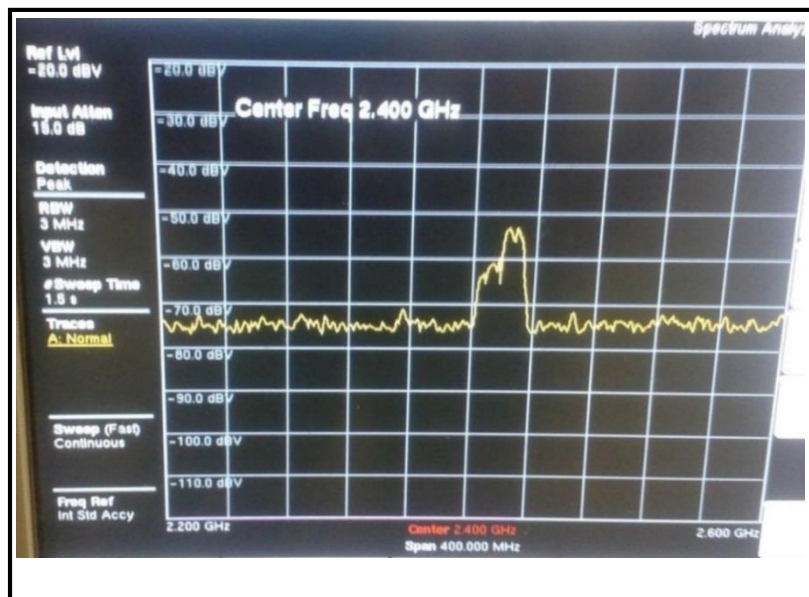
#### **4.1.2. Escenario Dos**

En el escenario 2 como se ve en el gráfico 7-4 se los separo a una distancia a 1,5m entre módulos para observar si existe variación en las frecuencias anteriormente medidas.



**Gráfico 7-4.** Medición de las frecuencias con variación de la distancia

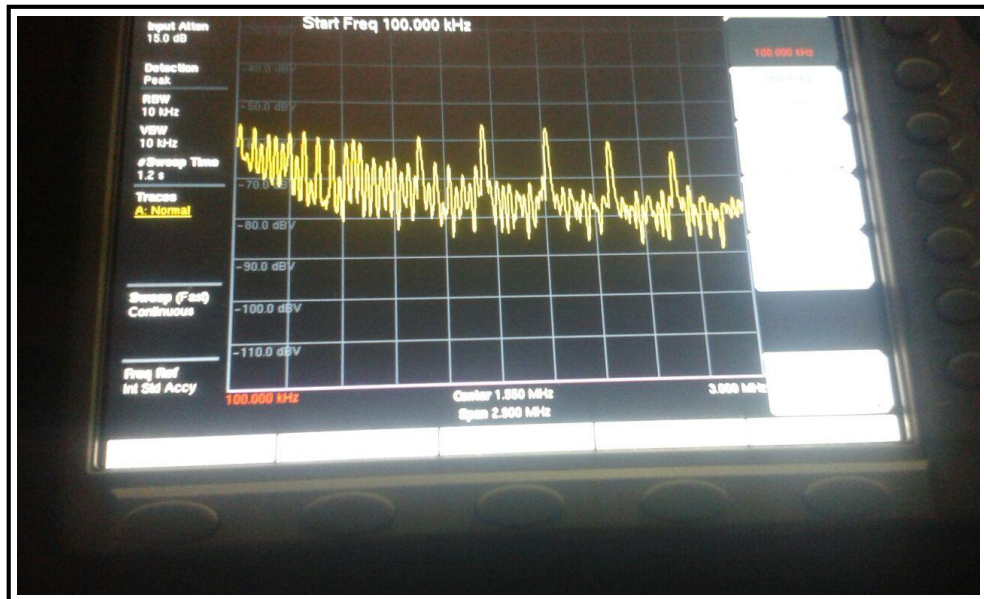
Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.



**Gráfico 8-4.** Frecuencia de los módulos RF con variación de distancia

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

En el gráfico 8-4 se observa que los módulos de RF mantenían la frecuencia de 2,4 GHz en la transmisión debido a que estaban muy por debajo de los 50m de distancia que es el límite de radiación de estos módulos teóricamente. Luego se procedía a medir de nuevo la frecuencia de recepción en el foto transistor como se observa en el gráfico 9-4.



**Gráfico 9-4** Frecuencia de envío Lifi con variación de la distancia

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.


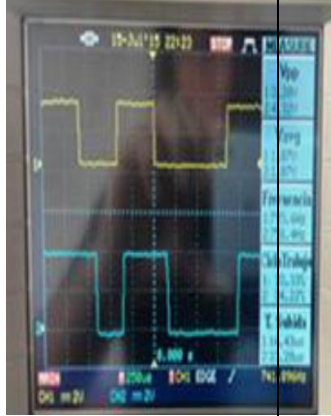
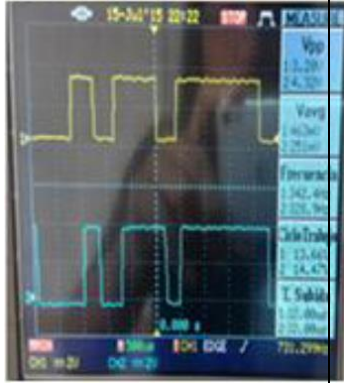

La frecuencia de recepción seguía siendo de 2 MHz se observa que su frecuencia no variaba comparado al caso anterior cuando la distancia alcanzaba los 1,5 m.

### 4.1.3. Escenario Tres

#### 4.1.3.1. Mediciones de la señal de recepción utilizando una foto resistencia

En este experimento se procedió a variar la velocidad de modulación a la cual se enviaba los datos y observar el comportamiento de la señal receptada con una foto resistencia como se ve en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4 Señal receptada por la foto resistencia para varias velocidades

VELOCIDAD MODULACIÓN BAUDIOS	GRAFICA OSCILOSCOPIO	VELOCIDAD MODULACION BAUDIOS	GRAFICA OSCILOSCOPIO
4800		19200	
9600		38400	

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

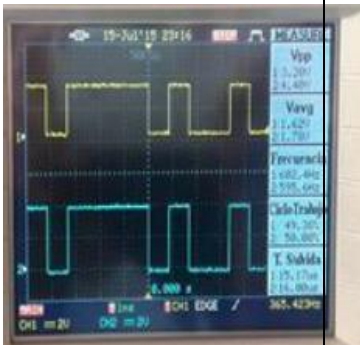
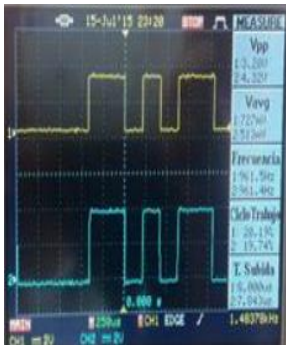
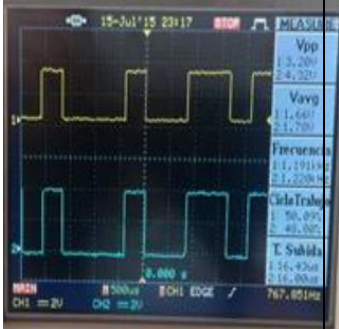
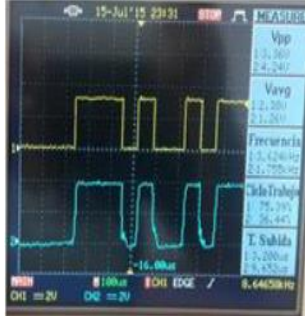
Como se puede apreciar en las gráficas de la tabla 1-4 cuando la velocidad de modulación era de 4800 Baud (pulso de color amarillo) la señal en la foto resistencia utilizado como receptor de luz no sufría ninguna distorsión, pero a medida que la velocidad iba en aumento se empezaba a distorsionar la señal (pulso azul). Debido a que si aumentábamos la velocidad de modulación el receptor lifi se saturaba al no poder procesar la información y los caracteres ya no eran recibidos. Entonces se dedujo que no era conveniente utilizar una foto resistencia para recibir los pulsos de luz ya que era muy lenta para procesarlos. La mayor velocidad aceptable fue de 19200 Baud, ya que a partir de los 38400 Baud la señal saturaba la etapa de recepción.



#### 4.1.3.2. Pruebas y Mediciones con el foto transistor

En la tabla 2-4 se muestra que la señal receptada ahora por un foto transistor no es tan drástica la deformación que sufre como en el caso anterior al aumentar la velocidad de modulación. A los 4800 y 9600 la señal de pulsos de luz receptada (color azul) es prácticamente la misma que la transmitida (pulso de color amarillo). Afirmando de esta manera que el fototransistor respondía de mejor manera a los flancos de subida y bajada de los pulsos de luz.

Tabla 2-4 Señal receptada por el foto transistor para varias velocidades

VELOCIDAD MODULACIÓN BAUDIOS	GRAFICA OSCILOSCOPIO	VELOCIDAD MODULACION BAUDIOS	GRAFICA OSCILOSCOPIO
4800		19200	
9600		38400	

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

Es por eso que para nuestro prototipo híbrido se eligió al foto transistor ya que permitía alcanzar mayores velocidades en la recepción de pulsos de luz para una comunicación óptima de nuestro sistema híbrido, por lo que se lo programó al micro para que trabaje a una velocidad de modulación de 9600 Baud que es a la que respondía de mejor manera la señal de recepción.

## 4.2. Análisis de la Velocidad de transmisión de Arduino Uno

Para el cálculo de la velocidad de transmisión se aplicó la formula

$$V_{tx} = V_m \log_2 N \quad \text{Dónde:}$$

- $V_{tx}$  Velocidad de transmisión  
 $V_m$  Velocidad de modulación  
 $N$  Número de estados a transmitir

Para nuestro caso N es 2 basado en el data sheet del arduino Uno

Tabla 3-4 Velocidad de Transmisión

VELOCIDAD DE MODULACIÓN EN BAUDIOS	VELOCIDAD DE TRASMISION kbps
4800	4,8
9600	9,6
19200	19,2
38400	38,4
57600	19,2

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

## 4.3. Comparación de eficiencia entre un prototipo solo Wifi versus el prototipo híbrido.

### 4.3.2. Comparación de eficiencia de los dos sistemas para distintas distancias.

Se procedió hacer una comparación de eficiencia de envío y recepción de datos entre un sistema que utilizaba solo módulos de radio frecuencia nRF24L01 (solo Wifi) tanto para el enlace ascendente como el descendente de datos con la del prototipo híbrido que enviaba los caracteres por wifi (enlace ascendente) y recibía la información procesada por Lifi (enlace descendente) para diferentes distancias como se ve en la tabla 4-4 y tabla 5-4.

Se consideró un dato exitoso para el primer caso del sistema solo Wifi cuando el carácter ingresado por el usuario fue enviado y receptado utilizando solo módulos de RF y para el

segundo caso del sistema híbrido el carácter ingresado fue enviado a través del módulo RF (Tx Wifi), fue codificado y devuelto al usuario mediante un módulo Lifi.

En los dos sistemas para contabilizar cuantos caracteres exitosos se obtuvo, se lo hizo en un tiempo de 2 minutos, con variación en la distancia de 0,5 m y a una velocidad de modulación de 9600 baudios.

Tabla 4-4 Datos exitosos vs. Distancia en un sistema solo Wifi

<b>Sistema solo WiFi (módulos nRF24L01)</b>	
<b>Distancia(m)</b>	<b>N° Datos Exitosos</b>
0,5	30
1	30
1,5	30
2	29
2,5	30
3	29
3,5	30
4	29
4,5	28

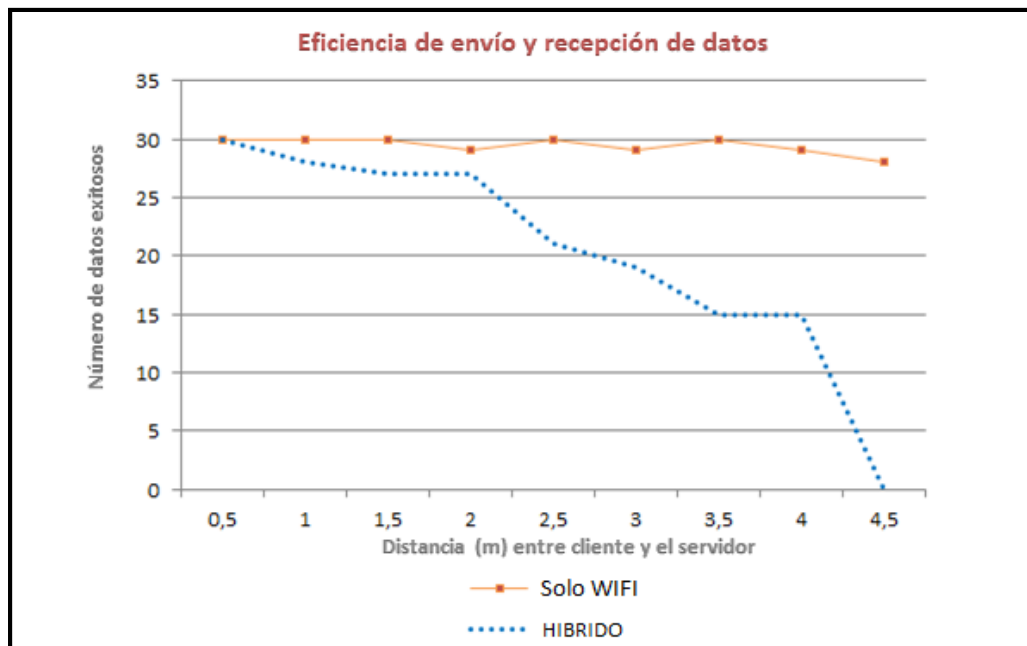
Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

Tabla 5-4 Datos exitosos vs. distancia en un sistema híbrido

Sistema Híbrido Wifi – Lifi	
Distancia (m)	N° Datos Exitosos
0,5	30
1	29
1,5	27
2	27
2,5	21
3	19
3,5	15
4	15
4,5	0

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

En el gráfico 10-4 se presenta una gráfica comparativa de la eficiencia de envío y recepción de datos entre el sistema solo Wifi con el sistema Lifi.



**Gráfico 10-4** Eficiencia de un sistema solo Wifi en comparación con el híbrido

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

Observando el gráfico 10-4 se tuvo que para Lifi el factor de corto alcance es inevitable, por lo que al variar la distancia tanto para el sistema wifi que solo se comunica a través de los módulos de RF, como del prototipo híbrido Wifi-Lifi los resultados del experimento mostraron que a medida que la distancia aumentaba, el rendimiento alcanzable por el sistema híbrido estaba disminuyendo rápidamente, sin embargo, el sistema WiFi se mantenía casi con un rendimiento estable.

El rendimiento de WiFi ya excedía al del prototipo híbrido cuando la distancia se incrementaba a partir del 1m. Esto se debe a que como aumentaba la distancia, disminuía la capacidad del enlace descendente de Lifi, eventualmente llegando a ser insignificante a los 4,5m. Se debe tomar en cuenta entonces que los resultados de rendimiento del sistema híbrido solo dependen de la capacidad del enlace descendente Lifi.

#### 4.3.2.1. Análisis de la distancia vs BER

En la tabla 6-4 se estableció la relación existente entre la distancia vs el BER este último calculado a partir de la tabla 4-4 para un sistema solo Wifi mediante la ecuación:

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits transmitidos}}$$

**Tabla 6-4** Datos distancia vs BEAR sistema Wifi

<b>Sistema Solo WiFi (módulos nRF24L01)</b>	
<b>Distancia(m)</b>	<b>BER</b>
0,5	0,000000
1	0,033333
1,5	0,000000
2	0,033333
2,5	0,000000
3	0,033333
3,5	0,000000
4	0,033333

**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

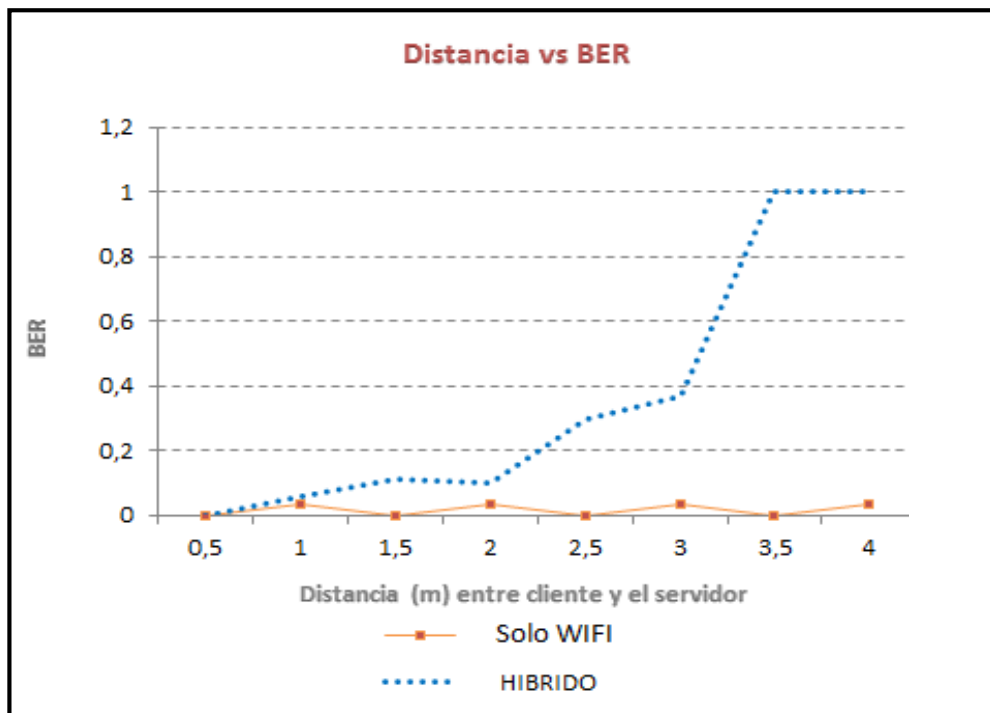
En la tabla 7-4 de igual forma se estableció la relación existente entre la distancia vs el BER calculado este último a partir de la tabla 5-4 para un sistema híbrido:

**Tabla 7-4** Datos distancia vs BER sistema Híbrido

Sistema Híbrido Wifi – Lifi	
Distancia (m)	BER
0,5	0,000000
1	0,060000
1,5	0,111111
2	0,1
2,5	0,3
3	0,36666
3,5	1
4	1

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

En el gráfico 11-4 se presenta una comparativa del BER entre los dos sistemas



**Gráfico 11-4** Comparación del BER del sistema solo wifi con el sistema híbrido

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

**4.3.3. Comparación de eficiencia de los sistemas solo wifi versus el prototipo híbrido al someterlos a interferencias RF de 2,4 GHZ en distintos instantes de tiempo**

Al igual que en el apartado anterior se utilizó los dos sistemas pero ahora para comparar el rendimiento que tiene cada uno al exponerlos a distintos tiempos de interferencias de radio frecuencia (interferencias a 2,4 Ghz), como se muestra de la tabla 8-4 para el sistema solo Wifi y en la tabla 9-4 para el sistema híbrido.

Para los dos sistemas se contabilizaron los datos exitosos a una distancia óptima de emisión y recepción que es de 0,5 m por un tiempo de 4,3 minutos.

Tabla 8-4 Datos transmitidos vs. tiempo de interferencia

<b>Sistema Solo WiFi (módulos nRF24L01)</b>	
Tiempo de interferencia (minutos)	N° Datos Exitosos
0	60
0,3	51
1,3	42
2	37
2,3	32
3	27
3,3	24
4	19
4,3	17

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

De los resultados expuestos en la tabla 8-4 se tuvo que para el sistema que utilizaba los módulos RF para envío y recepción de datos la cantidad de datos exitosos fue del 100% cuando el tiempo de interrupción era de 0 minutos, pero iba disminuyendo a medida que el tiempo de interferencia se ampliaba obteniendo apenas 17 datos exitosos en 4,3 min.

Tabla 9-4 Datos transmitidos vs. tiempo de interferencia

Sistema Híbrido (WIFI - LIFI)	
Tiempo de interferencia (minutos)	N° Datos Exitosos
0	60
0,3	54
1,3	49
2	43
2,3	38
3	32
3,3	30
4	26
4,3	22

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

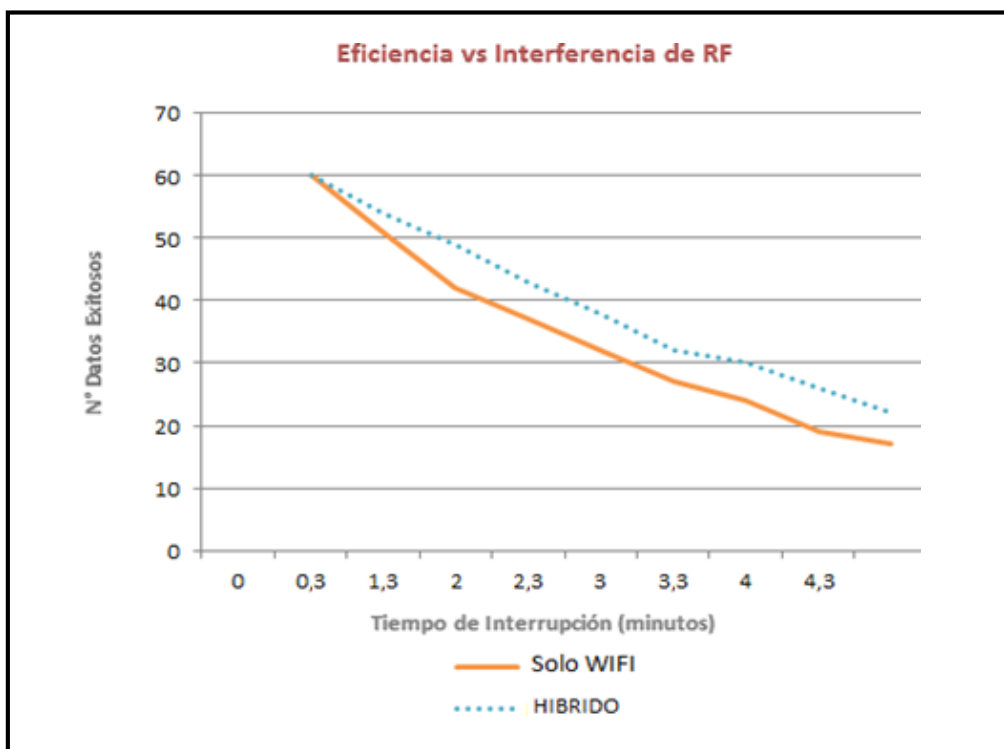


Gráfico 12-4 Comparación un sistema solo Wifi con el híbrido bajo interferencias

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.



En el gráfico 12-4 se muestra una mejor respuesta del circuito híbrido con respecto al sistema solo wifi al momento de exponerlo a interrupciones de aparatos que emiten en su misma frecuencia es decir que están en el orden de los 2,4 GHZ. Esto se debe a que el prototipo híbrido solo se vio afectado al momento de enviar los caracteres por wifi ya que para la descarga de la información se utilizaba el espectro de la luz, a diferencia del sistema solo Wifi que se vio afectado en los dos sentidos. Lo que fácilmente nos permitió deducir que en una situación real de comunicación con internet seria incluso mucho más notable la eficiencia del circuito híbrido, ya que siempre es mucho más la cantidad de información que se descarga de la que se sube a la nube.

Tabla 10-4 Comparación de velocidades de recepción de los dos sistemas

N°_Receptores	Velocidad recepción (bps) solo Wifi	Velocidad recepción (bps) Híbrido
1	9600	9600
2	4800	9600
3	3200	9600
4	2400	9600
5	1920	9600

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

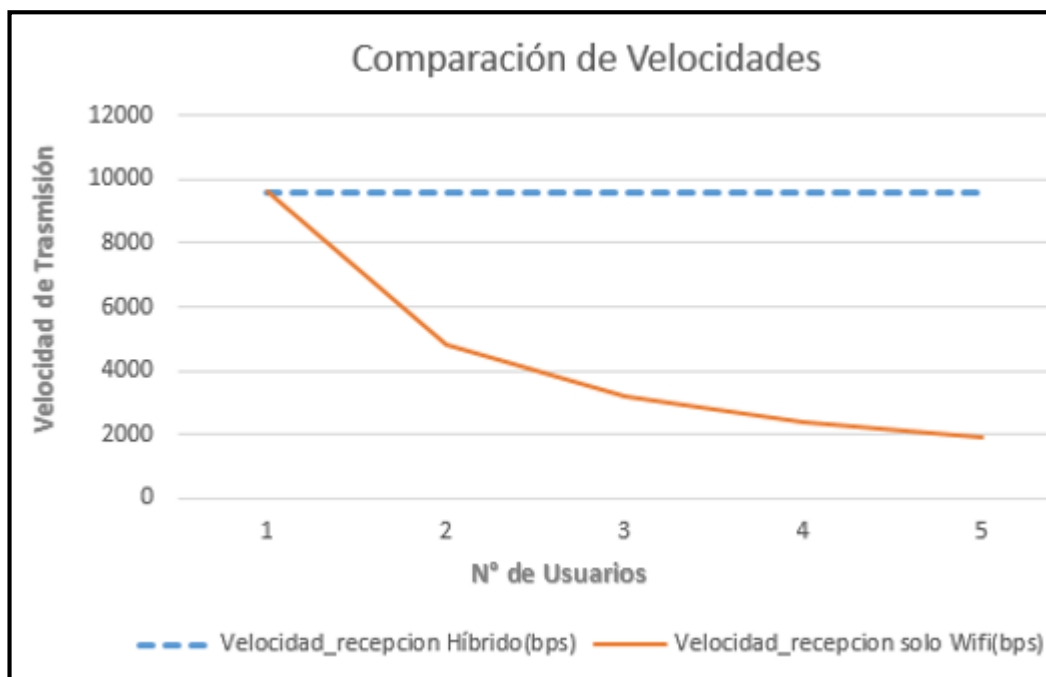


Gráfico 13-4 Comparación de velocidades recepción de los dos sistemas

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

Además fue evidente concluir que si paulatinamente se incrementaba el número de usuarios la velocidad de descarga en el sistema de solo wifi tendría a dividirse para poder atender a los múltiples usuarios conectados mientras que el sistema híbrido la velocidad de bajada de datos se mantenía la misma para todos los usuarios que receptaban el haz de luz led. En la tabla 10-4 y el gráfico 13-4 se observa una comparación de velocidades entre los dos sistemas frente al aumento de usuarios.

**4.3.4. Rendimiento del prototipo híbrido expuesto a bloqueos con diversos materiales en la etapa de comunicación Lifi.**

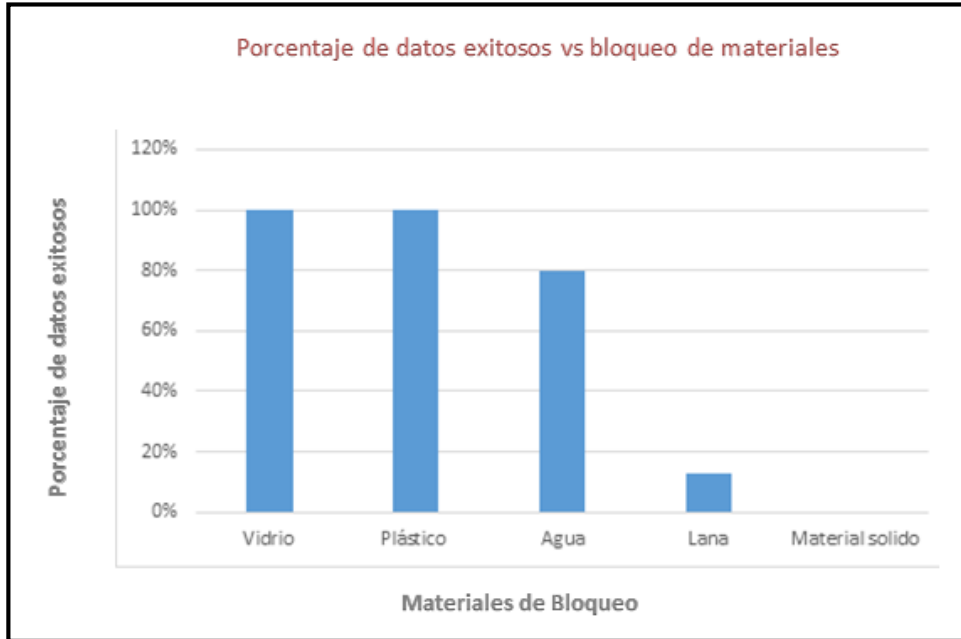
En este escenario se procedió a analizar el porcentaje de datos exitosos obtenidos al bloquear el haz de luz con diferentes materiales a una distancia óptima de 1 m entre los módulos de comunicación para un tiempo de 2 minutos. Este haz de luz que cumplió con la doble función de otorgar iluminación y al mismo tiempo sirvió como el enlace descendente para la descarga de los caracteres codificados. Los resultados se describen en la tabla 11-4.

**Tabla 11-4** Porcentaje de datos transmitidos con diferentes materiales

<b>MATERIAL</b>	<b>TRANSFERENCIA</b>
Vidrio	100%
Plástico	100%
Agua	80%
Lana	7 %
Material solido	0 %

**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

En el gráfico 14-4 se representa los porcentajes de datos exitosos obtenidos al bloquear el haz de luz con distintos materiales para un tiempo de 2 minutos.



**Gráfico 14-4** Porcentaje de datos exitosos vs bloqueo con diferentes materiales

**Fuente:** CAISAGUANO, Braulio 2018.

Del gráfico 14-4 se evidenció que el haz de luz que nos proporcionaba nuestro prototipo híbrido para la descarga de caracteres atravesó sin dificultad el vidrio y el plástico teniendo el 100% de datos enviados y recibidos con éxito, otro aspecto digno de destacar fue que la información que atravesó el recipiente con agua fue del casi del 100% por lo que precisamente esta tecnología es de mucho interés para las comunicaciones subacuáticas donde la tecnología Wifi es ineficiente.

Por otro lado debido a la longitud de onda particularmente pequeña de la luz visible se comprobó que el canal lifi pudo ser fácilmente bloqueado por pequeños objetos sólidos que como se observa en el gráfico 14-4 pudo cortar la comunicación por completo. Es por esto que con respecto al movimiento irregular de los dispositivos móviles, la duración del bloqueo del canal se convierte en un factor considerable cuando evaluamos el rendimiento de la red Lifi.

#### **4.4. Análisis y validación de resultados**

El Método Estadístico utilizado para realizar el análisis en cada escenario fue el Diseño Completamente Aleatorio conocido también como modelo de análisis de la varianza para clasificación simple de las observaciones. Es uno de los diseños más sencillos y simples de implementar, ocupado cuando las unidades experimentales son homogéneas o sus variaciones entre ellas son mínimas.

#### 4.4.1. Tabla de Análisis de Varianza (ANOVA)

La tabla Anova está compuesta por las fuentes de variación, grados de libertad, suma de Cuadrados, cuadrados medidos de cada componente, el factor de f y la probabilidad de significancia (valor p). En la tabla 12-4 se presentan los componentes del análisis de la varianza.

Tabla 12-4 Análisis de Varianza (Anova)

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Valor P
Tratamiento	$t - 1$	$SC_{inter}$	$MC_{inter} = \frac{SC_{inter}}{t - 1}$	$F = \frac{CM_{inter}}{CMCM_{intera}}$	
Error	$t(r - 1)$	$SC_{intera}$	$MC_{intera} = \frac{SC_{intera}}{t - 1}$		
Total	$tr - 1$	$SC_{total}$			

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

#### Interpretación de los Datos

Con la tabla de la varianza (Anova) se puede aceptar o rechazar la Hipótesis Nula  $H_0$  por medio del valor de la probabilidad (p), entonces si  $p > 0.05$  se acepta  $H_0$  pero si  $p < 0.05$  se rechaza  $H_0$ , permitiendo de esta manera tener un nivel de confianza del 95%.

##### 4.4.1.1. Escenario Uno

Para el análisis de las varianzas se utilizaron los datos adquiridos de la comparación de eficiencia entre los dos sistemas con respecto a las interrupciones de radio frecuencia, reflejados en la tabla 8-4 del sistema solo Wifi con los de la tabla 9-4 del prototipo híbrido.

Tabla 13-4: Análisis de varianzas – ANOVA de un factor.

ANOVA de un factor					
INTERRUPCIONES DE RADIO FRECUENCIA					
	Suma de cuadrados	de gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	112,500	1	112,500	,586	,004
Intra-grupos	3074,000	16	192,125		
Total	3186,500	17			

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

**Ho 1:** La coexistencia de las dos tecnologías en el prototipo híbrido en comparación al sistema solo wifi no mejora el rendimiento al exponerlos a interrupciones de radio frecuencia de 2,4 ghz

**Hi 1:** La coexistencia de las dos tecnologías en el prototipo híbrido en comparación al sistema solo wifi si mejora el rendimiento al exponerlos a interrupciones de radio frecuencia de 2,4 ghz

- **Decisión**

Los resultados obtenidos del Análisis de Varianzas – ANOVA de un factor se muestran en la tabla 13-4, se observa que el valor de significancia de 0,004 que es menor que 0,05 por lo que, se rechazó la hipótesis nula aceptando la hipótesis alternativa.

Concluyendo que las interrupciones de radio frecuencia a 2,4 ghz influyen en los dos sistemas, pero menor proporción en el prototipo híbrido.

#### 4.4.1.2. Escenario Dos

Para el análisis de las varianzas en este escenario se utilizaron los datos de las tablas 10-4 y tabla 14-4, obtenidos de la comparación de la velocidad de recepción frente al aumento del número de usuarios entre el sistema solo Wifi y del prototipo híbrido.

**Tabla 14-4:** Análisis de varianzas – ANOVA de un factor.

ANOVA de un factor					
VELOCIDAD_DE_RECEPCION_KBPS					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	195,031	1	195,031	52,022	,000
Intra-grupos	59,984	16	3,749		
Total	255,016	17			

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

**Ho 2:** La coexistencia de las dos tecnologías en el prototipo híbrido en comparación al sistema wifi tradicional no mejora la velocidad de recepción al existir un aumento en el número de usuarios

**Hi 2:** La coexistencia de las dos tecnologías en el prototipo híbrido en comparación al sistema wifi tradicional si mejora la velocidad de recepción al existir un aumento en el número de usuarios.

- **Decisión**

Los resultados obtenidos del Análisis de Varianzas – ANOVA de un factor se muestran en la tabla 14-4, se observa que el valor de significancia es 0,000 y este es menor que 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula aceptando la hipótesis alternativa.

Concluyendo que en el sistema híbrido la velocidad de recepción no se ve afectada respecto al aumento de cierto número de usuarios, a diferencia del sistema solo Wifi que si disminuye su rendimiento.

#### 4.4.2. Presupuesto del prototipo híbrido de enlace ascendente Wifi y descendente Lifi

A continuación se describe el presupuesto económico que se ocupó para la implementación del sistema híbrido que permite la coexistencia de wifi y lifi con todos los elementos adquiridos en Ecuador. En la tabla 15-4 se detalla cada componentes que conforman cada uno de los módulos del prototipo especificando su respectivo precio.

Tabla 15-4 Presupuesto del prototipo híbrido Wifi-Lifi para la transmisión de datos

<b>MÓDULOS</b>	<b>COMPONENTES</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
<b>MODULO EMISOR WIFI-RECEPTOR LIFI</b>	Arduino Uno	2	30	60
	Módulo RF nRF24L01	2	80	160
	PCB	2	50	100
	Conectores Molex	6	8	48
	Cable plano	2	9	18
	Corte láser MDF	1	35	35
	Receptor VS1838B	1	15	15
	Leds 1W	3	3	9
	Conector serial	2	15	30
<b>MODULO EMISOR LIFI-RECEPTOR WIFI</b>	Arduino Uno	1	30	30
	Módulo RF nRF24L01	1	80	80
	PCB	1	50	50
	Conectores Molex	3	8	24
	Cable plano	1	9	9
	Corte láser MDF	1	35	35
	Leds 1W	16	3	48
	Conector serial	1	15	15
<b>PRECIO TOTAL DEL PROTOTIPO HIBRIDO WIFI- LIFI</b>				<b>\$ 766</b>

Fuente: CAISAGUANO, Braulio 2018.

## CONCLUSIONES

Con la elaboración del prototipo híbrido para interiores se comprobó que la convivencia de las tecnologías WiFi y LiFi es posible, además que de los resultados obtenidos en distintos escenarios la coexistencia de ambas tecnologías puede mejorar el rendimiento, eficiencia y seguridad en la transmisión de datos comparado a un sistema wifi tradicional.

De la comparación de eficiencia entre el sistema híbrido con el sistema solo wifi concluimos que a una distancia corta entre el transmisor y el receptor, el sistema híbrido Wifi - Lifi funciona mucho mejor que el sistema solo WiFi en un entorno inalámbrico atestado por interferencias de RF, debido a que la recepción de datos lo hace por un medio distinto como lo es el espectro de luz.

Se evidenció que la congestión en las redes WiFi deteriora inevitablemente el rendimiento de cada usuario lo que no sucedía con el prototipo híbrido, que todos los usuarios captaban a la misma velocidad la recepción de datos. Esto debido a que los puntos de acceso de enlace descendente lifi alivian eficazmente la contención y la interferencia en el canal de RF.

Se comprobó que la convivencia de las tecnologías WiFi y LiFi no presenta interferencias entre sí ya que trabajan a diferentes espectros de frecuencia y que además el haz de luz no se propaga en todas las direcciones, solo sigue una trayectoria única.

De las pruebas de bloqueo con diferentes materiales echas al haz de luz en el sistema híbrido se tuvo que debido a la longitud de onda particularmente pequeña de la luz visible, el canal Lifi puede ser fácilmente bloqueado por pequeños objetos sólidos. Es por esto que con respecto al movimiento irregular de dispositivos móviles, la duración del bloqueo del canal se convierte en un factor considerable.

La velocidad de transmisión y recepción en nuestro proyecto se vio limitada debido a que los componentes del diseño no están en la capacidad de procesar y soportar tanto velocidades como frecuencias muy altas. Pero es seguro que conforme las empresas vayan desarrollando esta tecnología se contara con componentes sofisticados capaces de transmitir datos a velocidades de un gigabyte por segundo, cien veces más rápido que Wifi, es por eso que sin duda alguna Lifi estará presente en un futuro no muy lejano.



Hemos demostrado que una estrecha integración de ambas tecnologías permite que las oportunidades de descarga de la red Wi-Fi liberen recursos para más usuarios móviles, ya que los usuarios estacionarios serian atendidos preferentemente por LiFi, de esta manera, ambas tecnologías pueden colaborar eficazmente.

Así como puede ser una desventaja que la luz no pueda atravesar materiales sólidos, en tema de seguridad puede ser un gran hallado, ya que solo captarían la información los usuarios que estén al alcance del flujo de luz, ya que este haz de luz no se propaga en todas las direcciones, solo sigue una trayectoria única.

## **RECOMENDACIONES**

Dados los beneficios y resultados descritos en este trabajo, la comunicación por luz es una tecnología inalámbrica prometedora y evolutiva que ofrece valiosas contribuciones como parte de redes inalámbricas heterogéneas de próxima generación haciendo necesario el seguimiento de su desarrollo.

Buscar alternativas de dispositivos electrónicos modernos para mejorar el diseño del prototipo híbridos que me permitan alcanzar los estándares propuestos para esta tecnología como el de transmitir a más altas frecuencias y velocidades.

Se recomienda que cada una de las etapas que conforman el sistema híbrido sean efectuadas por separado para facilitar la calibración, medición y el funcionamiento de cada módulo.

Continuar con los estudios y análisis de los sistemas híbridos descritos en el presente trabajo ya que pudieran ser la solución combinada que aborde adecuadamente la necesidad de mejorar la cobertura interior con las mayores velocidades de datos necesarias para las generaciones actuales y futuras de las redes móviles.

Abrir las puertas a nuevas tecnologías como Lifi puede resolver problemas como la escasez de ancho de banda de radiofrecuencia y también permitir internet donde no se permite la conexión inalámbrica tradicional Wifi. En el futuro, no solo tendremos 14 mil millones de bombillas, sino que podremos tener 14 mil millones de Li-Fis desplegados en todo el mundo para un futuro más limpio de radio frecuencia.

## BIBLIOGRAFÍA

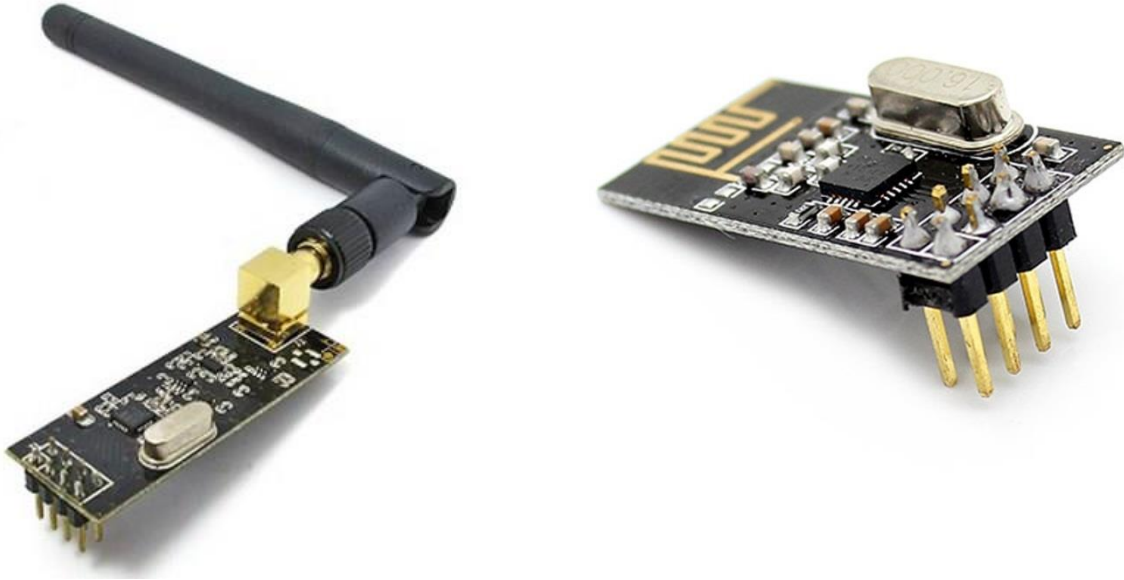
1. **CHAPA CANTÚ, ADALBERTO.** “Análisis de diseño con diodos y transistores”. 2ª ed. San Juan-México. Sans Serif., pp. 80-90. ( 2002)
2. **C. LEE, C. TAN, H. WONG, AND M. YAHYA,** “Performance evaluation of hybrid vlc using device cost and power over data throughput criteria,” in SPIE Optical Engineering Applications. International Society for Optics pp. 88 451A–88 451 A.( 2013)
3. **GARRIDO PEDRAZA, JAVIER.** Fundamentos de Arduino. 1ª ed. Barcelona España. Kindle, pp. 21-23. (2016)
4. **G. W. JOHNSON,** “LabVIEW graphical programming: practical applications in mentation and control ”. Ed. McGraw- Hill, New York, pp. 82- 94. (2010)
5. **HANY, ELGALA., et.al** “ Design and Analysis of a Visible-Light - Communication Enhanced WiFi System ”. Shao2015 [en línea], (United State of America) 7(10), pp.1-12. [Consulta: 2 Marzo 2017]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7293077/>. (2015).
6. **MICHAEL, RAHAIM., ANNA, VEGNI., Y THOMAS D.C** “A hybrid Radio Frequency and broadcast Visible Light Communication system”. Rahaim [en línea], (United State of America) ,7(9), pp. 1-5. [Consulta: 5 de Marzo 2017]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6162563/>. (2012).
7. **MR. SHAIENDRA, YADAV et.al.** LI-FI Technology for Data Transmission through LED. Transmission through LED [en línea], (India), 2(6), pp. 1-3. [Consulta: 10 Marzo 2017]. ISSN: 2454-1362. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7831599/>. (2016).
8. **MOUSSA, AYYASH. et.al.** “Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: opportunities, and challenges”. Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G [en línea], (United State of America), pp. 1-6. [Consulta: 20 Marzo 2017]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7402263/>. (2016).
9. **PEÑAFIEL, JESÚS ESTUARDO.** 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. Universidad Politécnica Salesiana. Carrera de Ingeniería Electrónica [en línea].Cuenca- Ecuador.2015.pp.49-52. [Consulta: 28 de Febrero del 2017]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7770/1/UPS-CT004629.pdf>.

10. **RODRIGUEZ CAMARGO, et.al.** *Alcances del desarrollo de la nueva tecnología li-fi para las telecomunicaciones en Colombia.* Universidad Católica de Colombia. Escuela de ingeniería electrónica y telecomunicaciones [en línea].Bogota-Colombia., pp. 3-9. [consulta: 02 de febrero del 2017]. Disponible en: <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2023/1/alcances%20del%20desarrollo%20de%20la%20nueva%20tecnolog%c3%8da%20lifi%20para%20las%20telecomunicaciones%20en%20colombia.pdf>. (2014).
11. **R. BITTER, T. MUHIUDDIN,** “LabVIEW advanced programming techniques”. Ed. CRC Press, Florida., pp. 27 – 45. (2001).
12. **SIHUA, SHAO. et.al.** “An Indoor Hybrid WiFi-VLC Internet Access System”. Internet Access System [en línea], (United State of America), pp. 1-4. [Consulta: 25 de Marzo 2017]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7035746/>. (2012).
13. **TORRENTE, ARTERO.** El mundo GENUINO - ARDUINO. 1ª ed. Barcelona España: Shaw Nielsen., pp. 70-76. (2015)
14. **YUNLU, WANG AND HARALD HAAS.** “Dynamic Load Balancing With Handover in Hybrid Li-Fi and Wi- Fi Networks”. Radio Communication [en línea], (United State of América), 33(22), pp. 1-5. [Consulta: 28 de Marzo 2017]. (2014).
15. **Z. HUANG AND Y. FENG,** “Design and demonstration of room division multiplexing-based hybrid VLC network,” Chin. Opt. Lett., vol. 11, no. 6, 060603, (2013).

## ANEXOS

### ANEXO A Especificaciones de los módulos de radio NRF2401



# Preliminary Product Specification v1.0

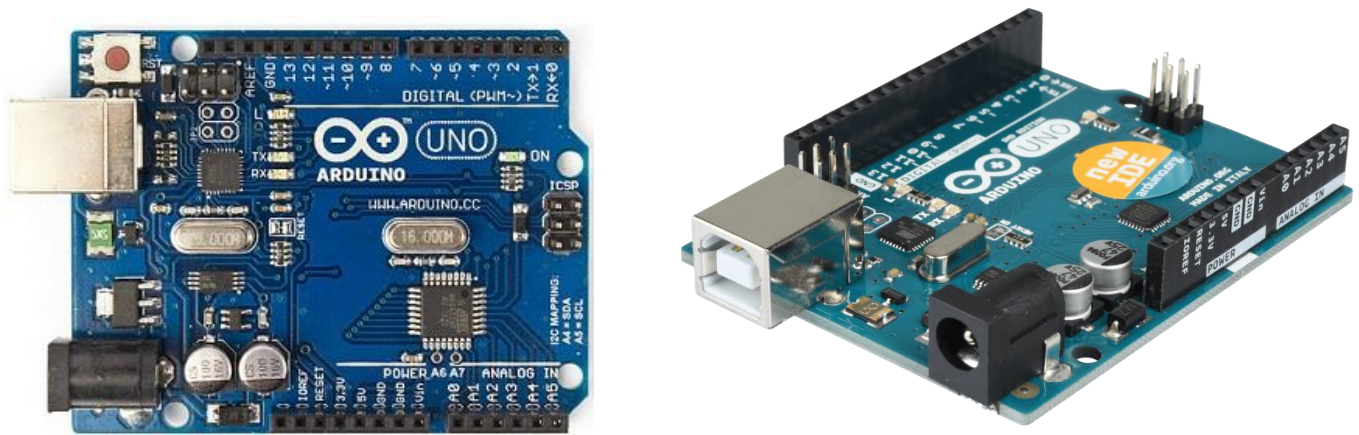
## Key Features

- Worldwide 2.4GHz ISM band operation
- 250kbps, 1Mbps and 2Mbps on air data rates
- Ultra low power operation
- 11.3mA TX at 0dBm output power
- 13.5mA RX at 2Mbps air data rate
- 900nA in power down
- 26µA in standby-I
- On chip voltage regulator
- 1.9 to 3.6V supply range
- Enhanced ShockBurst™
- Automatic packet handling
- Auto packet transaction handling
- 6 data pipe MultiCeiver™
- Drop-in compatibility with nRF24L01
- On-air compatible in 250kbps and 1Mbps with nRF2401A, nRF2402, nRF24E1 and nRF24E2

## Applications

- Wireless PC Peripherals
- Mouse, keyboards and remotes
- 3-in-1 desktop bundles
- Advanced Media center remote controls
- VoIP headsets
- Game controllers
- Sports watches and sensors
- RF remote controls for consumer electronics
- Home and commercial automation
- Ultra low power sensor networks
- Active RFID
- Asset tracking systems
- Toys

## ANEXO B Características de Arduino Uno



### Overview

The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328 ([datasheet](#)). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.

The Uno differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter.

"Uno" means one in Italian and is named to mark the upcoming release of Arduino 1.0. The Uno and version 1.0 will be the reference versions of Arduino, moving forward. The Uno is the latest in a series of USB Arduino boards, and the reference model for the Arduino platform; for a comparison with previous versions, see the [index of Arduino boards](#).

### Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-9V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) (0.5 KB used by bootloader)
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

ANEXO C Especificaciones del diodo led

SPECIFICATION FOR ZHONGZHOU LED LAMP

■ Typical Electrical/ Optical Characteristics Curves  
(Ta=25°C Unless Otherwise Noted)

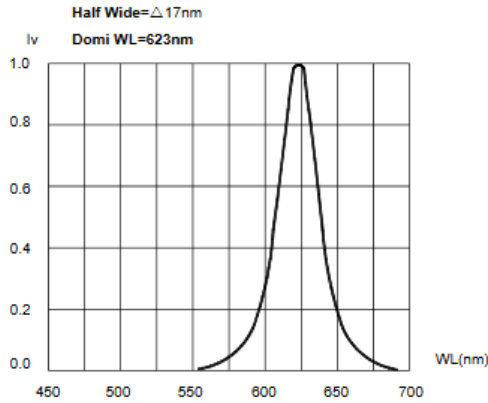


Fig.1 Relative Luminous Intensity vs. Wavelength

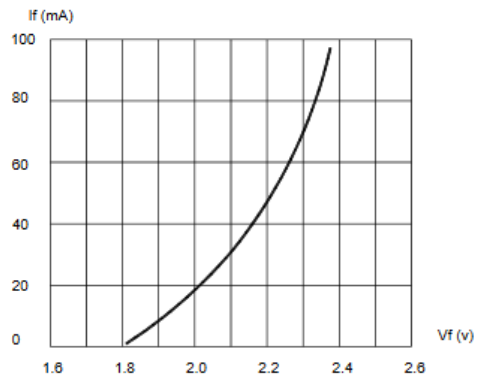


Fig.2 Forward Current vs. Forward Voltage

Ultra Bright Blue / White / Pure Green / Ultra Violet LED Specifications	333 T1 ¼(5mm) SERIES ROUND LED LAMPS
<p><b>Package Dimension</b></p>	<p><b>Radiation Diagram</b></p>
<p><b>Viewing Angle - 2Φ ½ : 20°± 10° &amp; 40°± 10°</b></p>	

## ANEXO D Código de programación del Módulo Emisor Wifi – Receptor Lifi

```
#include "IRLremote.h"
#include <SPI.h>
#include "nRF24L01.h"
#include "RF24.h"
int dato;
int i;
char rxser,tx;
RF24 radio(9,10);
const uint64_t pipes[2] = { 0xF0F0F0F0E1LL, 0xF0F0F0F0D2LL };
// See readme to choose the right interrupt number
const int interruptIR = 0;
int ledon=6;
int ledrx=5;
int ledtx=4;
char in='Z';
void setup() {

    pinMode(10, OUTPUT);
    pinMode(ledon, OUTPUT);
    pinMode(ledrx, OUTPUT);
    pinMode(ledtx, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("ENVIAR WIFI");
    radio.begin();
    // set protocol to user to use the decode function below
    IRLbegin<IR_USER>(interruptIR);
    radio.setRetries(15,15); // Maximos reintentos
    //radio.setPayloadSize(8); // Reduce el payload de 32 si tienes problemas

    // Open pipes to other nodes for communication
    radio.openWritingPipe(pipes[0]);
    radio.openReadingPipe(1,pipes[1]);
    digitalWrite(ledon, HIGH);
}
```

```

void loop() {

    // This will get the first valid input, blocks and ignores any new until its read

    while (Serial.available()) //while
    {

        radio.stopListening();
        char rxser= Serial.read();
        tx=rxser;
        radio.write( &rxser, sizeof(char) );
        for(i=1;i<=5;i++){
            radio.write( &tx, sizeof(char) );
            digitalWrite(ledtx, HIGH);
            delay(5*i);
            digitalWrite(ledtx, LOW);
            delay(3*i);
        }
    }

    if (IRLavailable())
    {

        dato=IRLgetCommand();
        letras(dato);
        Serial.print("LIFI RX: "); //ln
        Serial.println(in,BIN); //ln
        IRLreset();
        digitalWrite(ledrx, HIGH);
        delay(3);
        digitalWrite(ledrx, LOW);
        delay(30);
        digitalWrite(ledrx, HIGH);
        delay(30);
        digitalWrite(ledrx, LOW);
        delay(30);
        digitalWrite(ledrx, HIGH);
    }
}

```



```
    delay(30);
    digitalWrite(ledrx, LOW);
}
}
void decodeIR(const uint32_t duration)
{
    decodeNec(duration);
    decodePanasonic(duration);
}
void letras(int dato)
{
    switch (dato)
    {

        case 64770:
            in='a';
            break;

        case 40290:
            in='b';
            break;

        case 22440:
            in='c';
            break;

        case 56610:
            in='d';
            break;

        case 15810:
            in='e';
            break;

        case 38760:
            in='f';
            break;
```

```
    case 26520:
in='g';
break;
    case 20400:
in='h';
break;
    case 53040:
in='i';
break;
    case 59160:
in='j';
break;
    case 34170:
in='k';
break;
    case 61200:
in='l';
break;
    case 51000:
in='m';
break;
    case 42330:
in='n';
break;
    case 46410:
in='o';
break;
    case 48450:
in='p';
break;
    case 44370:
in='q';
break;
    case 49215:
in='r';
break;
```

```
    case 16575:
in='s';
break;
    case 32895:
in='t';
break;
    case 57375:
in='u';
break;
    case 24735:
in='v';
break;
    case 41055:
in='w';
break;
    case 8415:
in='x';
break;
    case 53295:
in='y';
break;
    case 61455:
in='z';
break;
default:
break;
}
}
```

## ANEXO E Código de programación del Módulo Emisor Lifi – receptor Wifi

```
#include "IRLremote.h"
#include <SPI.h>
#include "nRF24L01.h"
#include "RF24.h"
const int led = 8;
const int pinSendIR = 7;
const int pinSend = 5;
const int ledon = 6;
const int ledrx = 4;
uint16_t address ;
uint32_t command ;
char dato;
bool p=false;
char got_time;
int i=0;
String dat="";
RF24 radio(9,10);
const uint64_t pipes[2] = { 0xF0F0F0F0E1LL, 0xF0F0F0F0D2LL };
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  pinMode(pinSend, OUTPUT);
  pinMode(led, OUTPUT);
  pinMode(ledrx, OUTPUT);
  pinMode(ledon, OUTPUT);
  digitalWrite(led, HIGH);
  digitalWrite(ledon, HIGH);
  radio.setRetries(15,15);
  //radio.setPayloadSize(8);
  radio.startListening();
  radio.openWritingPipe(pipes[1]);
  radio.openReadingPipe(1,pipes[0]);
  Serial.println("LISTO"); //ln
```

```

}
void loop()
{

if ( radio.available() ) // Si hay datos disponibles
{

    bool done = false;
    if(!done)    // Espera aqui hasta recibir algo
    {

        done = radio.read( &got_time, sizeof(char) );
        Serial.print("WIFI RX = ");
        Serial.print(got_time);
        delay(20); // Para dar tiempo al emisor
    }
    lifitx();
    radio.startListening(); // Volvemos a la escucha para recibir mas paquetes

}

/*
if (Serial.available()) //while
{

i++;
    p=true;
    char dato= Serial.read();
    Serial.println(dato); //ln
    dat=dat+dato;

}

if(p==true)
{
p=false;

```

```
////////////////////////////////////
for(int y=0;y<i;y++)
{
    base(dat[y]);

    IRLwrite(pinSendIR, address, command);
    IRLwrite(pinSend, address, command);

}
i=0;
dat="";

}

}
void lifitx(){

i++;
    p=true;
    dato=got_time;
    //char dato= Serial.read();
    Serial.print("      LIFI TX: "); //ln
    Serial.println(dato,BIN); //ln
    dat=dat+dato;

if(p==true)
{
    p=false;

////////////////////////////////////

for(int y=0;y<i;y++)
{
    base(dat[y]);

    IRLwrite(pinSendIR, address, command);
    IRLwrite(pinSend, address, command);
```

```
}  
i=0;  
dat="";  
  
}  
}  
void base(char letra)  
{  
switch (letra)  
{  
    case 'a':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF02FD;  
break;  
  
    case 'b':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF629D;  
break;  
  
    case 'c':  
address = 0x00;  
command = 0x00FFA857;  
break;  
  
    case 'd':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF22DD;  
break;  
  
    case 'e':  
address = 0x00;  
command = 0x00FFC23D;  
break;  
  
    case 'f':
```

```
address = 0x00;  
command = 0x00FF6897;  
break;
```

```
case 'g':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF9867;  
break;
```

```
case 'h':  
address = 0x00;  
command = 0x00FFB04F;  
break;
```

```
case 'i':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF30CF;  
break;
```

```
case 'j':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF18E7;  
break;
```

```
case 'k':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF7A85;  
break;
```

```
case 'l':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF10EF;  
break;
```

```
case 'm':  
address = 0x00;  
command = 0x00FF38C7;
```



break;

case 'n':

address = 0x00;

command = 0x00FF5AA5;

break;

case 'o':

address = 0x00;

command = 0x00FF4AB5;

break;

case 'p':

address = 0x00;

command = 0x00FF42BD;

break;

case 'q':

address = 0x00;

command = 0x00FF52AD;

break;

case 'r':

address = 0xF7;

command = 0x3FC0;

break;

case 's':

address = 0xF7;

command = 0xBF40;

break;

case 't':

address = 0xF7;

command = 0x7F80;

break;

```
    case 'u':  
address = 0xF7;  
command = 0x1FE0;  
break;
```

```
    case 'v':  
address = 0xF7;  
command = 0x9F60;  
break;
```

```
    case 'w':  
address = 0xF7;  
command = 0x5FA0;  
break;
```

```
    case 'x':  
address = 0xF7;  
command = 0xDF20;  
break;
```

```
    case 'y':  
address = 0xF7;  
command = 0x2FD0;  
break;
```

```
    case 'z':  
address = 0xF7;  
command = 0x20FF0;  
break;  
default:
```

```
break;
```

```
}
```

```
}
```