

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES



TEMA:

“ELABORACIÓN DE UN MÓDULO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO BASADO EL ESTUDIO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.7 PARA LA ASIGNATURA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES - CITEL”

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA DE TELECOMUNICACIONES**

AUTOR

LEIDY POLETH ESCOBAR CANGÁS

DIRECTOR

ING.JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERÓN, MSC.

Ibarra-2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DEL CONTACTO | | | |
|----------------------------|--|-----------------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD | 0401846241 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES | Escobar Cangás Leidy Poleth | | |
| DIRECCIÓN | Av. Jorge Guzmán Rueda y Tulipanes | | |
| E-MAIL | lpescobar@utn.edu.ec | | |
| TELÉFONO FIJO | 062979032 | TELÉFONO MÓVIL | 0998638659 |

| DATOS DE LA OBRA | |
|------------------|---|
| TÍTULO | “Elaboración de un módulo de prácticas de laboratorio basado el estudio del estándar IEEE 802.15.7 para la asignatura de comunicaciones inalámbricas en la carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones - CITEL” |
| AUTOR | Escobar Cangás Leidy Poleth |
| FECHA | 17/11/2023 |
| PROGRAMA | <input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO |
| TÍTULO | Ingeniera de Telecomunicaciones |
| DIRECTOR | Msc. Jaime Roberto Michilena Calderón |
| ASESOR | Msc. Edgar Maya Olalla |

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de noviembre de 2023

EL AUTOR:

Escobar Cangás Leidy Poleth



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

MAGISTER JAIME MICHILENA, DIRECTOR DEL PRESENTE TRABAJO DE
TITULACIÓN CERTIFICA:

Que, el presente trabajo de Titulación "ELABORACIÓN DE UN MÓDULO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO BASADO EL ESTUDIO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.7 PARA LA ASIGNATURA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES - CITEL" Ha sido desarrollado por la señorita Escobar Cangás Leidy Poleth bajo mi supervisión.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor de la verdad.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Jaime", is written over a horizontal dotted line. A solid horizontal line is drawn below the dotted line, and the signature extends downwards across it.

Ing. Jaime Roberto Michilena Calderón, MsC.

C.I. 100219843-8

DIRECTOR

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios y a mis padres,

En la inmensidad del universo, Dios, resplandece en mi interior pues siempre ha sido mi fortaleza, fe, guía y devoción. Y en la tierra 2 pilares resguardan mi ser, mis padres amor implacable, quienes con su apoyo constante enaltecieron mi ser.

A Dios y a mis padres, esta obra dedico con fervor.

Escobar Cangás Leidy Poleth

AGRADECIMIENTO

Con sincero corazón, dedico este mensaje a aquellos que han sido faro eterno de sabiduría en mi camino. A Dios y a la virgen de La Paz, que han iluminado cada paso de este trayecto, mi gratitud se eleva como una plegaria llena de humildes palabras.

A mi amados padres, Edi y Rosi, cimientos sólidos de amor incondicional, les agradezco desde lo más profundo de mi ser. Su guía, apoyo y consuelo ha sido la fortaleza que ha sostenido mis sueños con infinita paciencia y cariño.

A mis queridos hermanos, Dani y Cris, con quienes he tejido lazos indestructibles, les dedico mi más profundo agradecimiento. En cada risa compartida y en cada lágrima consolada, encontré la fuerza para seguir adelante.

A ti, mi amado Klay, refugio en cada emoción, dedico este verso con el latido de mi corazón como tinta. Tu presencia ha sido un faro luminoso en los momentos de oscuridad, y tu amor ha sido mi más dulce inspiración.

A ustedes mis fieles mascotas, compañeros leales de mi corazón, su presencia amorosa ha sido un bálsamo en los momentos de soledad y ansiedad.

Que este trayecto sea un tributo a su constante apoyo, y que en cada página escrita se refleje el legado que dejaron en mi vida. En el reconocimiento de esta dedicación, se manifiesta el amor que diluye todas las dificultades. Con gratitud eterna y un corazón vibrante, los llevaré en cada instante de mi existencia.

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----------|
| CAPÍTULO I: ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1. Tema..... | 1 |
| 1.2. Problema..... | 1 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.3.1. Objetivo General..... | 3 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 3 |
| 1.4. Alcance..... | 4 |
| 1.5. Justificación – Detalle del Impacto | 6 |
| CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO..... | 8 |
| 2.1. Comunicaciones Inalámbricas..... | 8 |
| 2.2. Comunicaciones por Luz Visible | 8 |
| 2.2.1. Espectro de Luz Visible (VLC) | 10 |
| 2.2.2. Ventajas y Desventajas de los sistemas de comunicaciones VLC | 11 |
| 2.2.3. Aplicaciones de sistemas VLC | 13 |
| 2.3. Li-Fi (Light Fidelity)..... | 14 |
| 2.3.1. Historia de LiFi..... | 14 |
| 2.3.2. Funcionamiento de LiFi..... | 15 |
| 2.3.2.1. Componentes Ópticos de LiFi..... | 17 |
| 2.4. IEEE 802.15.7 | 19 |
| 2.4.1. Topologías | 19 |
| 2.4.2. Arquitectura | 20 |
| 2.4.3. Subcapa MAC..... | 21 |
| 2.4.3.1. Acceso al canal..... | 21 |
| 2.4.3.2. Inicio de una VPAN | 26 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.4.3.3. | Establecimiento de conexión..... | 26 |
| 2.4.3.4. | Formato de tramas MAC..... | 29 |
| 2.4.3.5. | Espacio entre tramas (IFS)..... | 36 |
| 2.4.4. | Capa PHY..... | 37 |
| 2.4.4.1. | Frecuencias..... | 37 |
| 2.4.4.2. | Longitud de onda..... | 37 |
| 2.4.4.3. | Mapeo Óptico..... | 38 |
| 2.4.4.4. | Técnicas de Modulación en capa PHY..... | 38 |
| 2.4.4.5. | Formato de trama física PPDU..... | 40 |
| 2.4.4.6. | Tipos de PHY..... | 42 |
| 2.4.4.7. | Duración del símbolo..... | 43 |
| 2.4.4.8. | Canales..... | 44 |
| 2.4.5. | Seguridad..... | 44 |
| CAPÍTULO III: REQUERIMIENTOS..... | | 46 |
| 3.1. | Análisis..... | 46 |
| 3.1.1. | Metodología de diseño..... | 46 |
| 3.2. | Análisis de requisitos y requerimientos..... | 46 |
| 3.2.1. | Situación Actual..... | 46 |
| 3.2.1.1. | Estructura del Laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas..... | 47 |
| 3.2.1.2. | Número de usuarios..... | 49 |
| 3.2.2. | Propósito del sistema..... | 49 |
| 3.2.3. | Impacto Ambiental..... | 50 |
| 3.2.4. | Impacto económico..... | 50 |
| 3.2.5. | Descripción General del Sistema..... | 51 |
| 3.2.6. | Requerimientos..... | 52 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.2.6.1. | Requerimientos de Stakeholders | 53 |
| 3.2.6.2. | Requerimientos del Sistema | 54 |
| 3.2.6.3. | Requerimientos de Arquitectura..... | 55 |
| 3.2.7. | Recursos..... | 56 |
| 3.2.7.1. | Recursos Humanos | 56 |
| 3.2.7.2. | Recursos Tecnológicos..... | 57 |
| 3.2.8. | Elección del Hardware..... | 58 |
| 3.2.8.1. | LiFiMAX..... | 59 |
| 3.2.9. | Elección de Software | 64 |
| 3.2.9.1. | D-ITG | 65 |
| 3.2.9.2. | Wireshark | 66 |
| 3.2.9.3. | IPerf..... | 66 |
| CAPÍTULO IV: DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN | | 67 |
| 4.1. | Diseño..... | 67 |
| 4.1.1. | Diagramas de funcionamiento | 67 |
| 4.1.1.1. | Diagrama de topología de red | 67 |
| 4.1.1.2. | Diagrama de arquitectura del sistema | 68 |
| 4.1.1.3. | Diagrama funcionamiento del sistema LiFi | 69 |
| 4.1.1.1. | Diagrama de seguridad..... | 72 |
| 4.1.2. | Escenarios de pruebas..... | 73 |
| 4.1.2.1. | Dimensionamiento | 74 |
| 4.1.2.2. | Direccionamiento | 75 |
| 4.2. | Implementación | 76 |
| 4.2.1. | Montaje de red LiFi | 78 |
| 4.3. | Evaluación..... | 79 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4.3.1. | Captura de paquetes..... | 81 |
| CAPÍTULO V: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y GUÍAS DE LABORATORIO.. 83 | | |
| 5.1. | Pruebas de rendimiento de la LiFi..... | 83 |
| 5.1.1. | Escenario 1: Sin interferencias (Ideal)..... | 85 |
| 5.1.2. | Escenario 2: Interferencia de luz natural externa | 91 |
| 5.1.3. | Escenario 3: Interferencia de luz artificial..... | 95 |
| 5.1.4. | Escenario 4: Interferencia Combinada | 100 |
| 5.1.5. | Escenario 5: Cobertura y alcance de la red LiFi..... | 104 |
| 5.1.6. | Escenario 6: Multiusuarios | 110 |
| 5.1.7. | Escenario 7: Obstrucciones Físicas | 116 |
| 5.2. | Recopilación de resultados obtenidos por las métricas de medición | 118 |
| 5.2.1. | Ancho de banda | 118 |
| 5.2.2. | Bitrate | 120 |
| 5.2.3. | Retardo (Delay) | 121 |
| 5.2.4. | Jitter | 122 |
| 5.2.5. | Pérdida de paquetes | 124 |
| 5.3. | Módulo de guías de laboratorio..... | 125 |
| 5.3.1. | Guía 1: “Configuración y análisis de la cobertura LiFi en un entorno controlado”..... | 126 |
| 5.3.2. | Guía 2: “Evaluación del rendimiento de LiFi (IEEE 802.15.7)”..... | 128 |
| 5.3.3. | Guía 3: “Evaluación de QoS en una red LiFi” | 131 |
| 5.3.4. | Guía 4: “Evaluación de la seguridad LiFi frente a ataques de hombre en el medio (MITM) en comparación con WiFi.” | 134 |
| CONCLUSIONES..... | | 137 |
| RECOMENDACIONES..... | | 138 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 139 |

ANEXOS 144

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Región del espectro de luz visible (VLC)..... | 10 |
| Figura 2 | Funcionamiento de la tecnología Li-Fi..... | 16 |
| Figura 3 | Diagrama de Bloques de un Sistema IM/DD..... | 18 |
| Figura 4 | Tipos de topologías..... | 20 |
| Figura 5 | Arquitectura de un Dispositivo VPAN según la IEEE 802.15.7..... | 21 |
| Figura 6 | Estructura de la supertrama en IEEE 802.15.7..... | 23 |
| Figura 7 | Diagrama del proceso de asociación de una VPAN sin ACK..... | 27 |
| Figura 8 | Diagrama del proceso de asociación de una VPAN con ACK..... | 28 |
| Figura 9 | Formato General de trama MAC..... | 31 |
| Figura 10 | Formato de trama de baliza..... | 32 |
| Figura 11 | Formato de trama de acuse de recibo..... | 33 |
| Figura 12 | Formato trama de comandos..... | 34 |
| Figura 13 | Formato trama CVD..... | 36 |
| Figura 14 | Espaciado entre tramas (IFS – Interframe Spacing)..... | 36 |
| Figura 15 | Sistema de comunicación basado en HACO-OFDM..... | 40 |
| Figura 16 | Formato de la PPDU de LiFi..... | 41 |
| Figura 17 | Modelo PHY II IEEE 802.15.7..... | 43 |
| Figura 18 | Seguridad en LiFi..... | 45 |
| Figura 20 | Plano 2D dimensiones del laboratorio de CI..... | 48 |
| Figura 21 | Plano de diseño eléctrico ¿..... | 49 |
| Figura 22 | Funcionamiento general del sistema..... | 51 |
| Figura 23 | Punto de Acceso LiFiMAX..... | 61 |
| Figura 24 | Antena fotónica LiFiMAX..... | 62 |
| Figura 25 | Dongle LiFiMAX..... | 63 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 26 | Diseño de topología de la red | 68 |
| Figura 27 | Diagrama de arquitectura del sistema | 69 |
| Figura 28 | Diagrama de bloques del funcionamiento interno del sistema LiFi | 70 |
| Figura 29 | Diagrama de flujo del sistema LiFi..... | 71 |
| Figura 30 | Diagrama de seguridad de LiFi..... | 72 |
| Figura 31 | Accesorios de montaje del sistema LiFi | 77 |
| Figura 32 | Puertos AP LiFi | 77 |
| Figura 33 | Conexión AP y antena fotónica | 78 |
| Figura 34 | Verificación de conexión entre el AP y la antena..... | 78 |
| Figura 35 | Red LiFi operativa en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas | 79 |
| Figura 36 | Verificación de conexión desde el dongle a la antena fotónica | 80 |
| Figura 37 | Adaptador de red por LiFi..... | 81 |
| Figura 38 | Direcciones MAC Específicas | 82 |
| Figura 39 | Configuración D-ITG modo Emisor..... | 84 |
| Figura 40 | Escenario de prueba 1 (Sin interferencia lumínica)..... | 85 |
| Figura 41 | Ancho de banda absoluto E1 TCP | 86 |
| Figura 42 | Bitrate E1 | 87 |
| Figura 43 | Delay E1 | 88 |
| Figura 44 | Jitter E1 | 88 |
| Figura 46 | Escenario de prueba 2 (Interferencia por luz ambiental)..... | 91 |
| Figura 47 | Ancho de banda absoluto E2 TCP | 91 |
| Figura 48 | Bitrate E2 | 92 |
| Figura 49 | Delay E2 | 93 |
| Figura 50 | Jitter E2..... | 93 |
| Figura 52 | Escenario de prueba 3 (Interferencia por luz artificial) | 95 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 53 | Ancho de banda absoluto E3 TCP | 96 |
| Figura 54 | Bitrate E3 | 97 |
| Figura 55 | Delay E3 | 97 |
| Figura 56 | Jitter E3 | 98 |
| Figura 57 | Pérdida de paquetes E3 | 99 |
| Figura 58 | Escenario de prueba 4 (Interferencia combinada) | 100 |
| Figura 59 | Ancho de banda absoluto E4 TCP | 101 |
| Figura 60 | Bitrate E4 | 101 |
| Figura 61 | Delay E4 | 102 |
| Figura 62 | Jitter E4 | 102 |
| Figura 63 | Pérdida de paquetes E4 | 103 |
| Figura 64 | Escenario de prueba 5 (Cobertura - alcance) | 104 |
| Figura 65 | Ancho de banda Absoluto E5 TCP | 106 |
| Figura 66 | Bitrate E5 | 106 |
| Figura 67 | Delay E5 | 107 |
| Figura 68 | Jitter E5 | 108 |
| Figura 69 | Pérdida de paquetes E5 | 109 |
| Figura 70 | Escenario 6 (Multiusuarios)..... | 111 |
| Figura 71 | Multiusuarios conectamos simultáneamente. | 111 |
| Figura 72 | Ancho de banda Absoluto E6 TCP | 112 |
| Figura 73 | Bitrate E6 | 112 |
| Figura 74 | Delay E6 | 113 |
| Figura 75 | Jitter E6 | 114 |
| Figura 76 | Pérdida de paquetes E6 | 115 |
| Figura 77 | Escenario 7 (Diseño físico)..... | 116 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Figura 78 | Caída de velocidad por obstrucciones físicas | 117 |
| Figura 79 | Resumen ancho de banda escenarios LiFi TCP | 119 |
| Figura 80 | Resumen Bitrate escenarios LiFi UDP | 120 |
| Figura 81 | Resumen retardo escenarios LiFi UDP | 121 |
| Figura 82 | Resumen jitter escenarios LiFi UDP | 123 |
| Figura 83 | Resumen pérdida de paquetes escenarios LiFi | 124 |
| Figura 84 | Conexión PC a LiFi | 144 |
| Figura 85 | Ubicaciones para pruebas LiFi..... | 145 |
| Figura 86 | Test de velocidad | 145 |
| Figura 87 | Mapa de calor LiFi..... | 146 |
| Figura 88 | Instalación de Iperf en Linux | 147 |
| Figura 89 | Instalación de Iperf en Windows | 147 |
| Figura 90 | Verificación de conexión entre cliente-servidor IPerf | 148 |
| Figura 91 | AB básico..... | 149 |
| Figura 92 | AB bidireccional | 149 |
| Figura 93 | Jitter con UDP..... | 150 |
| Figura 94 | Pérdida de paquetes | 150 |
| Figura 95 | Througput Lab 2 | 151 |
| Figura 96 | Múltiples transmisiones LiFi | 151 |
| Figura 97 | Instalación Issabel PBX | 152 |
| Figura 98 | Extensiones PBX | 153 |
| Figura 99 | Cuentas Softphones..... | 153 |
| Figura 100 | Llamada VoIP bajo LiFi | 154 |
| Figura 101 | Paquetes RTP bajo LiFi | 154 |
| Figura 102 | Análisis RTP bajo LiFi | 155 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Figura 103 | Jitter y pérdida de paquetes bajo LiFi..... | 155 |
| Figura 104 | Cambio de tarjeta de red | 156 |
| Figura 105 | Jitter y pérdida de paquetes bajo WiFi..... | 156 |
| Figura 106 | Topología Práctica N4 | 158 |
| Figura 107 | MV Mesopotable | 159 |
| Figura 108 | Escaneo de host WiFi | 159 |
| Figura 109 | Selección de targets | 160 |
| Figura 110 | Captura de paquetes 1 con Wireshark..... | 160 |
| Figura 111 | Ataque de MITM bajo LiFi | 161 |
| Figura 112 | Acceso desde usuario 1 a usuario 2. | 161 |
| Figura 113 | Verifique la captura de paquetes HTTP | 162 |
| Figura 114 | Visualización de información vulnerada | 162 |
| Figura 115 | Paquetes filtrados HTTP antes del ataque | 163 |
| Figura 116 | Sondeo de host desde máquina atacante WiFi..... | 164 |
| Figura 117 | Ataque de MITM bajo WiFi | 164 |
| Figura 118 | Usuario 1 y 2 bajo LiFi | 165 |
| Figura 119 | Encriptación de datos fallida..... | 165 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 1 | Rangos de longitud de onda y frecuencias de cada color del VLC | 11 |
| Tabla 2 | Ventajas y Desventajas de los sistemas de comunicaciones VLC..... | 12 |
| Tabla 3 | Tabla Comparativa entre Sistemas IM/DD y de Radio | 18 |
| Tabla 4 | Atributos MAC I..... | 23 |
| Tabla 5 | Atributos MAC II..... | 25 |
| Tabla 6 | Atributos MAC III | 29 |
| Tabla 7 | Descripción de campos del formato general de trama MAC..... | 31 |
| Tabla 8 | Descripción de campos de trama de baliza | 32 |
| Tabla 9 | Descripción de campos de trama de acuse de recibo (ACK)..... | 34 |
| Tabla 10 | Descripción Trama de Comandos..... | 35 |
| Tabla 11 | Diferencias de las Técnicas de Modulación para LiFi..... | 38 |
| Tabla 12 | Nomenclatura de Requerimientos..... | 52 |
| Tabla 13 | Lista de Stakeholders | 53 |
| Tabla 14 | Requerimientos de Stakeholders..... | 53 |
| Tabla 15 | Requerimientos del Sistema..... | 54 |
| Tabla 16 | Requerimientos del Arquitectura | 55 |
| Tabla 17 | Recursos Humanos | 56 |
| Tabla 18 | Recursos Tecnológicos | 57 |
| Tabla 19 | Comparativa de sistemas LiFi..... | 58 |
| Tabla 20 | Características del AP de LiFiMAX | 61 |
| Tabla 21 | Características de las antenas fotónicas de LiFiMAX..... | 62 |
| Tabla 22 | Características de los dongles de LiFiMAX | 64 |
| Tabla 23 | Comparativa herramientas de análisis de tráfico | 65 |
| Tabla 24 | Direccionamiento dispositivos de prueba | 75 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Tabla 25 | Terminología IPerf..... | 83 |
| Tabla 26 | Parámetros de inyección de tráfico D-ITG ¡Error! Marcador no definido. | |
| Tabla 27 | Resultados E1 | 90 |
| Tabla 28 | Resultados E2 | 95 |
| Tabla 29 | Resultados E3 | 99 |
| Tabla 30 | Resultados E4 | 104 |
| Tabla 31 | Resultados E5 | 109 |
| Tabla 32 | Resultados E6 | 115 |
| Tabla 33 | Parámetros Iperf a utilizar..... | 148 |
| Tabla 34 | Resultados VoIP LiFi vs WiFi..... | 157 |
| Tabla 35 | Direccionamiento WiFi topología P4 | 158 |
| Tabla 36 | Direccionamiento LiFi/WiFi..... | 163 |

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo el desarrollo de un módulo de prácticas de laboratorio enfocado en el estudio de LiFi, bajo el estándar IEEE 802.15.7. La investigación se lleva a cabo en el laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica del Norte, y está dirigida a los estudiantes de sexto semestre de la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas.

LiFi, a diferencia del WiFi tradicional, utiliza ondas de luz ópticas para transmitir datos de forma inalámbrica. Esta tecnología, basada en sistemas VLC (Visible Light Communications), ofrece ventajas significativas, como mayor velocidad, ancho de banda y menor interferencia con otros dispositivos de RF.

La investigación se centra en analizar LiFi en diversos escenarios y abordar los desafíos específicos que tiene esta tecnología, como la interferencia de luz artificial, natural, así como la cobertura. Se evalúa el rendimiento de la red en estos contextos y se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las métricas recopiladas para corroborar la concordancia con la teoría correspondiente.

Para llevar a cabo las pruebas, se utiliza el sistema LiFiMAX, conocido por su robustez y capacidad para transmitir datos utilizando luz visible como medio de transmisión. Se emplearán diversas herramientas de análisis de tráfico para medir con precisión el ancho de banda, el bitrate, el jitter, la pérdida de paquetes y el retardo de la red.

Como resultado final, se generarán cuatro guías de laboratorio con objetivos y actividades prácticas relacionadas con LiFi bajo el estándar IEEE 802.15.7. La contribución de este trabajo en el campo de las comunicaciones inalámbricas es valorada por la comunidad académica, ya que ayudará a los estudiantes a aplicar conocimientos teóricos y prácticos, desarrollar habilidades y enfrentar desafíos laborales con propuestas innovadoras.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is the development of a laboratory practice module focused on LiFi technology, based on the thorough study of the IEEE 802.15.7 standard. This research is being conducted in the wireless communications laboratory at the Faculty of Applied Sciences of the Technical University of the North.

Unlike conventional WiFi, LiFi uses optical light waves to wirelessly transmit data. This technology, based on Visible Light Communications (VLC) systems, offers significant advantages such as higher transmission speed, wider bandwidth, and lower interference with other RF devices.

The research focuses on analyzing LiFi technology, considering various scenarios and specific challenges it faces, such as interference with artificial light, natural light, and combined interference. The performance of the LiFi network is evaluated in each of these scenarios, followed by a thorough analysis of the metrics obtained.

To conduct the evaluations, the LiFiMAX system is utilized, known for its robustness and ability to transmit data using visible light as the transmission medium. Various traffic analysis tools will be employed to accurately measure the bandwidth, bitrate, jitter, packet loss, and latency of the LiFi network.

As an outcome, four laboratory guidebooks will be generated, offering different objectives and practical activities related to LiFi technology. The contribution of this work in the field of wireless communications is highly valued by the academic community, as it will assist students in applying theoretical and practical knowledge, developing skills, and addressing workplace challenges with innovative solutions.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

Este capítulo da a conocer las principales directrices del trabajo de grado en desarrollo, en el cual se considera la problemática, objetivos, el alcance, justificación y el detalle de impacto, con el fin de mostrar la relevancia del estudio propuesto en el presente proyecto.

1.1. Tema

ELABORACIÓN DE UN MÓDULO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO BASADO EL ESTUDIO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.7 PARA LA ASIGNATURA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES – CITEL.

1.2. Problema

El primer prototipo en las comunicaciones inalámbricas fue creado por Alexander Graham Bell quién desarrollo un fonógrafo el cual permitía la transmisión de diferentes sonidos resaltando las comunicaciones entre humanos mediante un haz de luz (Albor, 2014). Sin embargo, este descubrimiento quedo en el olvido ya que no recibió mucha atención en ese entonces. Tiempo después surgieron las comunicaciones cableadas y posteriormente a lo que hoy en día se conoce como WiFi, esta es una de las tecnologías inalámbricas más utilizada por millones de usuarios a nivel mundial que ha evolucionado para dar mejoras a los usuarios con el pasar de los años y solventar sus necesidades. (Galeano Susana, 2022). Sin embargo, en el año 2011 Harald Hass ingeniero y profesor de comunicaciones móviles de la Universidad de Edimburgo quien en una charla TED pronunció por primera vez una tecnología inalámbrica conocida como LiFi, una conexión que permite velocidades hasta 100 veces mayores de las que permite WiFi, transmitiendo los datos a través de la luz (Ortiz Fernanda, 2016), retomando así la investigación realizada por Alexander Graham Bell. Desde entonces, diferentes entidades han incursionado a probar y a aportar con investigaciones sobre LiFi para

ambientes laborales dedicados, por ejemplo según (Buendía José, 2016) Samsung, ETRI (Electronics and Telecommunications Research Institute, también de Corea del Sur) Universidad Kookmin (Corea del Sur), Panasonic y Tamura incursionaron en la investigación de esta tecnología.

Actualmente, esta tecnología inalámbrica es desconocida por muchas personas, pese a que ya tiene algunos años en el campo de las telecomunicaciones. En Ecuador, algunas universidades en sus sílabos de contenido presentan como breves conceptos a LiFi; sin embargo, no se da a conocer el verdadero potencial que podría ejercer hoy y en el futuro esta tecnología. Exactamente, en la Universidad Técnica del Norte en la carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones sucede lo anteriormente nombrado, según una entrevista al Ing. Jaime Michilena docente de la asignatura de comunicaciones inalámbricas existen diferentes causas para que exista esta falta de impartición de conocimientos teóricos y prácticos de LiFi, entre ellas la falta de instrumentos para entender didácticamente el comportamiento de la tecnología en la asignatura, debido a que existe una enseñanza constante de redes basadas en WiFi, esto ocasiona que los estudiantes tengan un aprendizaje autónomo y limitado. Además, es importante destacar que los laboratorios están equipados con instrumentos específicos para el estudio de las tecnologías basadas en el estándar IEEE 802.11. Sin embargo, debido a esta limitación, hay una carencia en el conocimiento técnico sobre LiFi en las aulas, otra de las principales razones que contribuyen a esta problemática es la falta de capacitación en el uso y mantenimiento de equipos LiFi. Como resultado, muchos estudiantes no están familiarizados con el estándar IEEE 802.15.7 y LiFi como tecnología propia, lo que genera una inquietud en aquellos que desean profundizar en el tema.

Con el fin de solventar la problemática mencionada, se propone diseñar e implementar un módulo de prácticas de laboratorio. Este módulo se orientará al estudio técnico y teórico del estándar IEEE 802.15.7 mediante la implementación de equipos LiFi en el laboratorio de

la asignatura de comunicaciones inalámbricas de la carrera Ingeniería de Telecomunicaciones (CITEL). Así, los estudiantes podrán adquirir conocimiento para la utilización y empleo de dispositivos LiFi dentro del ámbito académico sobre todo en el aprendizaje de la asignatura, el cual será reforzado con las prácticas, proporcionando un balance positivo entre la teoría y la práctica y así formar a profesionales con conocimientos aptos para manejar diferentes equipos en el campo laboral, además de solventar diferentes problemas con nuevas soluciones.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar un módulo de prácticas de laboratorio basado el estudio del estándar IEEE 802.15.7 para la asignatura de comunicaciones inalámbricas en la carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones - CITEL.

1.3.2. Objetivos Específicos

Realizar un estudio teórico del estándar IEEE 802.15.7 detallando su funcionamiento y características principales mediante una investigación bibliográfica, que permitirá el análisis, diseño y desarrollo del proyecto.

Definir los requerimientos de los módulos LiFi para la implementación en el laboratorio de la asignatura de comunicaciones inalámbricas de CITEL.

Evaluar el rendimiento de la tecnología en base a métricas de comportamiento como: retardo, jitter, paquetes perdidos, bitrate, cobertura, seguridad del estándar IEEE 802.15.7

Elaborar las guías de prácticas de laboratorio que incluyan la utilización de los módulos LiFi para la asignatura de comunicaciones inalámbricas de CITEL.

1.4. Alcance

El presente proyecto de investigación estará enfocado en el estudio técnico y teórico del estándar IEEE 802.15.7, el escenario donde se llevará a cabo la propuesta del proyecto es en el laboratorio de la asignatura de comunicaciones inalámbricas en la carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte para los estudiantes que cursan la materia asignada a 6to semestre. El objetivo es aportar con el refuerzo de la enseñanza y aprendizaje entre estudiante-profesor de nuevas tecnologías inalámbricas como lo es LiFi mediante diferentes prácticas de laboratorio que incursionan al conocimiento teórico-práctico de la misma. El proyecto utiliza una metodología en cascada, este modelo divide los procesos del desarrollo en sucesivas fases que se ejecutan de manera secuencial, cada fase debe ser finalizada antes de avanzar a la fase siguiente. (Laoyan Sarah, 2021).

En principio, los recursos bibliográficos son de vital importancia para la obtención de bases teóricas, por lo que se realizará una revisión detallada de la literatura frente al tema planteado donde se abordarán temas como el funcionamiento de la tecnología, características, ventajas y desventajas, entendiendo los parámetros necesarios para medir su rendimiento. Información importante que posteriormente ayudará a la elaboración de las guías prácticas, tomando en cuenta que el principal recurso de información es la norma en la que está basado el estándar IEEE 802.15.7.

En la fase 1 correspondiente al análisis se incluye un estudio de viabilidad y una definición de los requisitos. El estudio de viabilidad se estudian los costos, la rentabilidad y la factibilidad de proyecto; mientras que en la definición detallada de los requisitos se incluye que funciones y que características debe de ofrecer el presente proyecto. En la segunda fase de diseño, se realiza el estudio de la arquitectura del proyecto, donde se centra en el diseño de la topología, la infraestructura física e inalámbrica para la implementación de los módulos y diferentes materiales necesarios para llevar a cabo el propósito.

En la tercera fase se implementa los equipos de la tecnología LiFi en base a la topología diseñada, en el laboratorio de la asignatura de comunicaciones inalámbricas (fase 2), teniendo en cuenta materiales y equipos extras que serán de utilidad para el montaje de la red, en la cual se debe de considerar el entorno debido a que LiFi es susceptible ante la presencia de objetos que podrían causar fácilmente interferencia en la recepción de la señal y debe estar disponible en un lugar alto, similar a la implementación de una bombilla de luz, otro aspecto importante a considerar es el número de usuarios que utilizarán los módulos, ya que los dispositivos actuales no contienen una tarjeta inalámbrica dedicada a esta tecnología y por ello se hace uso de un fotoreceptor LiFi que ingresa como puerto USB reconocido por el dispositivo como una tecnología definida por el estándar IEEE 802.11 (Benítez, 2019). Por lo tanto, en esta fase se implementan los módulos en el laboratorio, tomando en cuenta las normas de seguridad dadas por la empresa proveedora. El sistema encargado de la transmisión y recepción de las señales se encuentra anclado en el Punto de Acceso (AP). Cada AP LiFi es capaz de conectar a varios usuarios al mismo tiempo, permitiendo al usuario moverse de un AP a otro sin la necesidad de que exista una configuración manual de por medio. Además, se toma en cuenta el modelo agregado definido por la arquitectura de LiFi el cual señala que el usuario se conecta por WiFi y LiFi en paralelo, este sistema agregado define que tanto el WiFi como el LiFi utilizan la comunicación bidireccional para mejorar el rendimiento y lograr una conectividad robusta (Arteaga, 2020), criterios importantes que se toman en cuenta para que exista un desempeño en la red adecuado.

En la fase de verificación se comprueba que el funcionamiento de los módulos sea el adecuado, además, se evalúan métricas como: retardo, jitter, paquetes perdidos, bitrate, cobertura, seguridad, del IEEE 802.15.7 realizando diferentes pruebas en base a los módulos que se implementaron. Este tipo de métricas serán analizadas mediante diferentes herramientas tipo Sniffer que ayudarán a observar el nivel de retardo, jitter, pérdida de

paquetes, bitrate, rendimiento que tiene Li-Fi inyectando diferentes escenarios de tráfico, y así poder comparar los resultados obtenidos con los criterios teóricos, para posteriormente llevar a cabo la elaboración de las guías de prácticas de laboratorio con sus respectivas directrices y soluciones para la asignatura de comunicaciones inalámbricas que incluyen la utilización de los módulos LiFi, donde se abarcarán temas como, el análisis de la cobertura y seguridad, la comprobación de la calidad de servicio (QoS) que ofrece esta tecnología enviando diferentes tipos de tráfico, como también el análisis comparativo entre la red de la universidad y la red LiFi tomando en cuenta las métricas anteriormente analizadas.

Finalmente, en la última fase de mantenimiento se aplica las prácticas de laboratorio a los estudiantes de la asignatura de comunicaciones inalámbricas dirigidas por el docente de la asignatura, por el técnico-docente y por el autor del proyecto, de tal forma que luego de verificar el funcionamiento (fase 4) se podrá realizar el mantenimiento de los módulos al momento de que los estudiantes realizan diferentes pruebas. Si en el transcurso de la aplicación de las prácticas se producen errores inesperados, se busca las mejores soluciones a los mismos para mitigarlos.

1.5. Justificación – Detalle del Impacto

En la Universidad Técnica del Norte existe la carrera Ingeniería de Telecomunicaciones (CITEL), que forma a varios profesionales en el área de las comunicaciones, que poco a poco ha ido innovando sus metodologías de estudio, con el fin mejorar la calidad del aprendizaje en los alumnos tanto en el ámbito teórico como en el ámbito tecnológico-práctico. Es por ello que la carrera debe contar con los recursos adecuados para estar a la par con las nuevas tecnologías inalámbricas que hoy en día están incursionando.

El proyecto propuesto, es necesario para reforzar la enseñanza y aprendizaje entre el docente y el estudiante de forma teórica y práctica el manejo de una nueva tecnología inalámbrica, entendiendo el funcionamiento del estándar IEEE 802.15.7 mediante prácticas de laboratorio, puesto a que la formación académica no solo depende del plano teórico sino de la experiencia adquirida durante la práctica.

Al hacer uso de estas estrategias de aprendizaje se puede obtener conocimientos tangibles para el estudiante, lo cual será ineludible para su desarrollo profesional. Así, la carrera de Telecomunicaciones podrá hacer referencia a su misión, la cual dice: “La Carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones forma ingenieros competentes, críticos, humanistas, líderes y emprendedores con responsabilidad social; genera, fomenta y ejecuta procesos tecnológicos, de conocimientos científicos y de innovación; se vincula con la comunidad, con criterios de sustentabilidad para contribuir al desarrollo social, económico, cultural y ecológico de la región y del país”(UTN, 2021), por lo tanto, al incursionar en el manejo de nuevos equipos tecnológicos, fomenta mejoras para el futuro académico de la institución, creando excelentes perfiles profesionales.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

Este capítulo proporciona una base teórica necesaria para comprender la tecnología LiFi y sentar las bases para el desarrollo del proyecto. Los aspectos teóricos a tratar incluyen las comunicaciones por luz visible, la historia y funcionamiento de LiFi, arquitectura de IEEE 802.15.7, abordando capa física (PHY) como subcapa de acceso al medio (MAC). Además, servirá como punto de referencia para definir los requisitos y requerimientos del capítulo III.

2.1. Comunicaciones Inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas han revolucionado la forma en que las personas se conectan y transmiten información, ya que eliminan la necesidad de cables. Estas tecnologías han ganado popularidad a nivel mundial debido a sus numerosas ventajas, como el desarrollo tecnológico, la movilidad, la optimización de actividades industriales y la seguridad de la información (Bosh C. & Itziar A., 2015).

Existen diferentes tecnologías inalámbricas las cuales difieren principalmente por la frecuencia de transmisión, la velocidad y el alcance, y cada una de ellas están destinadas para objetivos en específico (Salazar, 2015). Exactamente las tecnologías WPAN o redes de área personal son utilizadas en ambientes personales, de oficina, hogar, centros comerciales, etc. Las comunicaciones inalámbricas ópticas (OWC) se ubican dentro del ámbito de las redes WPAN y utilizan la luz visible como medio de transmisión.

2.2. Comunicaciones por Luz Visible

Actualmente, la mayoría de los sistemas de comunicación utilizan la banda de radiofrecuencia RF para llevar a cabo la comunicación a cortas o largas distancias. El rango de frecuencias va desde los 30 kHz a los 30 GHz y su uso es regulado por las autoridades de cada país.

En Ecuador, el espectro radioeléctrico está regularizado por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) donde menciona que en base a La Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT), publicada en el Registro Oficial el 18 de febrero de 2015 con el número 439, Título I, Capítulo I, sección de consideraciones introductorias sobre la gestión del espectro, establece en su artículo 1: “La LOT tiene por objeto establecer un marco común para las telecomunicaciones y el espectro como sectores estratégicos del Estado, abarcando las competencias de gestión, regulación, control y administración en todo el territorio nacional, con base en los principios y derechos constitucionalmente consagrados” (LOT, 2015).

La LOT hoy en día mantiene los mismos argumentos con el fin de resguardar las actividades que están ligadas al uso excesivo del espectro radioeléctrico. Así también lo menciona la LOT en enero del 2016 con Registro Oficial No. 676, Sección XII sobre recursos limitados y derechos de propiedad, Capítulo I, Sección 1. Artículo 88 Principios y objetivos para el uso del espectro radioeléctrico, el cual según la (LOT, 2015) menciona: “Es un recurso natural limitado sujeto a los objetivos de prevención, precaución y conservación; su administración, asignación, gestión, regulación, planificación y control se someterá a lo planteado por la Ley Orgánica de las Telecomunicaciones y quienes adoptan estos reglamentos son la ARCOTEL”.

Sin embargo, según (Molero P., 2018) en la última década el espectro radioeléctrico se ha visto saturado, debido a la gran demanda de ancho de banda, dada por millones de dispositivos que desean acceder a Internet a diario, como también el crecimiento de empresas que ofrecen servicios digitales; factores los cuales conducen a la necesidad de una tecnología inalámbrica alternativa. Una de las soluciones que han surgido ante esta problemática es ocupar una banda diferente a RF como lo es la banda del dominio óptico en las que se encuentran las sub-bandas infrarroja (IR), luz visible (VL) y ultravioleta (UV), surgiendo así

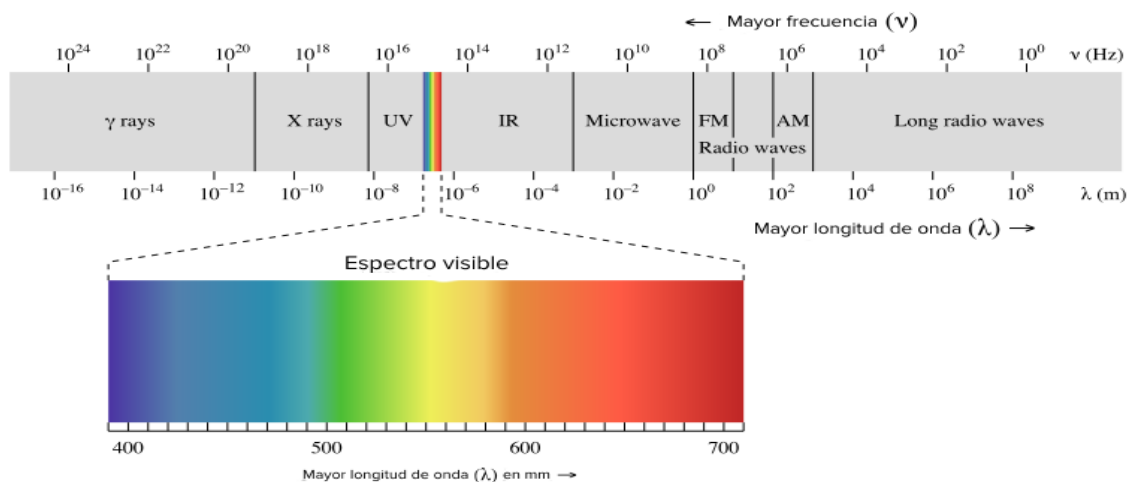
las comunicaciones ópticas inalámbricas OWC. Las OWC que operan en la banda de luz visible se le denomina VLC.

2.2.1. Espectro de Luz Visible (VLC)

El espectro de luz visible (VLC) es aquella región del espectro electromagnético en la cual se puede percibir por el ojo humano, está región se la conoce comúnmente como luz y tiene longitudes de onda comprendidas entre los 380 y 780 nm como se indica en la Figura 1 (Velázquez, 2016).

Figura 1

Región del espectro de luz visible (VLC)




Nota. Fuente: (Velázquez, 2016).

El espectro de luz visible, contiene varios colores, cada uno con su propio rango de frecuencias, y por ende longitudes de onda diferentes. La luz blanca abarca todo el espectro visible, la Tabla 1 detalla los rangos de longitud de onda (nm) y frecuencias (THz) para los colores comprendidos en la región del VLC.

Tabla 1

Rangos de longitud de onda y frecuencias de cada color del VLC



| Color | Longitud de onda (nm) | Frecuencia (THz) |
|--------------|------------------------------|-------------------------|
| Violeta | 380-450 | 669-789 |
| Azul | 450-475 | 631-668 |
| Cian | 476-495 | 606-630 |
| Verde | 496-570 | 526-605 |
| Amarillo | 470-590 | 508-525 |
| Naranja | 590-620 | 484-507 |
| Rojo | 620-780 | 400-483 |

Nota. Fuente: (Fontal, 2005)

Gracias a las investigaciones realizadas por el profesor Harald Hass surgió la tecnología LiFi, la cual se encuentra en el espectro de luz visible (VLC) y su funcionamiento se basa en el estándar IEEE 802.15.7. Esta tecnología constituye el eje central de la presente investigación, la cual será descrita posteriormente

2.2.2. Ventajas y Desventajas de los sistemas de comunicaciones VLC

Las redes por RF como WiFi pueden presentar algunos problemas que pueden ser corregidos mediante tecnologías que utilizan luz. Lo interesante es que estas tecnologías ópticas no requieren la sustitución de la red existente. A continuación, se resume en la Tabla 2 las ventajas y desventajas de los sistemas VLC.

Tabla 2*Ventajas y Desventajas de los sistemas de comunicaciones VLC*

| Sistemas de comunicación por luz visible (VLC) | |
|---|---|
| Atributo | Descripción |
| Ventajas | |
| Ancho de Banda | El espectro de luz visible puede ofrecer un ancho de banda 10.000 veces mayor que el espectro radioeléctrico. Además, de ser un espectro libre que no lleva regularizaciones, ni licencias. |
| Densidad de Datos | Al tener una parte amplia del espectro, las comunicaciones VLC tiene una densidad de datos 1000 veces mayor a los sistemas por RF, además de evitar las interferencias con frecuencias externas. |
| Altas velocidades | El gran ancho de banda, las altas velocidades de modulación y altas potencias permiten una alta tasa de datos. |
| Seguridad | Las señales ópticas permanecen confinadas en las áreas de iluminación donde se originan, al no poder atravesar muros, dificulta su interceptación, proporcionando cierto grado de privacidad y seguridad. |
| Inofensiva para la salud | VLC, se modula la intensidad de la señal de luz a velocidades tan altas que resulta imperceptible para el ojo humano, evitando los efectos negativos del parpadeo. |
| Entornos peligrosos | VLC es beneficioso en entornos complejos donde el uso de RF puede ser peligroso, y se ilustra con casos concretos de su utilidad en aviones y hospitales. |
| Desventajas | |
| Línea de visión (LOS) | Las redes VLC requieren de un camino directo entre el TX y el RX, lo que puede limitar su movilidad debido a la incapacidad de la señal óptica para atravesar obstáculos. |
| Interferencias | Si la luz ambiente es muy intensa, como cuando se está expuesto directamente a la luz solar, puede existir ruido óptico y disminuir la SNR |

Nota. Fuente: (Bosh C. & Itziar A., 2015) – Editado por Poleth Escobar

2.2.3. *Aplicaciones de sistemas VLC*

Los sistemas VLC tienen características particulares que son aprovechados en diferentes industrias como:

- **Domésticas y oficinas:** las redes de datos están presentes en entornos domésticos, oficinas y edificios, donde los dispositivos se conectan mediante puntos de acceso VLC, ayudando a transmitir información, creando a la par hogares inteligentes.
- **Transporte:** el uso de tecnología VLC se usa para implementar sistemas de entretenimiento en aviones y evitar interferencias con los sistemas de navegación de la aeronave.
- **Hospitales:** en el ámbito de la medicina, se utilizan redes de datos basadas en tecnología VLC para comunicaciones entre pacientes y profesionales, así como para enlaces requeridos en instrumentos de telemedicina. La razón principal de la adopción de esta tecnología es su capacidad para evitar interferencias electromagnéticas con otros equipos médicos.
- **Sector público y comercial:** En edificios públicos y centros comerciales existen sistemas de localización y navegación en interiores que funcionan como un sistema GPS, pero para uso en interiores. Estos sistemas informan a las personas sobre su ubicación en el edificio y las guían hacia su destino. Además, pueden ser útiles para realizar estudios de mercado en supermercados y en actividades de marketing.

(Bosh C. & Itziar A., 2015)

LiFi (Light Fidelity) es una de las OWC que trabaja con luz visible, esta tecnología ofrece varias ventajas como se vio en la Tabla 2. A continuación, se da a conocer sobre este tipo de red WPAN.

2.3.Li-Fi (Light Fidelity)

LiFi (Light Fidelity) es una tecnología de comunicación inalámbrica la cual usa el espectro de luz visible (VLC) para la transmisión de datos. En términos simples, LiFi es prácticamente WiFi basado en luz que utiliza ondas lumínicas en lugar de ondas de radio para transmitir todo tipo de información a una alta tasa de velocidad bidireccionalmente (Peñañiel, 2015). Esta tecnología cumple con el estándar IEEE 802.15.7.

Según (Lema, 2017), LiFi es una tecnología inalámbrica alternativa debido a la creciente saturación del espectro radioeléctrico, ya que al no utilizar ondas de radio permite que se haga uso de una región del espectro electromagnético no utilizada anteriormente. Además, no tiene fallas en el espectro y así puede transferir datos a velocidades mucho más grandes, evitando interferencias con sistemas a radio.

2.3.1. Historia de LiFi

Era febrero del año 1880 en Washington - Estados Unidos cuando Alexander Graham Bell conocido como el padre del teléfono inventó junto a su compañero Summer Tainter el primer aparato de comunicaciones sin cables al que lo llamaron fotófono. Este aparato permitía la emisión de sonido mediante luz, creado con el objetivo de que los barcos se pudieran comunicar entre sí, logrando la primera llamada inalámbrica de la historia a 213 metros de distancia; sin embargo, el fotófono era demasiado sensible a diferentes interferencias meteorológicas, por lo que en poco tiempo quedo en el olvido (Albor, 2014).

Años más tarde en Edimburgo, el profesor Harald Hass retomó la investigación que dejó Bell con el desarrollo de la tecnología inalámbrica y bidireccional a través de luz que la llamo LiFi o Light Fidelity, esta tecnología permite que los usuarios se conecten a Internet estando al alcance de un rayo de luz proveniente de una bombilla LED, estableciendo una

comunicación no perceptible para el ojo humano debido a la rapidez que tiene la variación de la luz en la bombilla (Albor, 2014; Oyola et al., 2016).

En el año 2011, según (Albor, 2014), Hass expone su investigación en una charla TED y demuestra a la audiencia como se puede tener acceso a Internet y ver un video en alta definición para ese entonces. Actualmente, varias empresas han incursionado en adentrarse en la investigación e industria de esta tecnología en diferentes países como Francia, Estados Unidos, Reino Unido, entre otros. Empresas, que son encargadas de la elaboración y desarrollo de equipos LiFi, innovando la forma de comunicarse en el mundo con una mejor experiencia.

2.3.2. Funcionamiento de LiFi

LiFi utiliza leds para la transmisión de datos, codificando la información y modulando a las frecuencias que trabaja la luz visible. La velocidad de transmisión está relacionada directamente con el color de la bombilla LED ya que como se vio en la Tabla 1 cada color ocupa un rango de frecuencias, es decir, si el color del LED es más lejano al blanco cálido, la velocidad de la transmisión de los datos será mucho más alta, debido a que ocupa un mayor espectro de frecuencia y por ende tiene una longitud de onda más pequeña (Hollsen, 2018).

Al aplicarse una corriente eléctrica constante en una bombilla LED, se emite una corriente de luz (fotones) desde la bombilla. Estas bombillas LED o antenas fotónicas en sí son dispositivos semiconductores que funcionan como emisores, las cuales contienen un modulador permitiendo la codificación binaria necesaria para transmitir información al receptor óptico mediante haces de luz. Luego, la señal es recibida por un detector o receptor óptico que interpreta los cambios de la velocidad de luz (señal) como datos, este receptor contiene un fotodetector el cual demodula la señal para posteriormente amplificarla y procesarla en el dispositivo que contenga este fotoreceptor (Hollsen, 2018).

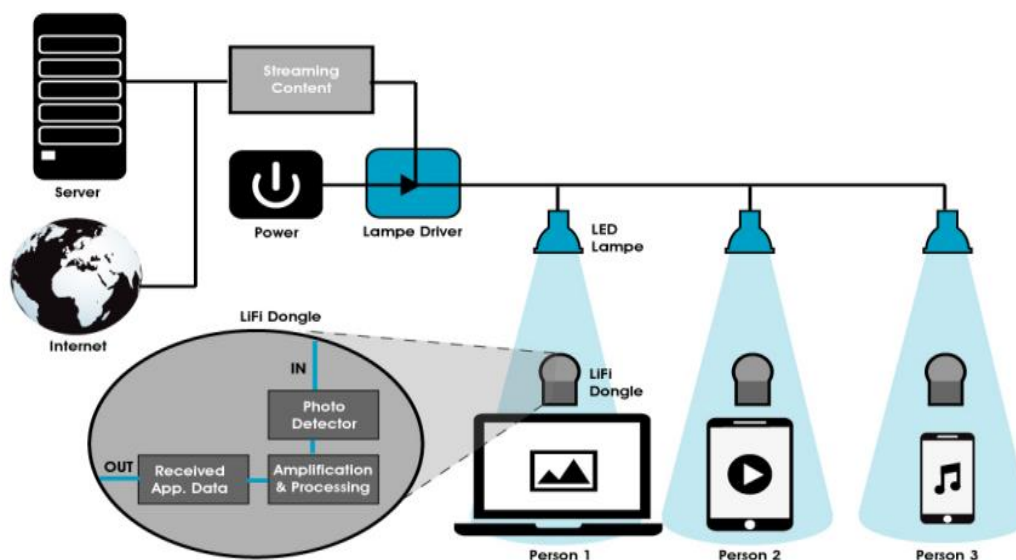
En una instalación de LiFi, un procesador de señal digital integrado conectado a un controlador LED toma datos de una red o servidor y los convierte en una señal digital, básicamente en una secuencia de diferentes niveles de voltaje discretos. El controlador LED de cada uno de los dispositivos en la red convierte la señal digital en una señal fotónica, transmitiéndola a una frecuencia muy alta como una señal que se le ha aplicado división de frecuencia ortogonal (OFDM), según (Gerer David, 2017).

La información es enviada de forma binaria, al estar el LED encendido transmite un uno digital y cuando el LED está apagado transmite un cero digital. Este proceso es lo suficientemente rápido para que el ojo humano sea incapaz de percibir algún cambio visual, ya que los LED pueden encenderse y apagarse hasta un millón de veces por segundo (Peñañiel, 2015).

La Figura 2 indica el funcionamiento de una red Li-Fi gráficamente, donde se aprecia los elementos principales que componen la red

Figura 2

Funcionamiento de la tecnología Li-Fi



Nota. Fuente: (Gelani et al., 2018)

2.3.2.1. Componentes Ópticos de LiFi

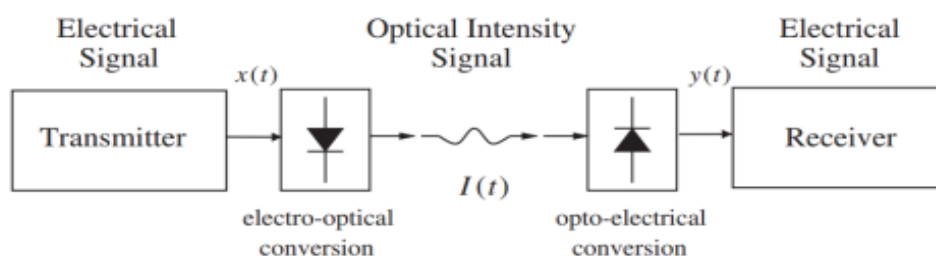
El transmisor o emisor utilizado en la tecnología Li-Fi contiene diodos LEDs como principal elemento en la transmisión de los datos, y en el receptor se tiene el fotodiodo el cual recibe la señal. A continuación, se profundiza la función de cada uno de los componentes principales que intervienen en el funcionamiento de esta tecnología.

- **Transmisores Diodo LED:** Diodo emisor de luz (Light Emmiting Diode) es un dispositivo semiconductor que emite luz en una o más longitudes de onda cuando se conecta eléctricamente utilizando polarización directa, permitiendo el paso de corriente en una sola dirección (Oyola et al., 2016).
- **Receptores - Detectores de Luz (Fotodiodo):** son los encargados de recibir las señales luminosas moduladas que contienen los datos transmitidos por el transmisor (LED). Cuando la señal luminosa llega al fotodiodo, se convierte en una corriente eléctrica que puede procesarse y descodificarse para recuperar los datos originales. Como los fotodiodos pueden detectar señales luminosas moduladas a muy alta velocidad, la tecnología LiFi permite una rápida transferencia de datos. También se utilizan para recibir información del dispositivo receptor, lo que permite al transmisor ajustar la intensidad de la luz para mejorar la calidad de la señal y la velocidad de transmisión (Suarez Morales, 2017).
- **Canal Óptico:** se refiere al medio a través del cual se realiza la transmisión de datos utilizando LiFi. En este tipo de canal, se utiliza luz visible para llevar a cabo la comunicación inalámbrica entre dispositivos. El canal óptico utiliza la modulación de intensidad de la luz para transmitir, y se basa en la técnica de Intensity Modulation/Direct Detection (IM/DD), donde la intensidad de la luz se modula de acuerdo con la señal digital que se quiere transmitir y los dispositivos receptores

realizan la detección directa de los cambios de intensidad de la luz para recuperar los datos transmitidos (Benítez, 2019; Cedeño et al., 2021).

Figura 3

Diagrama de Bloques de un Sistema IM/DD



Nota. Fuente: (Benítez, 2019).

Tabla 3

Tabla Comparativa entre Sistemas IM/DD y de Radio

| Características | Sistemas IM/DD | Sistemas de Ondas de Radio | Implicaciones del medio para LiFi |
|---|-----------------------|-----------------------------------|---|
| Regulación del Ancho de Banda requerido | No | Si | No es requerida la aprobación, ya que ocupa otra región del espectro electromagnético |
| Propagación Multitrayecto | No | Si | Enlace simple |
| Señal atraviesa muros | No | Si | Cobertura limitada Redes independientes y más seguras |
| Pérdida de Trayectoria | Si | Si | A frecuencias muy altas, tiene a perder trayectoria por varias obstrucciones |
| SNR | Si | Si | |

Nota. Fuente: (Kahn, 1997).

2.4.IEEE 802.15.7

La norma IEEE 802.15.7 describe el uso de las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC) en redes WPAN que para el caso es LiFi, donde se define las capas física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC).

2.4.1. Topologías

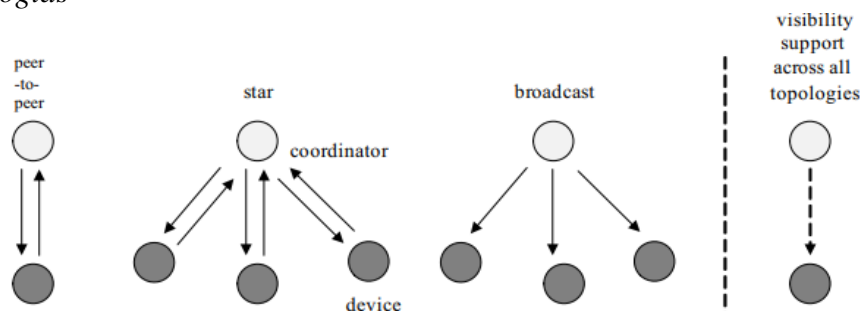
La IEEE 802.15.7 asigna diferentes topologías para aplicaciones VLC, las cuales son: punto a punto, estrella y broadcast.

- **Punto a Punto:** En una tecnología punto a punto cada uno de los dispositivos de la red pueden comunicarse entre sí, siempre y cuando estén dentro del área de cobertura, en este tipo de topología existe un coordinador, por lo general este es siempre el primer dispositivo en comunicarse con la red.
- **Estrella:** Las redes en estrella funcionan independientemente de todas las demás redes en funcionamiento. Esto se da gracias a la elección de un identificador VPAN el cual no debe de ser utilizado por ninguna otra red dentro del área de cobertura. Luego de haber elegido este identificador VPAN, el coordinador permite que otros dispositivos se unan a su red.
- **Broadcast:** este tipo de topología en las comunicaciones ópticas se da cuando el dispositivo se pone en modo difusión y puede transmitir una señal a otros dispositivos sin la necesidad de formar una red. Como se observa en la Figura 4 la comunicación es unidireccional y la dirección de destino no es necesaria.

(IEEE802.15.7, 2018)

Figura 4

Tipos de topologías



Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018).

2.4.2. Arquitectura

Un dispositivo VPAN consta de una capa física (PHY) que incluye un transceptor de luz para enviar los datos por el medio (luz) y una subcapa de control de acceso al medio (MAC), la cual da acceso al medio o canal físico, lo que permite la transferencia de datos.

La Figura 5 representa la disposición de estas capas de forma gráfica. Donde las capas superiores consisten en una capa de red y capa aplicación, es importante recalcar que LiFi no tiene asociado un modelo de red específico y la descripción de las mismas está fuera del alcance de este estándar.

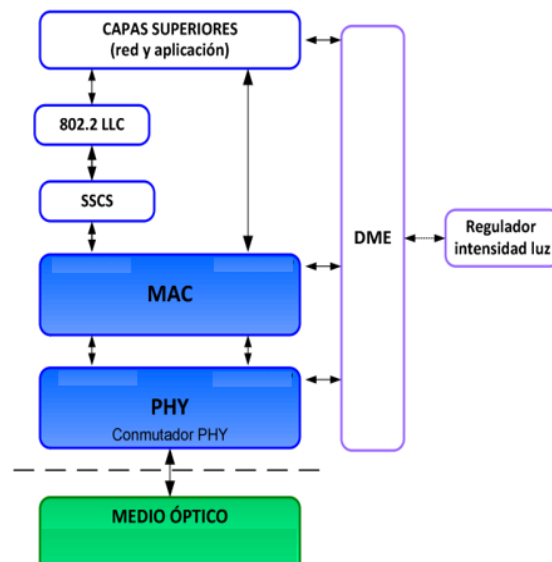
De acuerdo con (IEEE802.15.7, 2018), la subcapa de control para el enlace lógico (LLC) se encarga de gestionar la comunicación entre el enlace de datos y las capas de nivel superior. Su principal cometido es ofrecer servicios basados en enlaces fiables y sin errores, la LLC utiliza la subcapa de convergencia (SSCS) para acceder a los servicios de datos de MAC. Para facilitar la comunicación entre la LLC y el MAC, la SSCS actúa como intermediaria, además, se encarga de realizar las modificaciones necesarias para que la LLC pueda utilizar los servicios ofrecidos por la capa MAC.

Se contempla una entidad de manejo de servicio (DME), el cual actúa como interfaz entre los servicios de MAC y PHY, permitiendo la comunicación entre ambas capas. La DME

funciona también como un regulador de intensidad o potencia luminosa dada por el transmisor óptico (Bosh C. & Itziar A., 2015; UIT T, 2013).

Figura 5

Arquitectura de un Dispositivo VPAN según la IEEE 802.15.7



Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018) – Editado por (Bosh C. & Itziar A., 2015).

El estándar IEEE 802.15.7 se desarrolló para establecer las especificaciones de transmisión de datos mediante luz, por lo que sólo describe a continuación el funcionamiento único de las capas PHY y MAC.

2.4.3. Subcapa MAC

La subcapa MAC de la IEEE 802.15.7 se encarga de gestionar el acceso al medio, evitar colisiones, como también el control de flujo. Es una capa fundamental para asegurar la eficiencia y confiabilidad de la red.

2.4.3.1. Acceso al canal

Según (IEEE802.15.7, 2018), menciona que un coordinador de una red VPAN utiliza una supertrama (SF) para limitar su tiempo en el canal o acceder al medio físico en tiempos limitados. La supertrama está limitada por beacons, una porción activa con ranuras del mismo tamaño y una parte inactiva (Obsérvese la Figura 6).

La parte inactiva de la SF se utiliza para la sincronización entre dispositivos y no transmite información útil. Su función es preparar los dispositivos para la transmisión de datos, utilizando señales de control y temporización para garantizar que estén sincronizados y puedan comunicarse eficientemente cuando se transmita información válida, también ayuda a ahorrar energía, ya que los dispositivos pueden entrar en modo de espera o sueño cuando no se está transmitiendo. Esto es especialmente importante en LiFi, ya que contribuye al ahorro de energía eléctrica.

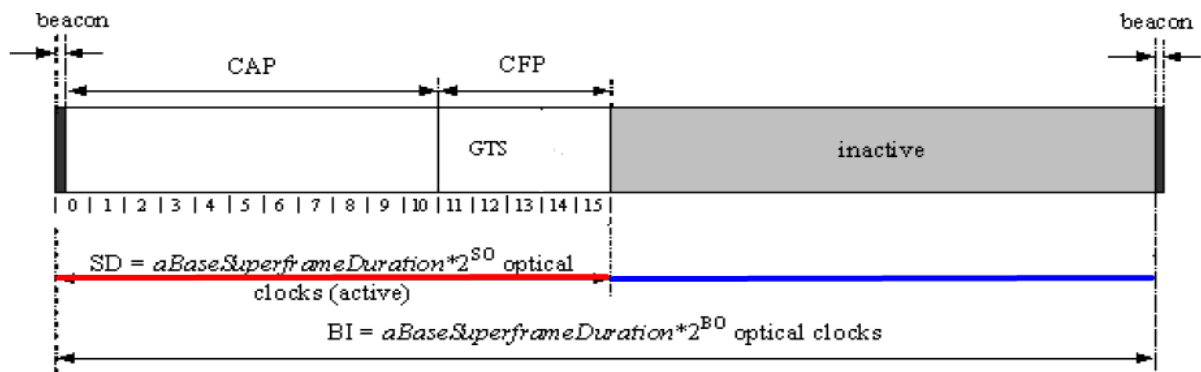
La parte activa está compuesta por una baliza, un periodo de acceso por contención (CAP) y un periodo de acceso sin contención (CFP). Durante el CAP los dispositivos están compitiendo por acceder al canal óptico físico y durante el CFP los dispositivos tienen acceso garantizado al canal óptico físico para transmitir datos de aplicaciones que requieren un ancho de banda específico, se permite que el coordinador dedique ranuras de parte activa a esa aplicación. Se conoce como ranuras de tiempo garantizadas (GTS) y pueden ocupar más de un período de ranura, estos periodos tienen un tiempo de duración fija que equivale a 16 μ s.

Las balizas se usan para sincronizar los dispositivos conectados, identificar la VPAN y para limitar el tiempo en el canal, se transmiten en la primera ranura de cada SF. Los valores de macBeaconOrder (BO) y macSuperframeOrder (SO) describen la estructura de la supertrama y su duración. El valor de BO define los intervalos de tiempo en que el coordinador transmitirá la baliza. Mientras que la duración de la parte activa de la SF se define por SO. Al utilizarse la parte activa de la SF, BO debe establecerse en un valor entre 0 y 14 y SO en un valor entre 0 y el valor de BO, obsérvese la Tabla 4. La subcapa MAC asegura la integridad del temporizador de la supertrama y la coordinación entre dispositivos en la red.

(IEEE802.15.7, 2018)

Figura 6

Estructura de la supertrama en IEEE 802.15.7



Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018) – Editado por el Autor.

Tabla 4

Atributos MAC I

| Atributo | Descripción | Valor |
|-------------------------|---|---|
| macBeaconOrder | Define el intervalo de tiempo entre dos balizas consecutivas. | 0–15 |
| macSuperframeOrder | Define el intervalo de tiempo entre el inicio de dos partes activas consecutivas. | 0–15 |
| aBaseSuperFrameDuration | Define la duración de la supertrama | aBaseSlotDuration x aNumSuperframeSlots |
| aBaseSlotDuration | Duración de la ranura de tiempo | 16 μ s |
| aNumSuperframeSlots | Número de ranuras de la supertrama | 16 |

Nota. La Tabla 4 contiene información sobre los atributos utilizados en la supertrama del estándar IEEE 802.15.7, cada uno con su descripción y valor en tiempo apropiada. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018) – Editado por el Autor.

La IEEE 802.15.7 define 2 métodos de acceso aleatorio: acceso aleatorio no ranurado y acceso aleatorio ranurado.

El acceso aleatorio no ranurado en la IEEE 802.15.7 se utiliza en redes de baja tasa de transmisión de datos, donde no es necesario dividir el tiempo en ranuras, los dispositivos utilizan el “acceso múltiple por detección de portadora y evitación de colisiones” (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA), donde estos intentan acceder al medio de forma aleatoria sin tomar en cuenta las ranuras de tiempo. Cada dispositivo sondea o escucha el medio antes de enviar el paquete, para asegurarse de que no haya otro dispositivo transmitiendo en ese momento, si el medio se encuentra libre simplemente el paquete se envía. Dado el caso que el medio este ocupado, el dispositivo toma un tiempo de espera aleatorio antes de volver a intentar enviar el paquete, ya que si decide enviar en ese momento existirá una colisión, debido a que otro dispositivo estaba transmitiendo. En ese caso, ambos dispositivos detienen su transmisión y esperan un tiempo aleatorio antes de intentar volver a transmitir.

El tiempo que eligen aleatoriamente los dispositivos antes de volver a transmitir es un número aleatorio de ranuras de tiempo, este método se conoce como algoritmo de retroceso exponencial binario, el cual aumenta el tiempo de espera con cada intento fallido de transmisión. Esto reduce la probabilidad de colisiones entre paquetes y se repite el proceso hasta que se dé una transmisión exitosa. Este tiempo de espera se calcula de la siguiente manera:

El dispositivo establece un contador de intentos de transmisión fallidos, inicialmente en cero. Cuando existe una colisión, el dispositivo duplica su tiempo de espera anterior y lo elige aleatoriamente dentro de un rango específico. Si el número de intentos fallidos es mayor que un valor umbral predeterminado $macMaxBE = 15$, el dispositivo abandona la transmisión y genera un mensaje de error.

El acceso aleatorio no ranurado es utilizado en aplicaciones de baja transferencia de datos como, por ejemplo, el control de la domótica de un hogar, la monitorización ambiental, etc., es decir, se utiliza en redes donde los dispositivos no necesitan transmitir una gran cantidad de datos. En el acceso aleatorio sin ranuras, los períodos de espera de cada dispositivo mantendrán la variable BE por cada intento de transmisión, la cual significa los períodos de espera que un dispositivo debe esperar antes de intentar acceder a un canal. BE se inicializará con el valor de macMinBE (Obsérvese la Tabla 5).

Tabla 5

Atributos MAC II

| Atributo | Descripción | Valor |
|--------------------|---|--------------|
| macMinBE | Especifica el número mínimo de retransmisiones de un paquete. | 0-3 |
| macMaxBE | Especifica el número máximo de retransmisiones de un paquete. | 3-15 |
| aUnitBackoffPeriod | Tiempo básico utilizado por el algoritmo de acceso aleatorio no ranurado. | 20 |

Nota. La Tabla 5 contiene información sobre los atributos utilizados en el acceso al canal del IEEE 802.15.7, cada uno con su descripción y valor (1 valor = 1 ranura de tiempo = 16 μ s) en tiempo apropiada. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018) – Editado por Poleth Escobar

Otro método de acceso es el acceso múltiple por división de código CDMA. Este método se encarga de asignar un código único a cada dispositivo de la red para que utilizando este código puedan modular sus señales de transmisión, lo que permite que múltiples dispositivos transmitan datos simultáneamente en la misma frecuencia de luz visible, compartiendo el mismo medio de transmisión sin interferir entre sí, ya que cada dispositivo utiliza un código único para diferenciar sus datos de los de otros dispositivos.

El acceso aleatorio ranurado ayuda a que el medio de transmisión se comparta entre diferentes nodos de forma adecuada, ordenada y justa, de tal forma que es más resistente a la interferencia y por ende no existen colisiones. Utilizado por aplicaciones que requieren enviar grandes cantidades de datos, o requieren mayor ancho de banda (IEEE802.15.7, 2018).

2.4.3.2.Inicio de una VPAN

No existen requisitos especiales para iniciar una VPAN en una topología broadcast. Durante el descubrimiento de dispositivos, deben intercambiarse datos (MAC y PHY) para permitir la comunicación bidireccional. En una topología punto a punto, un dispositivo puede enviar un comando de asociación para iniciar la comunicación con otro dispositivo. Por último, en una topología en estrella, el coordinador comunica a otros dispositivos su presencia a través de tramas de baliza, este tipo de topología debe considerarse porque la red LiFi que se va a desplegar tiene esta estructura.

El descubrimiento de dispositivos por parte del coordinador se realiza a 1,25 Mbps para PHY II y a 200 KHz con una velocidad de 11,67 Kb/s para PHY I. PHY III no proporciona soporte de descubrimiento de dispositivos (IEEE802.15.7, 2018).

2.4.3.3.Establecimiento de conexión

Esta cláusula describe el proceso para establecer conexión entre el transmisor y receptor para que se dé el intercambio de datos de acuerdo con la IEEE 802.15.7.

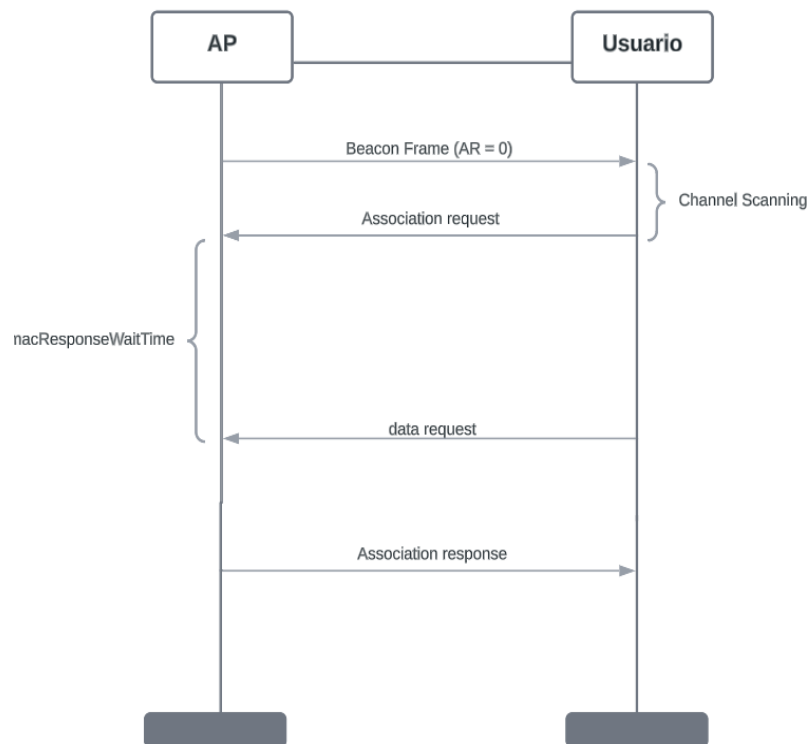
La Figura 7 y 8 muestra en detalle el proceso de asociación sin confirmación y con confirmación. Primero, el usuario escanea el canal óptico en busca del mejor transmisor disponible, detectando cualquier trama de baliza que el coordinador está constantemente enviando. Cuando el usuario detecta la primera baliza, inicia un período de espera, donde decide la mejor opción eligiendo la Intensidad de señal recibida (RSS) más fuerte y luego transmite la trama de solicitud de asociación.

En el caso de utilizar confirmación, el coordinador debe enviar una trama ACK para informar al usuario que la petición está en curso, caso contrario no. Cuando se ha completado el proceso de validación, el coordinador informa al usuario con una respuesta de asociación (IEEE802.15.7, 2011; Torres-Zapata et al., 2021).

- **Sin confirmación (ACK):** Una trama transmitida con su subcampo de solicitud de acuse de recibo (ACK) establecido en cero no será confirmado por su destinatario previsto. El dispositivo emisor asumirá que la transmisión de la trama fue exitosa (Obsérvese la Figura 7) (IEEE802.15.7, 2018).

Figura 7

Diagrama del proceso de asociación de una VPAN sin ACK.



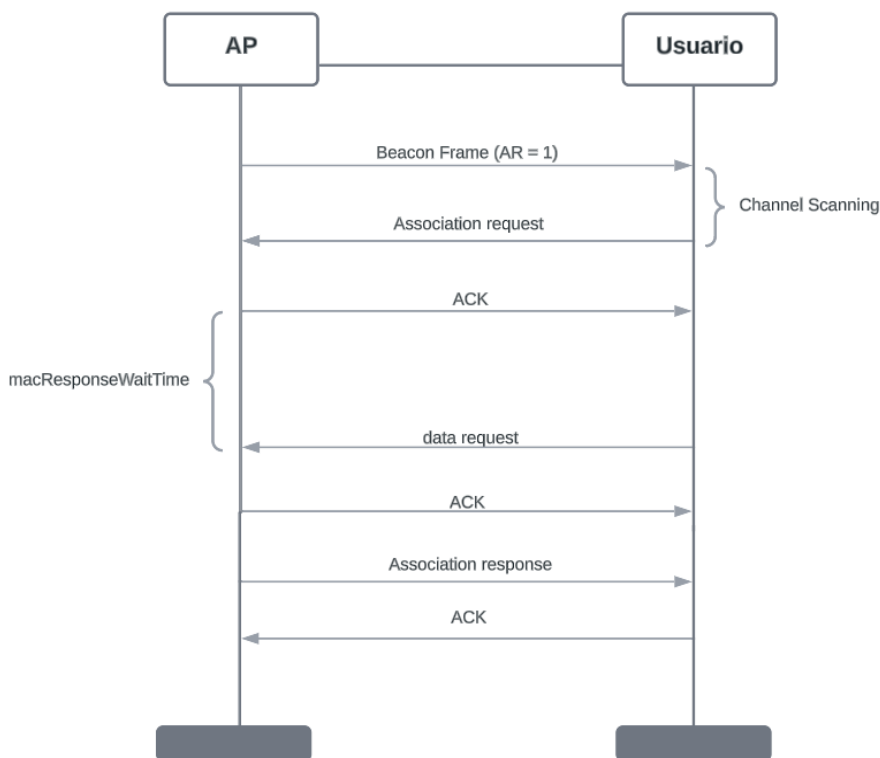
Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018) – Editado por el Autor.

- **Con confirmación (ACK):** Una trama transmitida con el subcampo de Solicitud de Acuse de Recibo (ACK) de su campo de control debe estar establecido en uno, para que lo reconozca el destinatario. Si el destinatario recibe correctamente la trama,

generará y enviará una trama de acuse de recibo que contiene el mismo número de secuencia (DSN) de la trama de datos (Obsérvese la Figura 8) (IEEE802.15.7, 2018).

Figura 8

Diagrama del proceso de asociación de una VPAN con ACK.



Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018) – Editado por el Autor.

Existen diferentes casos en los cuales se puede perder el establecimiento de conexión entre el Tx y Rx, los principales son:

Tiempo agotado: Cuando la capa MAC de destino no recibe el flujo de datos y el temporizador de la capa MAC de origen expira antes de recibir un acuse de recibo, la transferencia de datos falla. El origen retransmitirá los datos hasta un máximo de veces $\text{macMaxFrameRetries} = 3$. Si los intentos de transferencia fallan $1 + \text{macMaxFrameRetries}$ veces, la MAC del origen emitirá una confirmación de fallo a la capa superior siguiente.

ACK Perdido: La subcapa MAC de origen envía el flujo de datos al destinatario utilizando PHY. Mientras espera a que llegue el ACK desde el destino, la MAC de origen

inicia un temporizador `macAckWaitDuration` que puede expirar. El destinatario recibe la trama de datos, envía el ACK de vuelta al origen y la traslada a la capa superior que sigue. La MAC de origen no recibe el ACK del destinatario entonces la transferencia de datos falla. Es así que el origen retransmite los datos hasta un máximo de veces `macMaxFrameRetries`. Si los intentos de transferencia fallan $1 + \text{macMaxFrameRetries}$ veces, se envía una confirmación de fallo al tope superior.

(IEEE802.15.7, 2018)

Tabla 6

Atributos MAC III

| Atributo | Descripción | Valor |
|----------------------------------|---|--------------|
| <code>macMaxFrameRetries</code> | El número máximo de reintentos permitidos tras un fallo de transmisión. | 3 |
| <code>macAckWaitDuration</code> | Tiempo que tarda una trama ACK en llegar (ms) | < 5 |
| <code>macResponseWaitTime</code> | El tiempo máximo en que un dispositivo deberá esperar a que una trama de respuesta esté tras una de solicitud de asociación. (ms) | 32 |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)

2.4.3.4.Formato de tramas MAC

El estándar IEEE 802.15.7 contiene un formato de trama general y otras tramas específicas para permitir una comunicación efectiva y adaptarse a diversos requisitos y escenarios de aplicación.

El formato de trama general establece una estructura estandarizada utilizada para la mayoría de las comunicaciones VPAN de la IEEE 802.15.7. Proporciona campos específicos para la identificación del transmisor y el receptor, así como para información de control y datos transmitidos. Las tramas específicas son utilizadas para aplicaciones y funciones que requieren estructuras de trama especializadas, que permiten ampliar y modificar su

funcionalidad para diversos escenarios de uso. El estándar IEEE 802.15.7 tiene una unidad de datos de protocolo a nivel de MAC (MPDU), la cual realiza las funciones principales propias de esta capa. Los tipos de tramas MAC son las siguientes:

- Formato general de trama MAC
- Tramas control
- Tramas de reconocimiento (ack)
- Tramas de comandos (command)
- Tramas CVD (color visibility and dimming frame).

A excepción de las tramas CVD en las redes VPAN todas las tramas tienen los campos que se nombran a continuación, y cada uno de ellos contienen componentes que hacen que las tramas nombradas tengan sus propias funcionalidades u objetivos:

MHR (Medium Access Control Header): contiene información de control de la trama, de seguridad y de dirección. Este campo es esencial en las comunicaciones inalámbricas debido a que permite la coordinación y sincronización de las transmisiones en el medio de comunicación compartido, garantizando la eficiencia y asegurando la transmisión de datos.

MSDU (MAC Service Data Unit): es la información que se quiere transmitir por el enlace de comunicación inalámbrica. La MSDU tiene longitud variable y su contenido depende del tipo de trama y de la aplicación específica. Las tramas de acuse de recibo no contienen una carga útil.

MFR (MAC Frame Check Sequence): este campo se utiliza para verificar la integridad de los datos transmitidos. Al recibir una trama, el receptor calcula la MFR y la compara con la MFR recibido. Si ambos coinciden, se considera que la transmisión fue exitosa, de lo contrario, si hay algún error en la trama, el MFR no coincidirá y la trama será descartada.

(IEEE802.15.7, 2018).

- **Formato General de Trama MAC:** establece una estructura que se utiliza para la mayoría de las comunicaciones en IEEE 802.15.7. Este formato incluye campos como el preámbulo, direcciones de origen y destino, etc. y proporciona una base común para la transmisión de datos. Obsérvese la Figura 9, la estructura del formato general de trama MAC y la descripción de sus campos en la Tabla 7.

Figura 9

Formato General de trama MAC

| | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|----------------|---------------------------|----------|-----|
| Octets: 2 | 1 | 0/2 | 0/2/8 | 0/2 | 0/2/8 | 0/5/6/10/ 14 | variable | 2 |
| Frame Control | Sequence Number | Destination VPAN Identifier | Destination Address | Source VPAN Identifier | Source Address | Auxiliary Security Header | Payload | FCS |
| Addressing fields | | | | | | | | |
| MHR | | | | | | | MSDU | MFR |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)

Tabla 7

Descripción de campos del formato general de trama MAC

| Campo | Descripción | Tamaño 1 octeto = 8 bits/ 1 B |
|---------------------------|--|-------------------------------------|
| MHR | | |
| Frame Control | Especifica el tipo de trama | 2 |
| Sequence Number | Número de secuencia del paquete actual, evita la duplicación de tramas | 1 |
| Addressing Field | Campo identificador de origen y destino de la VPAN. Dirección del origen y destino del dispositivo que emite la trama. | 8 |
| Auxiliary Security Header | Campo opcional para enviar información de autenticación, la integridad y la confidencialidad de la trama. | 0/5/6/10/14 |

| MSDU | | |
|-------------|---|-------------------------------|
| Payload | Es un campo variable que contiene información sobre el estado de la red, la carga de tráfico actual, la calidad de la seña, etc., para la gestión y optimización de la red. | Variable (Max 15500 Bytes) |
| MFR | | |
| FCS | Verificar la integridad de los datos recibidos | 2 |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018) – Editado por Poleth Escobar

Las tramas individuales o especiales de la subcapa MAC se envían en orden específico y en esta sección se las describe conforme son transmitidas por la capa física PHY, enviando los bits de izquierda a derecha, empezando desde el bit menos significativo hacia el más significativo.

- **Formato de trama de baliza (Beacons):** este tipo de trama la utiliza el coordinador para informar de su presencia a los demás dispositivos y que estos se unan a la red. El formato se lo indica en la Figura 10 y la descripción de sus campos en la Tabla 8

Figura 10

Formato de trama de baliza

| | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------|-------------------|---------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------------|-------------------|----------------|-----|
| Octets: 2 | 1 | 4/10 | 0/5/6/10/14 | 2 | variable | variable | 0/1 | variable | 2 |
| Frame Control | Sequence Number | Addressing fields | Auxiliary Security Header | Superframe Spec | GTS fields (Figure 47) | Pending address fields (Figure 48) | cellSearch Length | Beacon Payload | FCS |
| MHR | | | | MSDU | | | | | MFR |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)

Tabla 8

Descripción de campos de trama de baliza

| Campo | Descripción | Tamaño 1 octeto = 8 bits/ 1B |
|---------------------------|--|---|
| MHR | | |
| Frame Control | Tipo de trama especificando a “baliza” | 2 |
| Sequence Number | Número de secuencia del paquete actual, evita la duplicación de tramas | 1 |
| Addressing Field | Identificación de la VPAN y la dirección del dispositivo que emite la baliza. | 4/10 |
| Auxiliary Security Header | Campo opcional para enviar información de autenticación, la integridad y la confidencialidad de la trama. | 0/5/6/10/14 |
| MSDU | | |
| Superframe S. | Tiempo durante el cual la supertrama está activa | 2 |
| GTS Fields | Asigna intervalos de tiempo garantizados para el envío de grandes cantidades de datos | Variable |
| Pending Address F. | Campo opcional que indica que hay datos pendientes que tiene el coordinador por enviar. | Variable |
| Beacon Payload | Es un campo variable que contiene información sobre el estado de la red, la carga de tráfico actual, la calidad de la señal, etc., para la gestión y optimización de la red. | Variable |
| MFR | | |
| FCS | Verificar la integridad de los datos recibidos | 2 |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018) – Editado por el Autor.

- **Formato de trama de acuse de recibo (ACK):** ayuda a confirmar la recepción exitosa de un paquete de datos en un dispositivo VPAN. Esta trama suele ser una respuesta rápida y breve enviada por un dispositivo receptor para indicar al emisor que el paquete de datos ha llegado correctamente. El formato de la trama de acuse de recibo se lo observa en la Figura 11 y la descripción de sus campos en la Tabla 9.

Figura 11

Formato de trama de acuse de recibo

| | | | |
|---------------|-----------------|--------------------------------|-----|
| Octets: 2 | 1 | variable | 2 |
| frame control | sequence number | B-ACK frame payload (optional) | FCS |
| MHR | | MSDU | MFR |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)

Tabla 9

Descripción de campos de trama de acuse de recibo (ACK)

| Campo | Descripción | Tamaño 1 octeto = 8 bits/ 1B |
|-----------------|--|------------------------------------|
| MHR | | |
| Frame Control | Tipo de trama especificando “ACK” | 2 |
| Sequence Number | Número de secuencia del paquete actual, evita la duplicación de tramas ACK | 1 |
| MFR | | |
| FCS | Verificar la integridad de los datos recibidos | 2 |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)

- **Formato de trama de comandos:** La trama de comandos de la IEEE 802.15.7 se utiliza en la tecnología de comunicación LiFi para permitir la comunicación inalámbrica a través de luz visible, controla la transmisión y recepción de datos, lo que permite que los dispositivos LiFi se comuniquen entre sí.

Figura 12

Formato trama de comandos

| | | | | | | |
|---------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------|-----|
| Octets: 2 | 1 | (As defined in 5.2.2.4.1) | 0/5/6/10/14 | 1 | variable | 2 |
| Frame Control | Sequence Number | Addressing fields | Auxiliary Security Header | Command Frame Identifier | Command Payload | FCS |
| MHR | | | | MSDU | | MFR |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)

Tabla 10*Descripción Trama de Comandos*

| Campo | Descripción | Tamaño 1 octeto = 8 bits/ 1B |
|------------------------------|--|---|
| MHR | | |
| Frame Control | Tipo de trama especificando “comando” | 2 |
| Sequence Number | Número de secuencia del paquete actual | 1 |
| Addressing Field | Identificación de dirección del VPAN | 4/10 |
| Auxiliary Security Header | Campo opcional para enviar información de autenticación | 0/5/6/10/14 |
| MSDU | | |
| Command Frame | Identifica el nombre comando MAC utilizado. | 1 |
| Data Payload | Identifica el comando MAC | variable |
| MFR | | |
| FCS | Verificar la integridad de los datos recibidos | 2 |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)- editado por el Autor

- **Formato de trama CVD (Constrained Variable-Length Data):** La tecnología LiFi utiliza el formato de trama CVD para organizar y empaquetar los datos transmitidos a través de la luz visible (Observe la Figura 13), este tipo de trama tiene una longitud variable, lo que permite flexibilidad en la transmisión de datos, garantiza una transmisión de datos eficiente y fiable, permitiendo la sincronización y el procesamiento adecuado en el receptor LiFi. Sus principales funciones son proporcionar visualmente información sobre el estado de la comunicación, el estado de envío de datos, la calidad de transmisión de datos y el tamaño de archivo transferido (IEEE802.15.7, 2018).

Figura 13*Formato trama CVD*

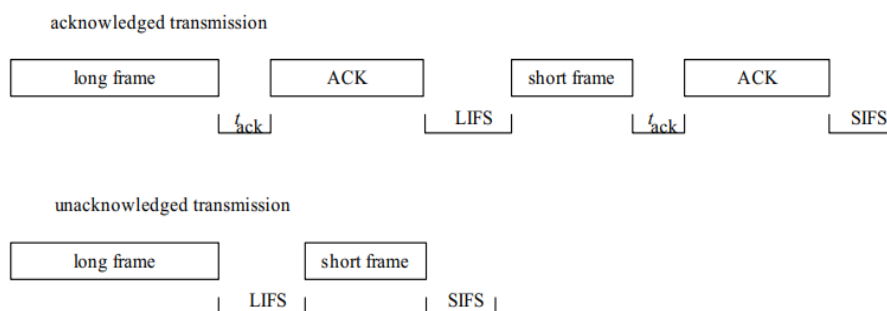
| | | |
|---------------|----------|--------------------|
| Octets: 2 | Octet: 2 | variable |
| Frame control | FCS | Visibility pattern |
| MHR | MFR | |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)

2.4.3.5. Espacio entre tramas (IFS)

El IFS (InterFrame Spacing) se refiere al lapso de tiempo mínimo que debe haber entre dos tramas consecutivas transmitidas. Esta pausa es necesaria para permitir que la capa MAC procese las tramas recibidas por la capa PHY desde el otro extremo de la comunicación. Si las tramas que se envían necesitan ACK, entonces se debe respetar el IFS entre la trama de acuse de recibo (ACK) y la siguiente trama transmitida (Bosh C. & Itziar A., 2015; IEEE802.15.7, 2018).

La longitud del IFS depende de la longitud de la trama previamente transmitida y se establece mediante el atributo aMaxSIFSFrameSize de la subcapa MAC. Este atributo determina si una trama es larga o corta, y se establece en 18 bytes (18 octetos). La duración del IFS puede ser larga (LIFS), corta (SIFS) o reducida (RIFS), como se muestra en la Figura 14.

Figura 14*Espaciado entre tramas (IFS – Interframe Spacing)*

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018).

2.4.4. Capa PHY

La capa física del estándar IEEE 802.15.7 tiene la responsabilidad de cumplir con la función de la transmisión y recepción de los datos por el medio físico, en la cual abarcan tareas como la selección del canal de transmisión, la modulación y demodulación de la señal, la sincronización y la corrección de errores, una de las tareas de la capa física específicas de este estándar es la activación y desactivación del transceptor VLC/IR.

El estándar menciona a tres tipos o modos de capa física, cada una con sus propias características destinadas para objetivos diferentes. Esta subcláusula se la especifica en la sección 2.4.4.7. A continuación, se menciona los requerimientos comunes y principales que tienen todos los modos de PHY.

2.4.4.1.Frecuencias

A diferencia de otras tecnologías inalámbricas, como WiFi que utiliza el espectro radioeléctrico, LiFi utiliza el espectro de luz visible (VLC) para la transmisión de datos, sus frecuencias van en orden de THz, desde los 420 a los 770 THz (Obsérvese la Tabla 1). La mayoría de las empresas desarrolladoras de LiFi han ideado los módulos utilizando el espectro de color blanco, con el fin de que no sea invasivo al ojo humano por otras tonalidades, es decir, abarca todo el rango de frecuencias visibles (IEEE802.15.7, 2018).

2.4.4.2.Longitud de onda

El espectro de luz visible para una red WPAN - LiFi, está definido entre los 380 y 780 nm como se muestra en la Tabla 1. Es decir, un dispositivo puede operar en una o varias bandas de frecuencia.

2.4.4.3.Mapeo Óptico

Es un método de asignación de bits para señales luminosas moduladas por un canal óptico. Es decir, en el mapeo óptico, los datos digitales se convierten en señales ópticas mediante la modulación de la señal.

A continuación, estas señales ópticas se transmiten a través del canal óptico y se reciben por el fotoreceptor, donde se realiza un proceso de demodulación inversa para reconstruir los datos digitales originales. El mapeo óptico IEEE 802.15.7 utiliza diversas técnicas de modulación, como OOK, PPM y VPPM, para transmitir datos a través del canal óptico, para el presente caso se hace uso de la modulación por multiportadora HACO-OFDM que no consta en el estándar. En la recepción, los fotodetectores detectan la variación de la intensidad de la luz y la convierten en datos digitales.

2.4.4.4.Técnicas de Modulación en capa PHY

Según (Benítez, 2019), LiFi utiliza diferentes técnicas de modulación en entornos de iluminación regulable; sin embargo, para velocidades superiores a 15 Mbps, es necesario utilizar técnicas de modulación más complejas o multiportadora para canales LiFi específicos que no están definidas en el estándar IEEE 802.15.7. Sin embargo, en la Tabla 11 se muestra las principales características de las técnicas de modulación para una sola portadora y multiportadora.

Tabla 11

Diferencias de las Técnicas de Modulación para LiFi

| Modulación | | Características |
|-------------------|------------|---|
| SCM | OOK | Transmitir datos mediante el encendido y apagado secuencial del LED, haría que el rango de comunicación confiable disminuyera en niveles bajos de atenuación, y aumentar y disminuir el |

| | | |
|------------|----------|--|
| | | brillo del LED causaría que la tasa de datos disminuyera. |
| | PPM | Proporcionar soporte eficiente y de atenuación en la modulación de posición de pulso variable (VPPM). |
| | PAM | Sensible a la distorsión de señal, combinación con otras técnicas de modulación para obtener un mejor rendimiento. |
| MCM | OFDM | Excelente para situaciones en las que se utilizan múltiples transmisores simultáneamente, evita los efectos de sombreado, la interferencia puede ser mitigada desplazando el ancho de banda del sistema a una frecuencia más alta. |
| | DCO-OFDM | La importante disipación de energía debida a la polarización |
| | ACO-OFDM | Eficiente en términos de potencia óptica para una SNR más alta para el canal IM/DD |
| | PAM-DMT | Mayor eficiencia de la potencia óptica en comparación con DCO-OFDM |

Nota. Fuente: (Ramadhani & Mahardika, 2018)

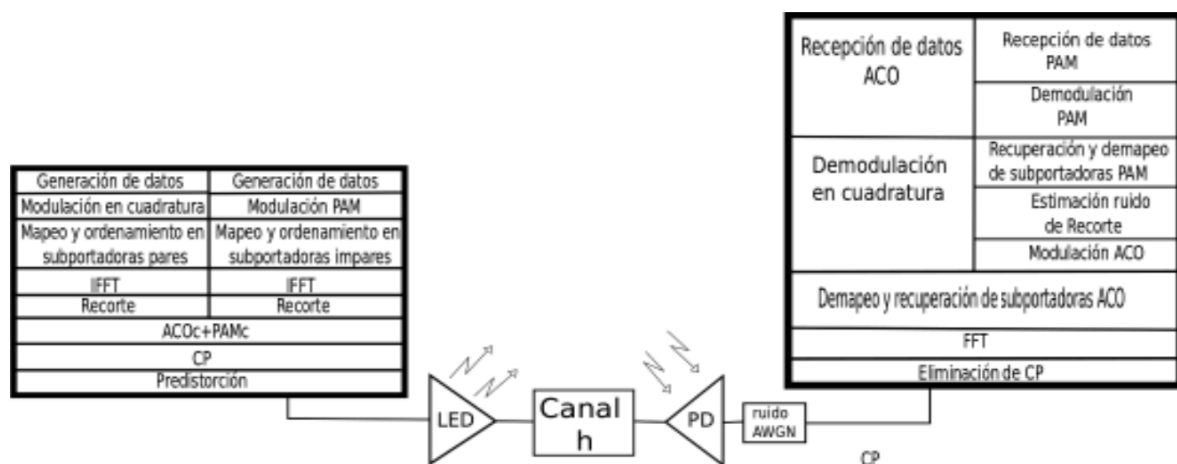
Según (Benítez, 2019), las técnicas basadas en la multiplexación por frecuencia ortogonal (OFDM), ayudan a mejorar en rendimiento de LiFi, pues existe menor desvanecimiento por multitrayecto, ya que las múltiples subportadoras ortogonales mitigan los efectos del desvanecimiento causado por diferentes reflexiones de luz en los objetos. Esto contribuye a una comunicación más confiable.

Particularmente, las sub técnicas de OFDM como PAM-OFDM y ACO-OFDM conforman a HACO-OFDM (Hybrid Asymmetrically Clipped Optical OFDM) siendo una técnica de modulación híbrida asimétrica, significa que las portadoras no se utilizan de manera uniforme para representar la información. En lugar de ello, se asignan más portadoras a las

regiones donde se espera una mayor intensidad de luz, y menos portadoras donde se espera una menor intensidad de luz. Esto permite una transmisión más eficiente y se adapta a las variaciones de intensidad luminosa en entornos de LiFi, permitiendo una mejor utilización del ancho de banda disponible, lo que es esencial en aplicaciones de alta velocidad (Sufyan Islim & Haas, 2016).

Figura 15

Sistema de comunicación basado en HACO-OFDM



Nota. Fuente: (León, 2018)

HACO-OFDM se utiliza en entornos donde la intensidad luminosa puede variar significativamente, como en sistemas de comunicación en interiores donde la luz natural o artificial puede fluctuar. También es adecuado para aplicaciones de alta velocidad en LiFi donde se requiere un uso eficiente del ancho de banda y una transmisión confiable de datos.

2.4.4.5. Formato de trama física PPDU

La PPDU (Physical Protocol Data Unit) de LiFi se refiere a la unidad de datos que se transmite a través del medio físico, en este caso, la luz visible. La PPDU contiene los datos transmitidos y la información de control necesaria para asegurar una transmisión confiable y sin errores.

La estructura del PPDU (Obsérvese la Figura 16) se presenta de modo que el campo situado más a la izquierda se transmitirá en primer lugar. Todos los campos de múltiples octetos se transmitirán primero el octeto menos significativo y cada octeto se transmitirá primero el bit menos significativo (IEEE802.15.7, 2018).

Figura 16

Formato de la PPDU de LiFi

| | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--|-----------------------------|
| Preamble (see 8.6.1) | PHY header (see 8.6.2) | HCS (see 8.6.3) | Optional fields (see 8.6.4) | PSDU (see 8.6.5) |
| SHR | PHR | | | PHY payload |

Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018).

La PPDU sigue un formato general, que consta de tres partes principales: el cabecero de sincronización (SHR), la cabecera física (PHR) y la carga útil (PHY Payload). Cada una de estas partes contiene diferentes campos internos que pueden variar en longitud y algunos de ellos son opcionales.

Preámbulo (SHR): Se refiere a la serie de bits enviados antes de la transmisión de datos real y tiene un tamaño de 4 bytes o 32 bits. En el caso de LiFi, el preámbulo se conforma por uno largo y otro corto. El preámbulo corto se utiliza para ayudar al receptor a sincronizarse con el transmisor y establecer una conexión confiable, mientras que el preámbulo largo contiene información adicional que ayuda al receptor a evaluar la calidad de la señal y ajustar su configuración para recibir datos con mayor precisión (IEEE802.15.7, 2018).

Encabezado PHY (PHR): Según (IEEE802.15.7, 2018), PHY Header tiene un tamaño de 1 byte, se utiliza para proporcionar información importante sobre los parámetros de la comunicación física, como la frecuencia de transmisión, la modulación utilizada, el tamaño

del paquete y la codificación de canal. Además, ayuda al receptor a recibir y procesar la señal de manera más efectiva, lo que resulta en una mayor precisión y una tasa de error reducida.

Cabecera de control de secuencia (HCS): tiene un tamaño de 1 byte y se utiliza para controlar la transmisión de datos entre el transmisor y el receptor, ya que identifica y verifica la secuencia de bits que se envían en la PPDU y asegura que cada trama se transmita y se reciba en el orden correcto. Asimismo, la HCS es utilizada para la detección y corrección de errores en la transmisión de datos, lo que mejora la confiabilidad y la integridad de los datos transmitidos (IEEE802.15.7, 2018).

Campos Opcionales: Los campos opcionales estarán presentes siempre y cuando se utilice PHY III, en el presente trabajo de investigación no se utilizará este modelo de capa física por lo que es no es relevante mencionarlos.

PSDU o carga útil: es la parte del paquete que contiene los datos que se van a transmitir. La longitud del PSDU depende de la tasa de transmisión de datos y del modo de modulación utilizado. Este es un campo de longitud variable y es el que contendrá la unidad de datos de protocolo de nivel MAC a la que se le va a aplicar el servicio de transferencia de datos de nivel PHY, incluyendo el código de verificación FCS (IEEE802.15.7, 2018).

2.4.4.6. Tipos de PHY

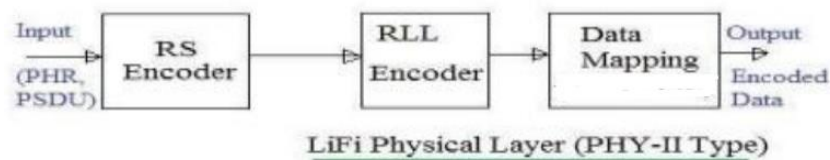
Dentro de la capa física se presentan 3 tipos, cada uno destinado para diferentes objetivos, conocidas como PHY I, PHY II, PHY III.

- **PHY I:** este modelo está destinado para uso en exteriores con aplicaciones de baja velocidad de datos (vehículos, semáforos), es decir, cubre largas distancias. donde utiliza el modo on-off keying (OOK) con modulación de pulso variable o VPPM con velocidades que van desde los 11.67 kb/s a 267.6 kb/s.

- **PHY II:** está direccionado a utilizarse en ambientes internos con altas velocidades que van desde los 1.25 Mbps hasta los 196 Mbps, modo que es utilizado en el presente trabajo de investigación (Oyola et al., 2016). PHY II tiene dos técnicas de codificación (Obsérvese la Figura 17) RS (Reed-Solomon) y RLL (Run-Length Limited). Se utiliza 4B/10B para mejorar la transmisión de datos posteriormente aplica un esquema de RS ayudando a detectar y corregir errores en la transmisión, para tener menos errores en entornos con ruido e interferencia. Por otro lado, la codificación RLL controla la densidad de datos y las transiciones entre unos y ceros, logrando un equilibrio entre la densidad de datos y la estabilidad de la señal. En conjunto, estas técnicas aseguran una comunicación eficiente y confiable (HELENO & BARON, 2020).

Figura 17

Modelo PHY II IEEE 802.15.7



Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018)

- **PHY III:** Este modelo está diseñado para sistemas punto a punto en interiores. Sus velocidades van desde los 12 Mbps hasta los 96 Mbps, siendo apto para ser utilizado en aplicaciones con muchas fuentes transmisoras y receptoras de luz (IEEE802.15.7, 2018; Oyola et al., 2016; Sarbazi et al., 2013)

2.4.4.7. Duración del símbolo

La duración del símbolo se refiere al tiempo que tarda en transmitirse un símbolo de datos en la capa física (PHY) de una red inalámbrica. El estándar IEEE 802.15.7 menciona

que para las comunicaciones VLC la duración del símbolo depende del modo de operación de PHY. En el modo PHY I, la duración del símbolo es de 1 μ s, en el modo PHY II es de 26.67 μ s y para el modo PHY 3, la duración del símbolo depende de la tasa de símbolos seleccionada (IEEE802.15.7, 2011). La duración del símbolo es importante para determinar la velocidad de transmisión de datos de la red, ya que cuanto más corto sea el tiempo de duración, más rápida será la transmisión de datos.

2.4.4.8. Canales

En LiFi, un canal hace referencia al medio a través del cual se transmiten los datos utilizando la luz visible, la capa PHY se encarga de seleccionar el canal de transmisión más adecuado para las condiciones ambientales y los requisitos de transmisión de datos. La norma IEEE 802.15.7 especifica que existen varios modos de funcionamiento con diferentes rangos de frecuencia y anchos de banda.

Existen 12 canales, numerados del 0 al 11, para el modo PHY 1, que utiliza la banda base infrarroja. El ancho de banda de cada canal es de 1 MHz. Para el modo PHY II hay 48 canales, numerados del 0 al 47, que utilizan la banda base visible y el ancho de banda de cada canal es de 37,5 MHz. Por último, la norma IEEE 802.15.7 afirma que para PHY III, la duración del símbolo puede asignarse dinámicamente en función de los requisitos del sistema (IEEE802.15.7, 2018).

2.4.5. Seguridad

El estándar IEEE 802.15.7 tiene ligeras diferencias con otros estándares que definen a otras redes inalámbricas, ya que recalca la direccionalidad y visibilidad debido al uso del espectro óptico de luz visible. Por ejemplo, un dispositivo receptor que no está autorizado es fácilmente detectado en la trayectoria de la señal de la comunicación. A diferencia de otras redes inalámbricas basadas en radiofrecuencia RF, la señal de LiFi no viajará a través de las

paredes; sin embargo, esta tecnología sigue las normas de seguridad para brindar confidencialidad, autenticación y la repetición de datos (IEEE802.15.7, 2018).

El mecanismo criptográfico del estándar IEEE 802.15.7 utiliza criptografía de clave simétrica, utilizando claves proporcionadas por procesos de capas superiores. El establecimiento de las claves está fuera del alcance de este tema de investigación. La seguridad de esta norma requiere operaciones criptográficas seguras, además de un almacenamiento seguro y auténtico del material clave (IEEE802.15.7, 2018). Los servicios principales de seguridad del IEEE 802.15.7 son la confidencialidad, autenticidad de los datos, control de acceso y anti duplicación.

Dado que LiFi es una tecnología ortogonal a la comunicación basada en radio y debido a que la luz no puede atravesar objetos sólidos, se considera una alternativa más segura a las redes inalámbricas de convencionales para la transmisión de datos dentro de espacios cerrados, donde es más difícil de interceptar los datos desde el exterior (Hikmatyarsyah et al., 2019).

Figura 18

Seguridad en LiFi



Nota. Fuente: (PureLifi, 2018) – Editado por: Poleth Escobar

CAPÍTULO III: REQUERIMIENTOS

Este capítulo toma en cuenta los requerimientos importantes para llevar a cabo la implementación de la red LiFi en el laboratorio de la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas, mediante un análisis de las necesidades que tiene la materia específicamente en la Unidad 3, los usuarios y el laboratorio, con el fin de montar la red, realizar las pruebas de funcionamiento y posteriormente llevar a cabo las prácticas de laboratorio.

3.1. Análisis

3.1.1. Metodología de diseño

Es esencial elegir una metodología en un proyecto ya que ofrece una estructura y un conjunto de herramientas para planificar, ejecutar y controlar las actividades del mismo, de forma organizada y eficaz, esto ayuda a garantizar la calidad y efectividad al ejecutarlo.

El presente trabajo de investigación emplea la “Metodología en Cascada”, esta se caracteriza por seguir las fases del proyecto de forma secuencial, se compone de etapas claras y definidas, como la planificación, diseño, implementación, verificación y mantenimiento, cada fase debe terminarse antes de iniciar la siguiente.

3.2. Análisis de requisitos y requerimientos

Una base importante para el diseño del proyecto es el análisis de la situación actual, con el fin de comprender el estado actual del problema e identificar los requisitos necesarios que deben considerarse durante la fase de diseño e implementación de la red.

3.2.1. Situación Actual

En el sílabo de la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas de la carrera de Telecomunicaciones en la Universidad Técnica del Norte, específicamente en la Unidad 3 “REDES WBAN/WPAN/WLAN,” aborda la enseñanza de diversos tipos de redes

inalámbricas. El objetivo principal de este enfoque es brindar a los estudiantes una comprensión integral de la diversidad de redes inalámbricas de área personal, enfocadas a diversas aplicaciones. Sin embargo, el estudiante limita su capacidad a la parte teórica, y la parte práctica se ve minimizada.

Por tal motivo, es necesario que tanto los estudiantes como el docente desarrollen sus habilidades poniendo en práctica los conocimientos teóricos de LiFi, mediante prácticas de laboratorio, con el fin de que a futuro los profesionales forjados en la UTN den soluciones a problemas con propuestas eficientes e innovadoras.

La causa del problema descrito anteriormente se da por la falta de instrumentos en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas, ya que básicamente no existe una red LiFi, ni tampoco existe actualmente dispositivos de comunicación con una tarjeta de red que incorpore a esta tecnología; por lo tanto, es necesario primeramente contar con los módulos adecuados para que posteriormente los estudiantes trabajen, mediante diferentes prácticas.

Para cumplir con los objetivos propuestos en el presente proyecto, se debe de considerar diferentes aspectos como: el lugar donde se va a implementar la red, el número aproximado de usuarios que harán uso de la misma, la instrumentación, las necesidades de los usuarios, y el hardware y software a utilizarse.

3.2.1.1. Estructura del Laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas

El laboratorio se encuentra actualmente ubicado en el piso 3 de la Facultad de Ciencias Aplicadas (FICA), para implementar LiFi hay que considerar las dimensiones en metros cuadrados que este tiene, ya que como se ha mencionado anteriormente esta tecnología tiene una cobertura limitada.

- **Dimensiones:** con la ayuda de un flexómetro se mide el ancho y largo de una de las paredes. El laboratorio presenta 9.59 m de largo, 6.59 m de ancho y 3 m de altura. El área de la habitación que se desea conocer para implementar la red es 63.30 m^2 .

Figura 19

Plano 2D dimensiones del laboratorio de CI



Nota. Fuente: Autoría.

Conexión eléctrica: La implementación efectiva y segura de la red LiFi requiere considerar el plano eléctrico de la habitación. Es crucial garantizar una instalación eléctrica adecuada y una ubicación estratégica de los dispositivos para un funcionamiento eficiente y seguro de la red.

Tomando en cuenta lo dicho, se muestra en la Figura 21 el plano de diseño eléctrico del laboratorio. En este plano, se indican las diferentes tomas de corriente en la habitación, donde se evidencia que no hay complicaciones significativas al momento de montar la infraestructura de la red en este espacio.

Figura 20

Plano de diseño eléctrico ¿



Nota. Fuente: Autoría

3.2.1.2. Número de usuarios

Este es un dato no preciso, debido a que existe diferente número de alumnos conforme pasan los semestres en la carrera; sin embargo, de forma aproximada existe un mínimo de 10 personas contando con el personal docente y docente técnico, ya que por disposición del reglamento universitario cualquier asignatura debe contar con un mínimo de 8 estudiantes para que se pueda abrir la materia. Por ese motivo solo se toma en consideración las características físicas que tiene el lugar donde se implementará la red y que sean las personas las que se adecuen a ella.

3.2.2. Propósito del sistema

El presente proyecto tiene como principal motivación aportar a los conocimientos prácticos de los estudiantes en el aspecto de las redes inalámbricas WPAN mediante la implementación de una red LiFi en el laboratorio de la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas. Un módulo de prácticas de laboratorio ayudará a los estudiantes y al personal

docente a realizar prácticas e investigaciones basadas en una tecnología óptica inalámbrica de alta calidad. El objetivo final es incentivar a los futuros ingenieros en Telecomunicaciones a dar soluciones a problemas con propuestas innovadoras y eficientes.

3.2.3. Impacto Ambiental

El proyecto actual no causa ningún impacto ambiental, ya que los componentes electrónicos involucrados no emiten ningún efecto secundario durante su funcionamiento. LiFi contribuye a preservar el medio ambiente al reducir el consumo de energía eléctrica, la contaminación electromagnética y la cantidad de residuos electrónicos, por lo tanto, esta tecnología deja una menor huella de carbono, al no emitir gases ni utilizar recursos energéticos extras que puedan generar componentes químicos que afecten el medio ambiente.

3.2.4. Impacto económico

El gasto económico del proyecto depende del hardware de la red, la tecnología LiFi puede exigir una inversión inicial en infraestructura y dispositivos para su implementación, pero una vez establecida, es posible reducir los costos a largo plazo.

LiFi tiene una ventaja importante debido a su menor consumo de energía en comparación con WiFi, lo que puede generar una disminución de los costos de energía a largo plazo. Además, el hardware resulta más sencillo, lo que conlleva una reducción de los costos de instalación y mantenimiento. Otra ventaja potencial, es su mayor seguridad en comparación con WiFi. Al usar luz visible para la transmisión de datos, la señal no atraviesa paredes, mejorando así la seguridad de los usuarios y reducir los costos asociados con la seguridad de la red.

Con respecto al diseño y aplicación del módulo de prácticas de laboratorio, no se incurre en otros gastos ya que únicamente dependen de software libre y gratuito.

3.2.5. Descripción General del Sistema

La red será implementada en el laboratorio de la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas, el cual posee un área de $63.30 m^2$ y un entorno donde claramente tiene una línea de vista eficiente, que ayudará a los usuarios acceder a Internet. Las prácticas de laboratorio se las realiza los días de práctica asignadas por el docente y docente técnico que por lo general son los martes de 7:00 a 9:00 am (2 horas).

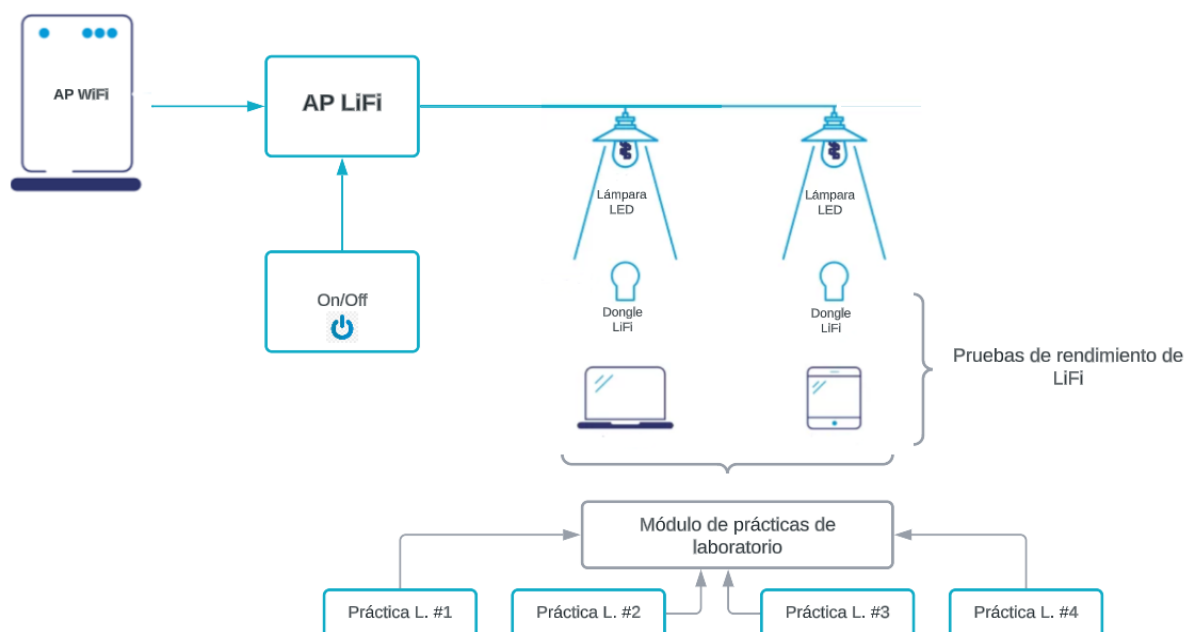
Anteriormente, se mencionó que el número de usuarios quienes harán uso de la red no es preciso, además, el sílabo de la asignatura tiene diferentes temáticas; sin embargo, para el presente caso se toma en consideración únicamente la Unidad 3 ya que es donde se estudia las redes WPAN, en la que incluye a la tecnología LiFi, este es el periodo de estudio más acorde para aplicar los conocimientos teóricos, al igual que prácticos.

El sistema LiFi será ubicado en lugares estratégicos en el laboratorio, con el fin de que la cobertura sea suficiente para satisfacer un área común de trabajo. La red por implementarse constará de 2 antenas fotónicas y 5 fotoreceptores, los cuales son usados para recibir la señal desde los dispositivos como un puerto USB, donde la tarjeta de red de la laptop reconocerá a la red LiFi como Ethernet.

Posteriormente, se realizan las pruebas de rendimiento a la red utilizando diferentes herramientas de monitoreo de tráfico y finalmente se realiza el módulo de prácticas de laboratorio en la que se tocan temas como cobertura y alcance, rendimiento, calidad de servicio y seguridad, con el fin de ser aplicadas a los estudiantes Obsérvese la Figura 22.

Figura 21

Funcionamiento general del sistema



Nota. Fuente: Autoría

3.2.6. *Requerimientos*

Para satisfacer las necesidades del usuario y lograr un sistema funcional, se necesita definir los requerimientos de stakeholders, de sistema y de arquitectura. Es importante destacar que estos parámetros deben ser medibles, para lo cual se deben identificar las restricciones que definirán el funcionamiento y el rendimiento del sistema. Los requerimientos presentados más adelante han sido enlistados en base a la teoría que sostiene LiFi a través del estudio del estándar IEEE 802.15.7 y los objetivos del proyecto.

En principio se establecen ciertas nomenclaturas para hacer referencia de que tipo de requerimientos se está hablando en el transcurso de la investigación.

Tabla 12

Nomenclatura de Requerimientos

| Tipo de Requerimiento | Nomenclatura |
|-----------------------|--------------|
| Stakeholders | STSR |
| Sistema | SISR |
| Arquitectura | SASH |

Nota. Fuente: Autoría

3.2.6.1. Requerimientos de Stakeholders

Los requerimientos de Stakeholders son los individuos involucrados en el proyecto que se encuentran enlistados en la Tabla 13. El objetivo es establecer el diseño del sistema en función de las necesidades de los usuarios.

Tabla 13

Lista de Stakeholders

| Stakeholders | |
|-------------------|---|
| Usuarios Directos | Estudiantes “Comunicaciones Inalámbricas” |
| Tutor | Ing. Jaime Michilena. MSC |
| Asesor | Ing. Edgar Maya. MSC |
| Tesista | Poleth Escobar |

Nota. Fuente: Autoría

En la Tabla 14 se establecen parámetros prioritarios basados en los requerimientos del proyecto, considerando factores como las necesidades del usuario, el rendimiento del sistema y los riesgos asociados.

Tabla 14

Requerimientos de Stakeholders

| Requerimientos de Stakeholders (STSR) | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-------|------|
| # | Requerimiento | Prioridad | | |
| | | Alta | Media | Baja |
| REQUERIMIENTOS OPERACIONALES | | | | |
| STSR1 | Conexión confiable | | X | |
| STSR2 | Fácil acceso a la red LiFi | X | | |
| STSR3 | Bajo consumo de recursos energéticos | | | X |
| STSR4 | Desempeño eficiente de la red | X | | |
| STSR5 | Parpadeo de luz LED imperceptible | X | | |

| REQUERIMIENTOS DE USUARIO | | |
|----------------------------------|--|---|
| STSR6 | Herramientas de análisis de tráfico gratuitos | X |
| STSR7 | Costo-beneficio de la red aceptable | X |
| STSR8 | Herramientas de inyección de tráfico gratuitas | X |
| STSR9 | Número de estaciones LiFi suficientes (Mínimo 5) | X |
| STSR10 | Instalación sencilla de la red | X |
| STSR11 | Compatible con software libre | X |
| STSR12 | Simplicidad de manejo de las herramientas de tráfico | X |
| STSR13 | Fácil instalación de herramientas de análisis | X |

Nota. Fuente: Autoría

3.2.6.2. Requerimientos del Sistema

Se hace hincapié en los requisitos que el sistema demanda, teniendo en cuenta sus funciones y limitaciones. De esta forma, se tienen en cuenta requisitos físicos, de uso y de desempeño del sistema, como se describe en la Tabla 15.

Tabla 15

Requerimientos del Sistema

| Requerimientos del Sistema (SISR) | | | | |
|--|--|-----------|-------|------|
| # | Requerimiento | Prioridad | | |
| | | Alta | Media | Baja |
| REQUERIMIENTOS FÍSICOS | | | | |
| SISR1 | Tamaño de fotoreceptores pequeños y livianos | X | | |
| SISR2 | Línea de vista adecuada | X | | |
| SISR3 | Indicador de estado de LED del fotoreceptor | | X | |
| SISR4 | Iluminación de bombillas LED agradable | | X | |
| SISR5 | Energización fácil de las bombillas LED | X | | |
| SISR6 | Movilidad de los dispositivos de comunicación sin problema dentro del entorno de uso | X | | |

| REQUERIMIENTOS DE USO | | |
|--------------------------------------|--|---|
| SISR7 | Fácil acceso a la red | X |
| SISR8 | Software y herramientas de pruebas gratuitos | X |
| SISR9 | Herramientas de tráfico gráficas | X |
| REQUERIMIENTOS DE PERFORMANCE | | |
| SISR10 | Velocidad de conexión inalámbrica con bajo retardo | X |
| SISR11 | Privacidad de información segura | X |
| SISR12 | Enlace inalámbrico full dúplex | X |

Nota. Fuente: Autoría

3.2.6.3. Requerimientos de Arquitectura

Los requerimientos de arquitectura describen los componentes tanto en hardware como en software, tomando en cuenta las características propias del sistema como tal, que en este caso es la red LiFi a implementarse y los softwares que se utilizarán para evaluar el desempeño de la red, conjuntamente con las diferentes aplicaciones que tendrá el módulo de prácticas de laboratorio (Obsérvese la Tabla 16).

Tabla 16

Requerimientos del Arquitectura

| Requerimientos del Arquitectura (SASH) | | | | |
|---|--|-----------|-------|------|
| # | Requerimiento | Prioridad | | |
| | | Alta | Media | Baja |
| REQUERIMIENTOS DE HARDWARE | | | | |
| SASH1 | Antenas fotónicas suficientes | X | | |
| SASH2 | Fotoreceptores deben de tener puerto USB | X | | |
| SASH3 | Ubicación adecuada del AP LiFi | X | | |
| SASH4 | Facilidad de conexión a la red | X | | |
| SASH5 | Tamaño reducido de los dongles LiFi o fotoreceptores | | X | |
| REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE | | | | |

| | | |
|--------------|--|---|
| SASH6 | Tecnología LiFi compatible con sistemas operativos Windows 10, Linux, MacOS | X |
| SASH7 | Herramientas libres y gratuitas para evaluar el rendimiento de la red | X |

REQUERIMIENTOS DE ELÉCTRICOS

| | | |
|--------------|--|---|
| SASH8 | Suficientes tomas de corriente para abastecer los equipos de la red | X |
|--------------|--|---|

Nota. Fuente: Autoría

3.2.7. Recursos

En la presente sección se hace referencia a los elementos que son indispensables al momento de montar la red LiFi, para posteriormente realizar el módulo de prácticas de laboratorio.

3.2.7.1. Recursos Humanos

Los recursos humanos son uno de los elementos indispensables que este caso menciona a las personas que intervienen o colaboran en el trabajo de investigación. Para lo cual se detalla a continuación en la Tabla 17.

Tabla 17

Recursos Humanos

| Recursos Humanos | |
|--|----------------------------|
| Poleth Escobar | Desarrollador del proyecto |
| Ing. Jaime Michilena Msc. | Tutor |
| Ing. Edgar Maya Msc. | Asesor |
| Laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas | Entorno de aplicación |
| Estudiantes Asignatura “Comunicaciones Inalámbricas” | Beneficiados |
| Ing. Alejandra Pinto | Técnico – Docente |

Nota. Fuente: Autoría

3.2.7.2. Recursos Tecnológicos

Los recursos tecnológicos son importantes definirlos desde principio ya que son las herramientas con las que se va a desarrollar el proyecto en curso. Para el caso la Tabla 18 muestra los recursos tecnológicos utilizados en la implementación de la red LiFi.

Tabla 18

Recursos Tecnológicos

| Nombre de la Herramienta | Función |
|---------------------------------|--|
| Punto de acceso LiFi | Proporcionar el acceso a la red, manteniendo una comunicación bidireccional de alta velocidad de datos y acceso multiusuario con asociaciones de usuarios dinámicas. |
| Antena fotónica LiFi | Hacer la función de un repetidor. Conocida también como extensor de alcance LiFi que toma una señal existente de un AP y la retransmite para crear una segunda red. |
| Dongle USB LiFi | Permitir que una estación de computadora module/demodule el flujo de luz para comunicarse con una luminaria LiFi. |
| Kit de montaje | Herramientas varias que ayudarán a la implementación de la red (Tornillos, amarras, entre otros) |
| Cable CAT6 | Permitir la conexión Ethernet desde el módem de Internet, para crear una red de área local (LAN) posteriormente con LiFi. |
| Dispositivo de conmutación PoE | Permitir que el cable de red proporcione tanto datos como energía para dispositivos habilitados para PoE, proporcionando mayor potencia, además de reducir una gran cantidad de cables de alimentación durante la conexión en red. |

Nota. Fuente: Autoría

La elección del Hardware y Software en el presente proyecto conlleva a seleccionar el sistema LiFi y la herramienta de análisis de tráfico para la posterior evaluación de la red, juntamente con el módulo de prácticas de laboratorio.

3.2.8. Elección del Hardware

Este apartado realiza una comparativa entre los diferentes datasheets de módulos de empresas desarrolladoras de la tecnología LiFi, que han basado su estudio en el estándar IEEE 802.15.7. Tomando a ciertos requerimientos principales de STSR, SISR y SASR correspondientes a las Tablas 14, 15 y 16 respectivamente para posteriormente seleccionar aquel dispositivo que ofrezca mayor costo – beneficio, dada la puntuación más alta.

Tabla 19

Comparativa de sistemas LiFi

| Requerimientos | Pure LiFi LiFi XC | Oledcomm LifiMAX | Fraunhofer Li-Fi Hot | Signify Trulifi6002 | Terra Ferma LiFi-Max |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|
| STSR1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| STSR8 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| STSR10 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| SISR7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SISR11 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SISR12 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| SASH2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SASH4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| SASH5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| SASH6 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| SASH8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Puntuación | 7 | 10 | 9 | 7 | 8 |
| Cumple (1) - No Cumple (0) | | | | | |

Nota. Fuente: (Fraunhofer IPMS, 2018; Oledcomm, 2020; PureLifi, 2018; Signify, 2022;

TERRA FERMA, 2021)

Existen algunas empresas que han incursionado en la investigación y desarrollo de esta tecnología. Sin embargo, para el proyecto en curso, no todas cumplen con los requisitos necesarios. Después del análisis comparativo visto en la Tabla 19, el módulo LiFiMAX de la empresa Oledcomm obtuvo la mayor puntuación, 10/11, ya que cumple con el 90.9% de los requerimientos principales tanto de stakeholders, de sistema y de arquitectura.

Oledcomm es una empresa europea ubicada en Francia que desde el 2005 empezaron con su primera investigación sobre la comunicación a través de la luz visible VLC - LiFi. Actualmente, es una de las empresas más galardonadas por su trayectoria investigativa siendo líder mundial en comunicaciones ópticas y fotónicas, que brindan soluciones mediante conectividad inalámbrica, con una velocidad muy alta y ultra segura (Oledcomm, 2020).

Por las razones mencionadas esta empresa ha sido seleccionada, donde se va a hacer uso del kit LiFiMAX para montar la red en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas de la carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones en la Universidad Técnica del Norte. A continuación, se describe las características de los componentes principales del sistema.

3.2.8.1.LiFiMAX

LiFiMAX es utilizado por lo general en ambientes de oficina como, por ejemplo, espacios de trabajo, coworking, aviones, departamentos gubernamentales, entidades bancarias, financieras y entornos industriales M2M sensibles a las radiofrecuencias.

LiFiMAX es un sistema plug and play, ya que no es necesario instalar controladores o software adicionales a menos que se requiera monitorear la red, brinda una conexión a internet muy veloz y confiable, para que hasta 32 personas puedan conectarse al mismo tiempo. Es muy fácil de instalar, ya que cuenta con un punto de acceso que cubre hasta 6 antenas fotónicas que se pueden fijar sin complicaciones en cualquier techo. Para conectarse a la red, solo se necesita enchufar el dongle LiFiMAX en el puerto USB del

dispositivo de comunicación, así se podrá disfrutar de todos los beneficios de esta red más segura y rápida. Además, utiliza el cifrado Advanced Encryption Standard (AES) 128, para el cifrado de datos confidenciales, el cual es muy eficiente y reconocido en todo el mundo.

Este sistema es perfecto tanto para lugares pequeños como grandes, y se puede ampliar para cubrir superficies de hasta 200 m². El kit tiene una transferencia de datos rápida y garantizada con descarga de 150 Mbps y carga de 140 Mbps, es compatible con los sistemas operativos Windows (7, 8, 10), Mac OS, Linux y Android. El sistema está compuesto por:

- 1 punto de acceso LiFi
- 1 controlador de software
- 2 antenas fotónicas
- 5 dongles (USB sticks)
- Cables/accesorios de montaje

Cada uno de los componentes mencionados son imprescindibles para el montaje de la red, en esta cláusula se menciona las características, funciones y propósitos que tienen cada uno de ellos para entender el funcionamiento de la red en conjunto.

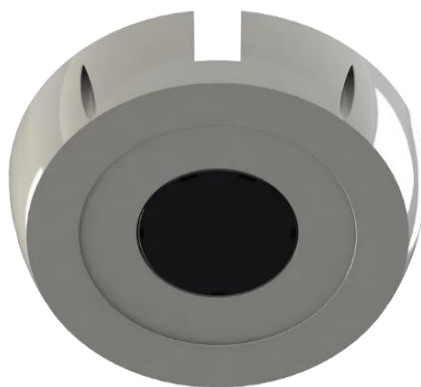
Punto de acceso LiFiMAX: permite la configuración y gestión de la red para tener conexión a Internet rápida y confiable utilizando LiFi, su funcionalidad es similar a la de un punto de acceso de WiFi, pero en lugar de utilizar ondas de radiofrecuencia, utiliza ondas de luz visible.

El punto de acceso LiFi es crucial, pues cumple con varias funciones como, la gestión para la autenticación y autorización para que dispositivos autorizados se unan a la red. Como también el control y la configuración de la red para establecer políticas de seguridad, esto es más común cuando se necesita una seguridad muy reforzada, ya que LiFi por sí sola ya es una tecnología segura debido a la cobertura limitada.

Otra función es la asignación de direcciones IP a los dispositivos que se conecten a la red mediante un servidor DHCP. Incluso, LiFi puede coexistir con WiFi, pues los dispositivos LiFi pueden obtener sus direcciones IP a través del mismo enrutador que asigna direcciones IP a la red WiFi, utilizando DHCP. En el AP se puede configurar diferentes parámetros de la red, ajustar la intensidad de la luz para la transmisión de los datos, actualizar el firmware del sistema, etc. (Oledcomm, 2020).

Figura 22

Punto de Acceso LiFiMAX



Nota. Fuente: (Oledcomm, 2020)

Tabla 20

Características del AP de LiFiMAX

| Parámetros | Valor Nominal | Unidades |
|----------------------------|----------------------|-----------------|
| Voltaje de alimentación | 100-220 | VDC |
| Interfaz de datos | Gigabit Ethernet | - |
| Interfaz de controlador | 8 conectores 3.0 | - |
| Potencia nominal | <5 | w |
| Indicador de estado de LED | verde | - |
| Diámetro AP | 12,3 | cm |
| Peso del AP | 349 | g |
| Temperatura de operación | 0-60 | °C |

Nota. Fuente: (Oledcomm, 2020)

Antena fotónica LiFiMAX: Las antenas LiFi se utilizan para enviar datos mediante luz. Estas antenas generan luz utilizando la tecnología OLED (Organic Light Emitting Diode) y pueden configurarse para transmitir diferentes señales de datos. La luz producida por las antenas contiene información codificada que los dispositivos habilitados para LiFi pueden captar y decodificar (Oledcomm, 2020)v.

Estas antenas son capaces de producir luz a altas frecuencias y velocidades de transmisión, permite la transferencia de cantidades sustanciales de datos y pueden transmitir datos minimizando el consumo de energía.

Las antenas fotónicas utilizan técnicas como la difracción, la refracción y la reflexión para cambiar la dirección y la polarización de las ondas. Algunas características importantes de estas antenas pueden incluir una alta eficiencia de radiación, un amplio ancho de banda, buena directividad y alta ganancia.

Figura 23

Antena fotónica LiFiMAX



Nota. Fuente: (Oledcomm, 2020)

Tabla 21

Características de las antenas fotónicas de LiFiMAX

| Parámetros | Valor Nominal | Unidades |
|----------------------------|------------------|----------|
| Voltaje de alimentación | 100-220 | VDC |
| Interfaz de datos | Gigabit Ethernet | - |
| Interfaz de controlador | RJ45 | - |
| Potencia nominal | <5 | w |
| Indicador de estado de LED | rojo | - |
| Diámetro antena | 7 | cm |
| Peso | 90 | g |
| Temperatura de operación | 0-10° | °C |

Nota. Fuente: (Oledcomm, 2020)

Dongles LiFiMAX: también conocidos como LiFi Receivers, cumplen la función de recibir y procesar datos en una red inalámbrica LiFi. Estos dispositivos tienen incorporados un fotodiodo que es capaz de capturar la señal de luz transmitida por la red, y un procesador que se encarga de traducirla en un sistema binario que el dispositivo portátil pueda entender. Para utilizar un Dongle LiFi, simplemente se necesita conectarlo al dispositivo que se desea conectar a la red, utilizando un conector USB tipo C. De esta forma, el dispositivo portátil podrá conectarse a la red LiFi y comenzar a recibir datos de manera inalámbrica. En la Tabla 25 se indican la información de las características operables del dongle.

Figura 24

Dongle LiFiMAX



Nota. Fuente: (Oledcomm, 2020)

Tabla 22*Características de los dongles de LiFiMAX*

| Parámetros | Valor Nominal | Unidades |
|----------------------------|----------------------|-----------------|
| Interfaz de datos | USB 3.0 / tipo C | - |
| Potencia nominal | <5 | w |
| Indicador de estado de LED | verde ON/rojo OFF | - |
| Tamaño (largo) | 6,5 | cm |
| Peso del dongle | 77 | g |
| Temperatura de operación | 0-60 | °C |

Nota. Fuente: (Oledcomm, 2020)

3.2.9. Elección de Software

En esta sección se realiza la selección de la herramienta de análisis de tráfico, ya que es fundamental para comprender, monitorear y analizar el comportamiento de la red. Poner a prueba LiFi en diferentes escenarios es crucial para evaluar su rendimiento en condiciones variables. La elección adecuada de la herramienta garantiza una recolección precisa de datos y una interpretación precisa de las métricas.

A continuación, en la Tabla 23 se muestra diferentes herramientas de análisis de tráfico, con alta demanda por parte de los usuarios. Tomando en cuenta los requerimientos de stakeholders, sistema y arquitectura se selecciona la mejor herramienta para evaluar las diferentes métricas de rendimiento de la red LiFi.

Cabe recalcar que la falta de herramientas para analizar paquetes LiFi se atribuye a la novedad de esta tecnología, con desafíos técnicos específicos relacionados con la captura de señales de luz, la necesidad de hardware especializado y la falta de una demanda masiva en comparación con tecnologías más establecidas como WiFi.

Tabla 23*Comparativa herramientas de análisis de tráfico*

| Requerimientos | D-ITG | Wireshark | IPerf | PRTG | NESUS |
|-----------------------------------|--------------|------------------|--------------|-------------|--------------|
| STSR9 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| STSR12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| STSR13 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| SASH7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| STSR14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Puntuación | 5 | 5 | 5 | 2 | 1 |
| Cumple (1) - No Cumple (0) | | | | | |

Nota. Fuente: Autoría

En base a los requerimientos, los resultados para seleccionar la herramienta de análisis de tráfico que permita analizar el rendimiento de la red LiFi en diferentes escenarios se tiene con el mismo puntaje más alto a tres de ellas D-ITG, Wireshark e IPerf. Cada una de ellas tienen características en comunes como su libre acceso, fácil instalación y manejo, y operan en sistemas operativos diferentes sin ningún problema.

Brevemente, se nombra a continuación el objetivo de cada una de las herramientas de análisis de tráfico a utilizar y su función a desarrollar en el presente trabajo de investigación.

3.2.9.1.D-ITG

D-ITG (Distributed Internet Traffic Generator) es una herramienta para generar tráfico de red, capaz de medir el rendimiento en una red, mediante diferentes métricas definidas en el análisis de desempeño de una red. Funciona en varios sistemas operativos y consta de dos componentes principales, ITGSend para generar tráfico y ITGRecv para recibirlo, ambos

capaces de generar registros detallados para cada paquete enviado y recibido, de tal forma que se puede analizar el desempeño de la red (Srivastava et al., 2014).

D-ITG en el contexto del presente trabajo contribuye a cumplir con el objetivo 3, pues se genera tráfico bajo la red LiFi para poder obtener resultados de las transmisiones en diferentes escenarios y poder analizar las métricas de desempeño y evaluar la eficiencia de la red en la transmisión de datos.

3.2.9.2. Wireshark

Wireshark es una herramienta utilizada para el análisis de tráfico, que captura paquetes de datos para posteriormente analizarlos. Permite a los usuarios inspeccionar protocolos, analizar el flujo de datos, detectar problemas en la red y comprender el comportamiento de una red en tiempo real (Ali & Mouftah, 2011). Hasta la fecha, no existe un Sniffer conocido capaz de capturar paquetes LiFi y demostrar todas sus particularidades, debido al continuo desarrollo de esta tecnología. Sin embargo, Wireshark posibilita la captura de paquetes de datos en una transmisión LiFi, permitiendo la visualización de las características y parámetros exclusivos que definen a LiFi bajo el estándar IEEE 802.15.7, con ciertas limitaciones.

3.2.9.3. IPerf

Iperf se utiliza para la evaluación de parámetros como el ancho de banda, el retardo, la pérdida de paquetes, etc., tanto para el tráfico TCP como UDP. Tiene una interfaz basada en terminal de comandos y también en GUI y se llama Jperf (Srivastava et al., 2014).

Al emplear Iperf bajo LiFi, se puede simular la transmisión de datos a través de la modulación de la luz. Al medir la tasa de transferencia entre un cliente y un servidor LiFi utilizando Iperf, se puede obtener una visión clara del ancho de banda disponible en la red en condiciones específicas, permitiendo identificar la capacidad de la red para transmitir datos a través de la luz.

CAPÍTULO IV: DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN

Luego de recopilar los diferentes recursos y requerimientos en base a las necesidades de los involucrados, se presenta este capítulo con las fases consecutivas de la metodología en cascada correspondientes al diseño, implementación y evaluación, con el objetivo de evaluar el rendimiento de la red LiFi, tecnología basada en la norma IEEE 802.15.7 y proceder a realizar el módulo de prácticas de laboratorio en el capítulo V.

4.1. Diseño

La fase de diseño presenta la perspectiva del funcionamiento de la red de forma estructurada, tomando en cuenta los criterios como también las limitaciones que se encontraron durante el análisis de los requerimientos.

4.1.1. Diagramas de funcionamiento

Esta fase es crucial, pues da a conocer el funcionamiento físico y lógico del sistema, mediante diferentes recursos como diagramas de bloque y de flujo.

4.1.1.1. Diagrama de topología de red

El diseño de la topología muestra la estructura de la red, ofreciendo una visión general de cómo están conectados los dispositivos y cómo está distribuida la red física.

La implementación de la red LiFi se da mediante una topología tipo estrella, ya que el propósito del trabajo es que varios usuarios hagan uso de ella. Como se mencionó en la sección 2.4.1. esta topología necesita de un nodo coordinador el cual permitirá una fácil administración y gestión de la red; además, es adecuada para entornos pequeños como lo es el laboratorio de comunicaciones inalámbricas. El AP de LiFi es el nodo central que controla los dispositivos receptores para que exista una conexión eficiente y escalable.

Para montar la red LiFi, se requieren dos cables RJ45 CAT 7 para la conexión directa al Punto de Acceso (AP). El primer cable, con una longitud total de 2 metros, se conecta a la antena 1, mientras que el segundo, con 4 metros de longitud, se utiliza para la conexión a la antena 2, debido a la disposición física de las antenas en el área. Dos cables RJ45 adicionales se necesitan, uno para la conexión del AP LifiMAX al PoE + y otro cable desde una salida Ethernet al PoE del puerto de datos. En la Figura 24 se aprecia la topología de red LiFi en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas.

Figura 25

Diseño de topología de la red



Nota. En base a el área del laboratorio, se propone que haya 2 antenas fotónicas para cubrir el área de trabajo, pues cada una de ellas tiene una cobertura aproximada de $10m^2$. Fuente: (Oledcomm, 2020) – Editado por el Autor.

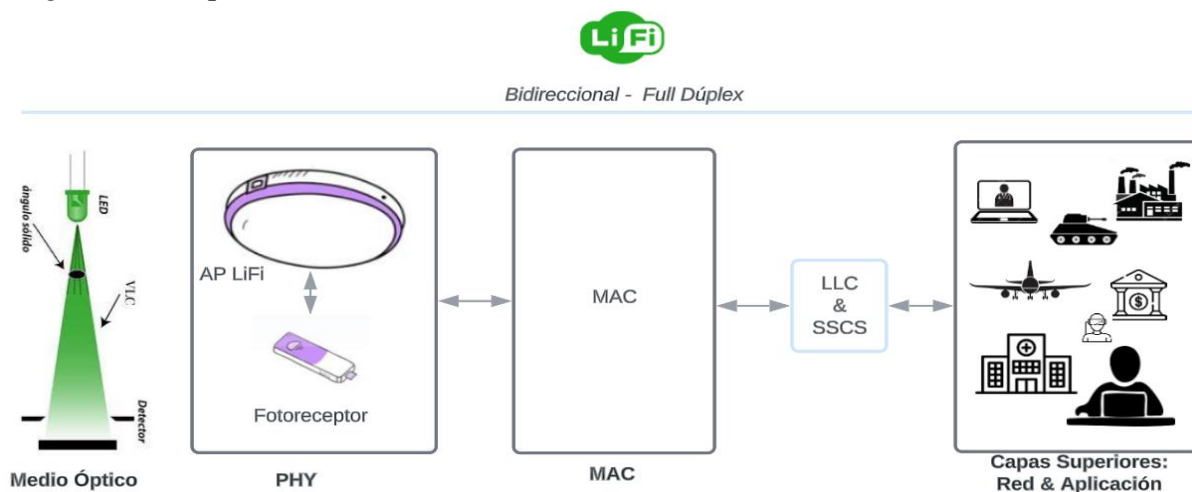
4.1.1.2. Diagrama de arquitectura del sistema

La Figura 27 presenta el diagrama de arquitectura del sistema, utilizando el modelo basado en el estándar IEEE 802.15.7. Este modelo se utiliza como referencia para comprender la disposición de las capas PHY y MAC en el funcionamiento de la red.

Los datos se transportan desde capas superiores (Aplicación y Red) a capas inferiores como la de enlace de datos y física. Para ello se utiliza la subcapa de control de enlace lógico LLC, la cual funciona como puente entre las capas superiores y MAC y a la vez esta hace uso de la subcapa de convergencia (SSCS) para acceder a los servicios de datos de MAC, en esta capa los datos son preparados con sus propios campos, y son enviados a la capa física, con el fin de que los datos sean transportados por el medio óptico o luz visible al receptor. Este proceso, de igual manera sucede cuando el receptor desea enviar datos al transmisor.

Figura 26

Diagrama de arquitectura del sistema



Nota. Fuente: (IEEE802.15.7, 2018; Oledcomm, 2020) – Editado por el Autor.

4.1.1.3. Diagrama funcionamiento del sistema LiFi

Primero, el usuario escanea el canal óptico en busca del mejor transmisor disponible, detectando cualquier trama de baliza que el transmisor está constantemente enviando, con el fin de intercambiar datos (PHY y MAC) de forma bidireccional, utilizando el acceso aleatorio ranurado (CDMA). La red LiFi a implementarse utiliza el modelo de capa física PHY II, donde hace el descubrimiento de los dispositivos a 1.25 Mbps.

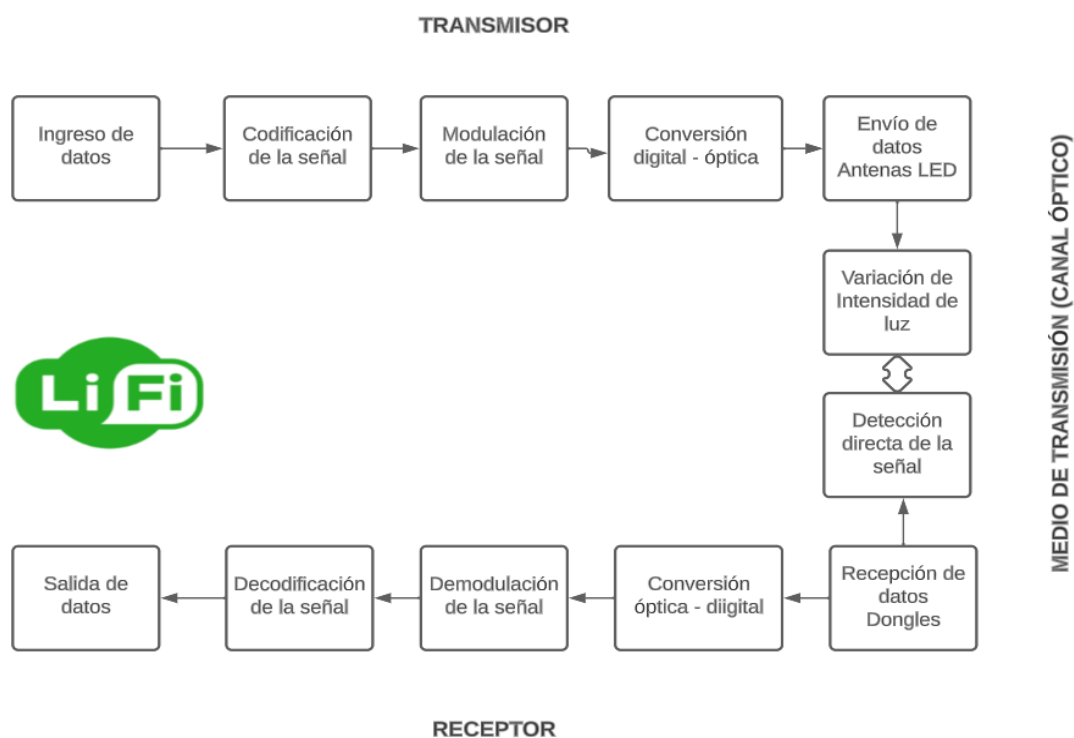
El usuario inicia un periodo de espera tras detectar la primera baliza, elige la mejor opción seleccionando la intensidad de señal recibida (RSS) más fuerte y, a continuación,

envía la solicitud de asociación. El transmisor contiene un modulador el cual convierte las señales digitales en señales ópticas y son transmitidas a través de LEDs internos dentro de la antena fotónica, mediante el canal óptico utilizando la técnica IM /DD (Obsérvese la Figura 3) y la modulación HACO-OFDM que ayuda a reducir el desvanecimiento por multitrayecto, además de adaptar a las variaciones de intensidad luminosa en entornos de LiFi,

En el lado del receptor se incluye un fotodetector, para que pueda capturar las señales ópticas y las convierta en digitales, luego, los datos son decodificados con 4B10B, y así ser entregados al usuario final. En la Figura 27 se puede apreciar el funcionamiento de la red basada en el IEEE 802.15.7 mediante un diagrama de bloques.

Figura 27

Diagrama de bloques del funcionamiento interno del sistema LiFi

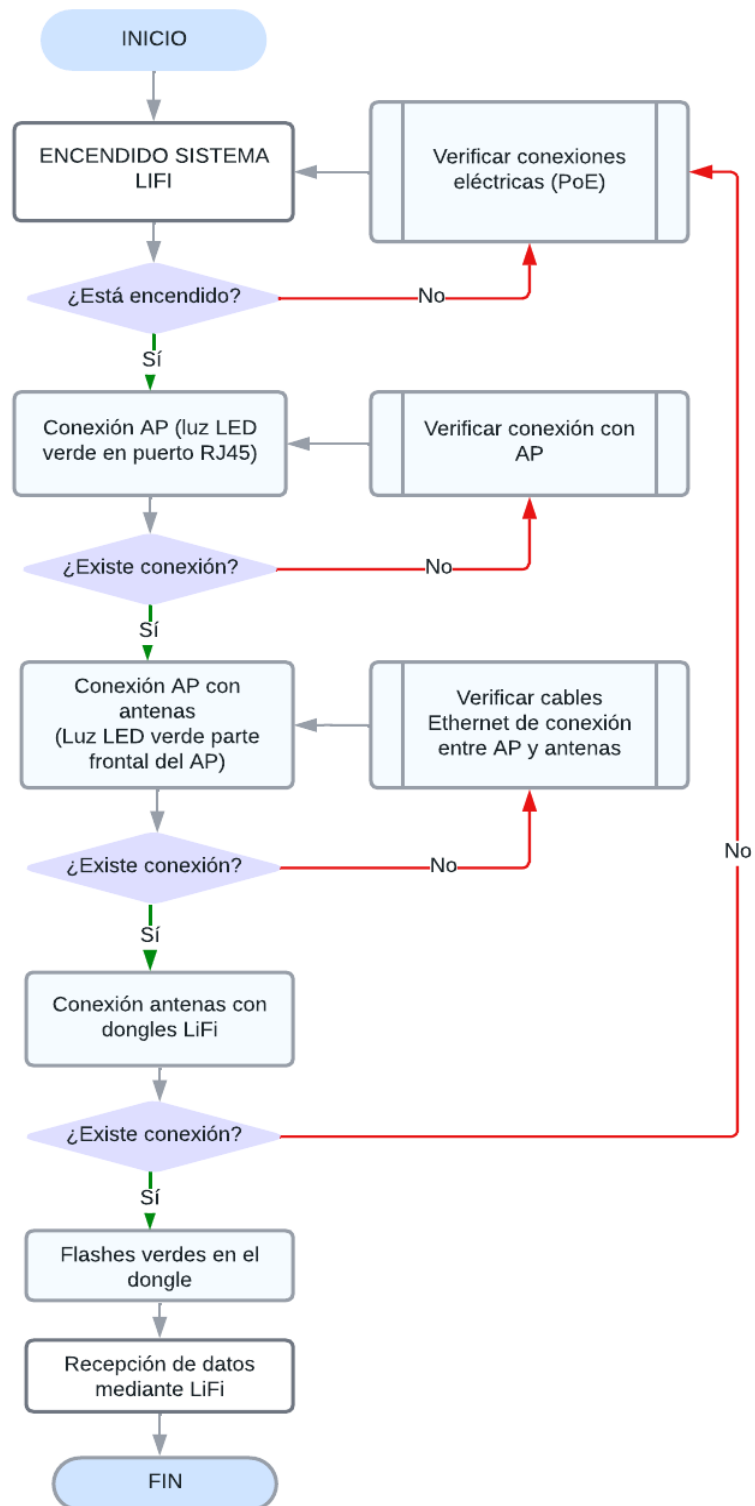


Nota. Fuente: (Sarode et al., 2023) – Editado por el Autor

A continuación, se muestra en la Figura 29 mediante un diagrama de flujo el proceso de instalación para llevar a cabo una conexión exitosa.

Figura 28

Diagrama de flujo



Nota. Fuente: Autoría

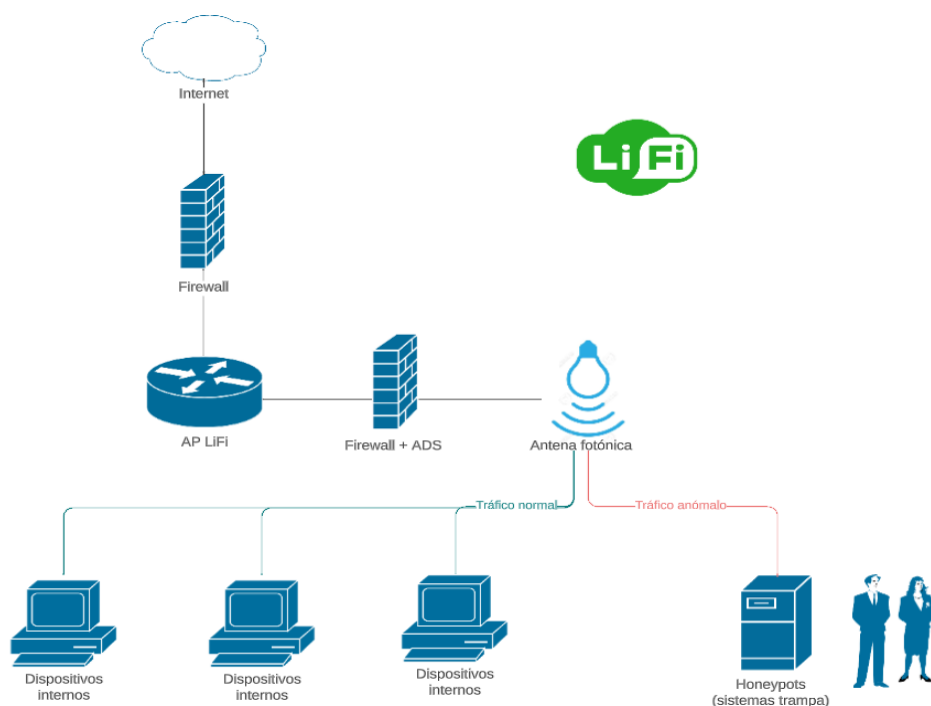
4.1.1.1. Diagrama de seguridad

Este gráfico muestra las medidas de seguridad que se aplicarán en la red, como cortafuegos, sistemas de detección de intrusos y políticas de control de acceso. Ayuda a visualizar cómo se protegerá la red y cómo se controlará el acceso a los recursos.

A pesar de que la tecnología se basa en la luz, y la red tiene poca posibilidad de ser atacada por terceras personas, el tráfico de datos a través de una red LiFi sigue siendo susceptible a amenazas como el acceso no autorizado, los virus y el robo de datos. Por eso se aconseja establecer medidas de seguridad, como el uso de cortafuegos, para proteger la red y los datos transmitidos.

Figura 29

Diagrama de seguridad de LiFi



Nota. Este sistema muestra una topología de seguridad de red básica. Cuenta con los dispositivos internos donde operan con varios servicios y un sistema de detección de anomalías (ADS) y honeypots (o sistemas trampa). Fuente: Autoría

La Figura 30 muestra el diagrama de seguridad de la red LiFi, donde se utiliza dos firewalls, uno antes y otro después del AP el cual permite el acceso a internet desde los dispositivos. Al utilizar dos firewalls en la red garantiza la protección ya que, si falla uno de ellos, el segundo firewall mantendrá protegida a la red.

La utilización de dos cortafuegos permite aplicar estrategias de detección y prevención de intrusiones en cada uno de ellos, lo que proporciona una defensa completa. Los dos cortafuegos trabajan conjuntamente para detectar y bloquear las amenazas con mayor eficacia.

Es importante destacar que, además de los cortafuegos, LiFi cuenta con un sistema de seguridad distinto en comparación con las redes de radiofrecuencia. Dado que utiliza ondas ópticas, los intentos de intrusión en la red se vuelven más complicados, ya que esta tecnología tiene una cobertura limitada. La única forma de acceder a los datos sería que el intruso debe encontrarse físicamente en la misma habitación. Sin embargo, la seguridad total aún depende de medidas adicionales, como autenticación y cifrado, para proteger la red LiFi contra amenazas potenciales.

4.1.2. Escenarios de pruebas

Para realizar las pruebas de rendimiento de la red LiFi, se toman en cuenta los requisitos y requerimientos establecidos en el capítulo anterior. En base a ellos, se definen diferentes escenarios de prueba considerando tres factores o desafíos relevantes que pueden afectar la conexión. Estos factores son: la interferencia causada por la luz ambiental, la distancia entre el transmisor y el receptor y las obstrucciones físicas.

En primer lugar, se plantea un escenario ideal sin problemas de interferencia por luz ambiental, dentro del alcance entre el transmisor y receptor de 2 m.

En relación con el primer factor, se exploran diferentes tipos de interferencia, como la luz natural externa, la luz artificial y la interferencia combinada. Por otro lado, en el segundo

factor se establece que a distancias de 2 o 3 metros la conexión funcionará correctamente. Sin embargo, surge la pregunta de qué sucede si el receptor se encuentra a una distancia de 4 metros del transmisor en la misma habitación. Además, Por último, se define un escenario para mostrar el rendimiento de la red cuando hay más de un dispositivo activo y un escenario para verificar si afecta o no la estabilidad de conexión cuando hay obstrucciones físicas entre el transmisor y receptor.

En cada escenario a excepción del escenario 7, se medirán diferentes métricas para analizar el rendimiento de la red y se registrarán los resultados correspondientes. Estos datos serán utilizados posteriormente para evaluar el desempeño de la red, conforme a lo estipulado en la cláusula 4.4.

4.1.2.1. Dimensionamiento

Se consideran los siguientes parámetros para el dimensionamiento de los diferentes escenarios:

- Existencia de interferencia: Permite identificar la pérdida de paquetes y las retransmisiones, lo que afecta la eficiencia de la red.
- Velocidad de transferencia: Indica la velocidad a la que se envía la información.
- Seguridad: Evalúa la seguridad del estándar WPA3.

A continuación, se define de forma conceptual las métricas a analizarse.

- Ancho de banda: es la cantidad o capacidad máxima de datos que se pueden transferir por unidad de tiempo y en términos más profundos (Stallings, 2008) menciona que el ancho de banda total es “la anchura del espectro” y el ancho de banda efectivo es “la concentración de mayor energía de una señal”.

- Retardo (Delay): tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el origen al destino en una transmisión.
- Jitter: variación en el retardo de la llegada de los paquetes de datos en una conexión a Internet.
- Pérdida de paquetes: es el número de paquetes que no llegan al destino final, debido a diversos factores que afectan la estabilidad del enlace.
- Bitrate: es la tasa de transferencia de datos real, son los bits enviados en una unidad de tiempo.

4.1.2.2. *Direccionamiento*

El direccionamiento de la red desempeña un papel fundamental al determinar los dispositivos que se utilizarán para realizar las pruebas de rendimiento de manera adecuada. En el contexto de los escenarios planteados, se contempla la utilización de 5 dispositivos que interactuarán entre sí, el direccionamiento está dado por el servidor DHCP del AP LiFi y se lo presenta en la Tabla 24. Esta configuración permite garantizar un entorno propicio para evaluar el rendimiento de la red.

Tabla 24

Direccionamiento dispositivos de prueba

| Dispositivo | Interfaz | Dirección IP | Gateway |
|--------------------|-----------------|---------------------|----------------|
| Dispositivo 1 | Ethernet 3 | 192.168.1.103/24 | 192.168.1.1 |
| Dispositivo 2 | Ethernet 3 | 192.168.1.6/24 | 192.168.1.1 |
| Dispositivo 3 | Ethernet 3 | 192.168.1.8/24 | 192.168.1.1 |
| Dispositivo 4 | Enp0s3 | 192.168.1.25/24 | 192.168.1.1 |
| Dispositivo 5 | Enp0s3 | 192.168.1.26/24 | 192.168.1.1 |

Nota. Fuente: Autoría.

4.2. Implementación

La fase de implementación en la metodología en cascada conlleva la traducción del diseño a un sistema funcional. En el contexto del trabajo en curso, la implementación conlleva implementar la red y hacerla operativa. A continuación, se detalla el proceso para montar la red LiFi en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas en la Facultad de Ciencias Aplicadas (FICA).

Un sistema LiFi puede tener dos formas de instalación: mediante AC/DC o PoE. La primera forma por AC/DC proporciona alimentación eléctrica a través de una toma de corriente común. Puede ser utilizado en aplicaciones donde se requiere una infraestructura eléctrica existente o en casos en los que no se dispone de una red Ethernet para implementar PoE.

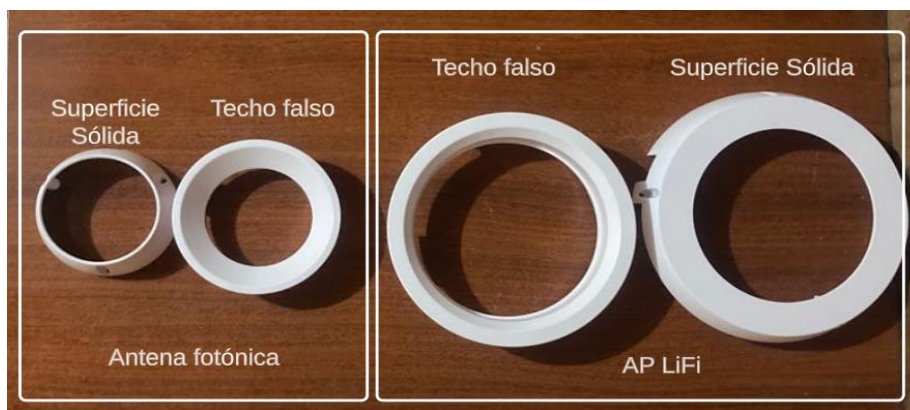
Mientras que la conexión con PoE (Power over Ethernet), permite la alimentación eléctrica y la transmisión de datos utilizando el mismo cable Ethernet. Este sistema es adecuado para aprovechar una red Ethernet existente, con el fin de simplificar la instalación y al mismo tiempo la red LiFi pueda ser escalable.

El sistema LiFi seleccionado de Oledcomm, utiliza alimentación por PoE permitiendo también la administración remota de los dispositivos, este aspecto es muy importante, pues para realizar las diferentes pruebas de rendimiento se requiere tener una conexión directa al nodo central.

Además, este sistema tiene diferentes accesorios de montaje que permiten al usuario elegir la superficie en la que se va a instalar. La Figura 31 muestra los accesorios tanto para el AP, como para las antenas fotónicas, que son adecuados siempre y cuando la superficie es un techo falso o para un techo sólido o real.

Figura 30

Accesorios de montaje del sistema LiFi



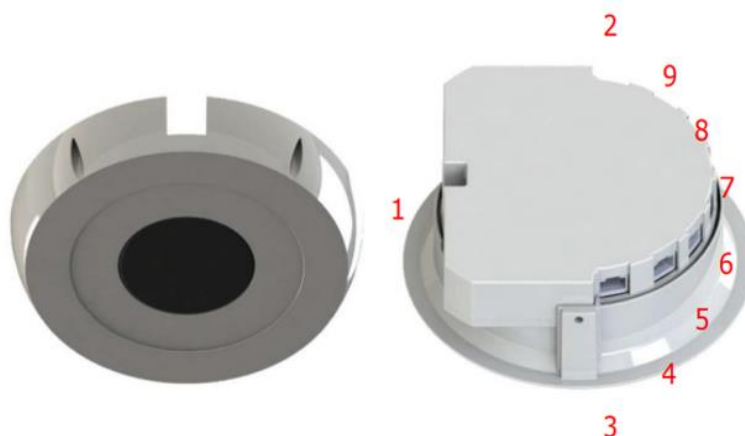
Nota. Fuente: Autoría

El AP de LiFi tiene un total de 9 puertos RJ45 numerados del 1 al 9 como se indica la Figura 32 y tienen funciones específicas como:

- Puerto 1: Interfaz para PoE, permite la alimentación y el intercambio de datos.
- Puertos 4 a 9: conexión de hasta 6 antenas fotónicas.
- Puertos 2 y 3: sincronización entre puntos de acceso.

Figura 31

Puertos AP LiFi



Fuente: (Oledcomm, 2020) – Editado por el Autor.

4.2.1. Montaje de red LiFi

Es necesario conectar el cable azul CAT 7 con las antenas. Hay 6 conexiones para máximo 6 antenas. Es decir, dos puertos serán utilizados, ya que el diseño de la topología consta de dos antenas fotónicas.

Figura 32

Conexión AP y antena fotónica

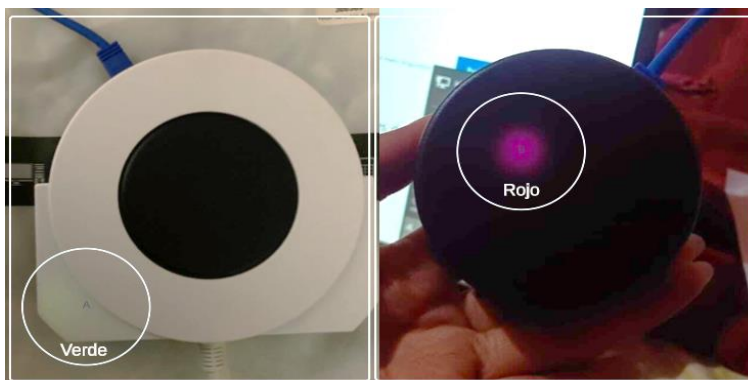


Nota. Fuente: Autoría

Utilizando otro cable Ethernet con puerto RJ45, se conecta el cable POE + desde el AP al módem/switch, ya que requiere 30W para alimentarse. Luego de uno o dos minutos el AP se conectará exitosamente a la antena.

Figura 33

Verificación de conexión entre el AP y la antena



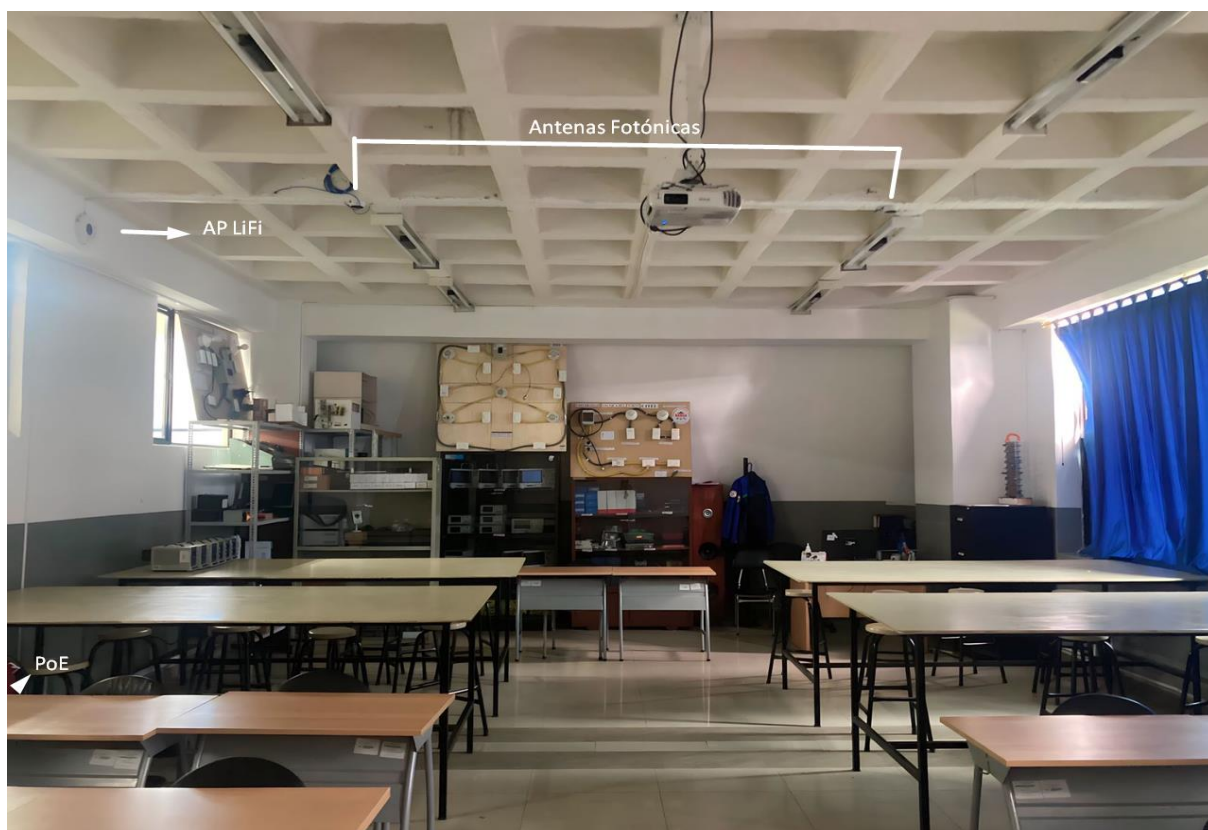
Nota. La Figura 34 muestra la conexión exitosa entre la antena y el AP. Cabe señalar que la señal de Internet al dispositivo procederá de la antena y no del punto de acceso. Fuente:

Autoría

Finalmente, en la Figura 35 se indica el montaje de la red LiFi en laboratorio de comunicaciones inalámbricas, en base al diseño de la Figura 26.

Figura 34

Red LiFi operativa en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas



Nota. Fuente: Autoría

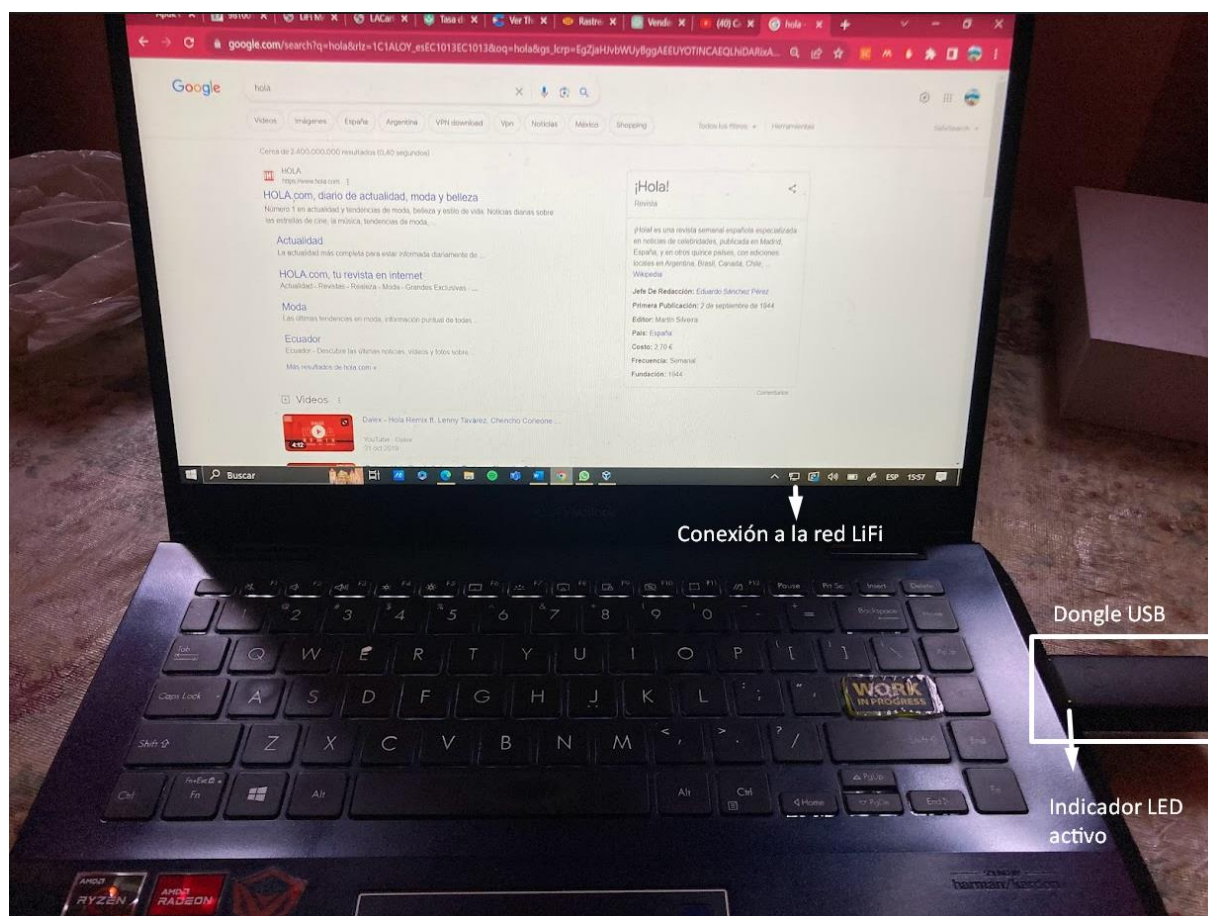
4.3. Evaluación

Conecte el dongle USB al dispositivo, y este al tener conexión con la antena empezará a tener flashes constantes de color verde, caso contrario si no recibe conexión este tendrá flashes de color rojo.

Ahora el dispositivo recibirá la conexión a Internet desde la antena haciendo uso del canal óptico mediante IM/DD, donde el receptor constantemente detecta de forma directa los cambios de la intensidad de la luz en el transmisor, el proceso de funcionamiento de LiFi está basado en la descripción técnica dada por el IEEE 802.15.7 en la cláusula 4.1.1.3.

Figura 35

Verificación de conexión desde el dongle a la antena fotónica



Nota. Al ser un sistema LiFi Plug and Play no se necesita instalar drivers en el dispositivo final. Los dispositivos actuales no tienen una tarjeta de red dedicada para IEEE 802.15.7 y por lo tanto al conectar el dongle USB a la computadora aparecerá directamente la conexión como una red cableada o Ethernet. Fuente: Autoría

Figura 36

Adaptador de red por LiFi

```

Adaptador de Ethernet Ethernet 3:

Sufijo DNS específico para la conexión. . . . . : 
Descripción . . . . . : Realtek USB GbE Family Controller
Dirección física. . . . . : 70-B3-D5-A4-3F-4D
DHCP habilitado . . . . . : sí
Configuración automática habilitada . . . . . : sí
Vínculo: dirección IPv6 local. . . . . : fe80::760:74f2:3239:e830%14(Preferido)
Dirección IPv4. . . . . : 192.168.1.36(Preferido)
Máscara de subred . . . . . : 255.255.255.0
Concesión obtenida. . . . . : domingo, 25 de junio de 2023 16:05:07
La concesión expira . . . . . : lunes, 26 de junio de 2023 16:05:07
Puerta de enlace predeterminada . . . . . : fe80::1%14
                                           192.168.1.1
Servidor DHCP . . . . . : 192.168.1.1
  
```

Nota. La dirección IP del dispositivo es dada por el AP LiFi mediante un servidor DHCP. Realtek USB GbE Family Controller es el dongle LiFi que está conectado al dispositivo (laptop) como fotoreceptor de la señal y así exista una conexión exitosa a Internet. Fuente: Autoría.

4.3.1. Captura de paquetes

Para verificar la conformidad de la red LiFi con el estándar IEEE 802.15.7, es esencial disponer de un sniffer específico capaz de capturar paquetes utilizando luz visible. Sin embargo, es importante destacar que, en la situación actual, este tipo de herramientas se encuentra en manos exclusivas del fabricante y no se encuentra disponible públicamente para su evaluación. La falta de acceso a un sniffer abierto al público limita la capacidad para llevar a cabo pruebas de captura de paquetes LiFi y evaluar la red en este aspecto.

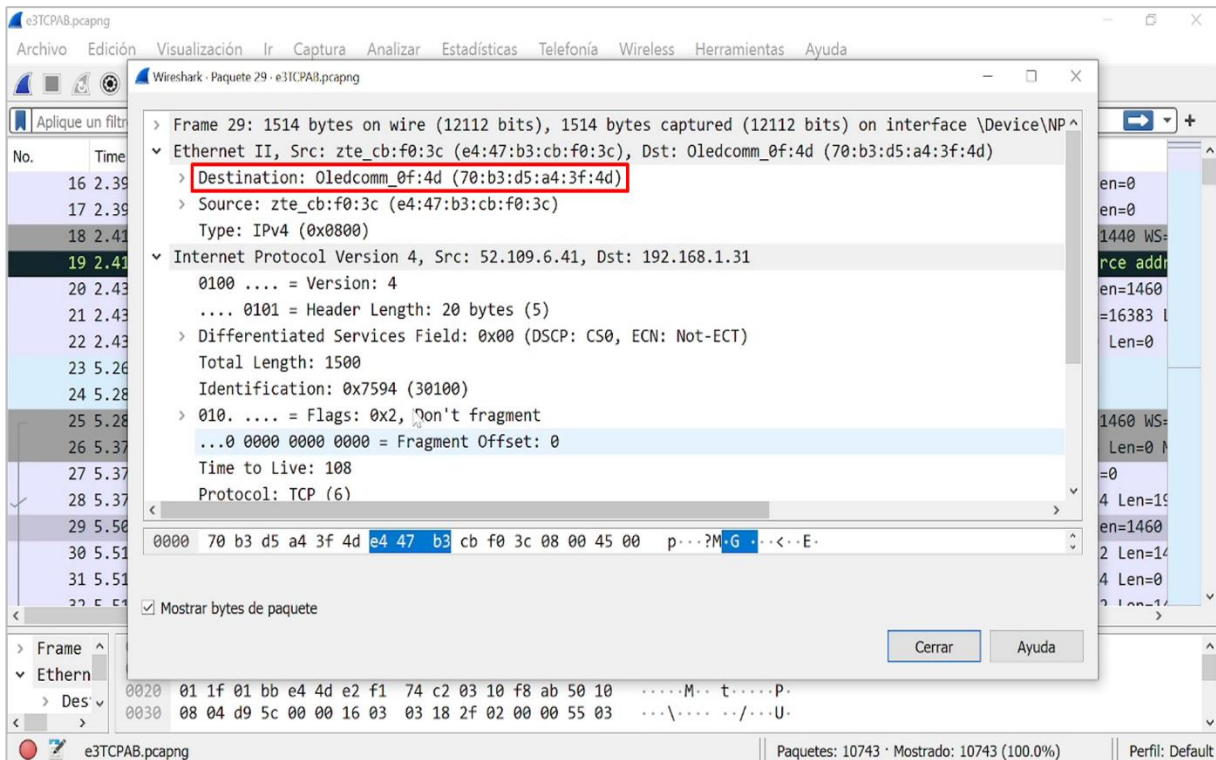
Cuando un dispositivo como una laptop se conecta al dongle LiFiMAX, el sistema es reconocido como una tarjeta Ethernet, y los paquetes LiFi se encapsulan utilizando el formato "Ethernet II" para su transmisión a través de la red.

Para identificar de manera efectiva los paquetes LiFi en este escenario, se empleará la herramienta de análisis de tráfico Wireshark, donde se presta especial atención a ciertos

campos dentro de las tramas Ethernet II que indican claramente que se trata de paquetes LiFi conforme al estándar IEEE 802.15.7. Un elemento clave son las direcciones MAC específicas asignadas por el fabricante, en este caso, Oledcomm (Obsérvese la Figura 38).

Figura 37

Direcciones MAC Específicas



Nota. Fuente: Autoría

CAPÍTULO V: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y GUÍAS DE LABORATORIO

En este capítulo, se realiza una evaluación exhaustiva del rendimiento de la red LiFi implementada en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas. Se emplean las métricas definidas en la cláusula 4.1.2.1 y se exploran diferentes escenarios para obtener una comprensión completa de su capacidad y calidad. El objetivo principal es habilitar un módulo de prácticas de laboratorio que permita a los estudiantes llevar su comprensión teórica a la práctica y aplicar tecnologías inalámbricas avanzadas como lo es LiFi, según la Unidad 3 del sílabo de la materia. Esto fomentará un aprendizaje más dinámico y enriquecedor para los estudiantes.

5.1. Pruebas de rendimiento de la LiFi

Mediante IPerf/JPerf y D-ITG como herramientas para análisis de tráfico de red gratuitas, se pretende observar el desempeño de LiFi. La Tabla 25 muestra los principales comandos y su terminología a utilizarse en los escenarios de prueba para Iperf/JPerf.

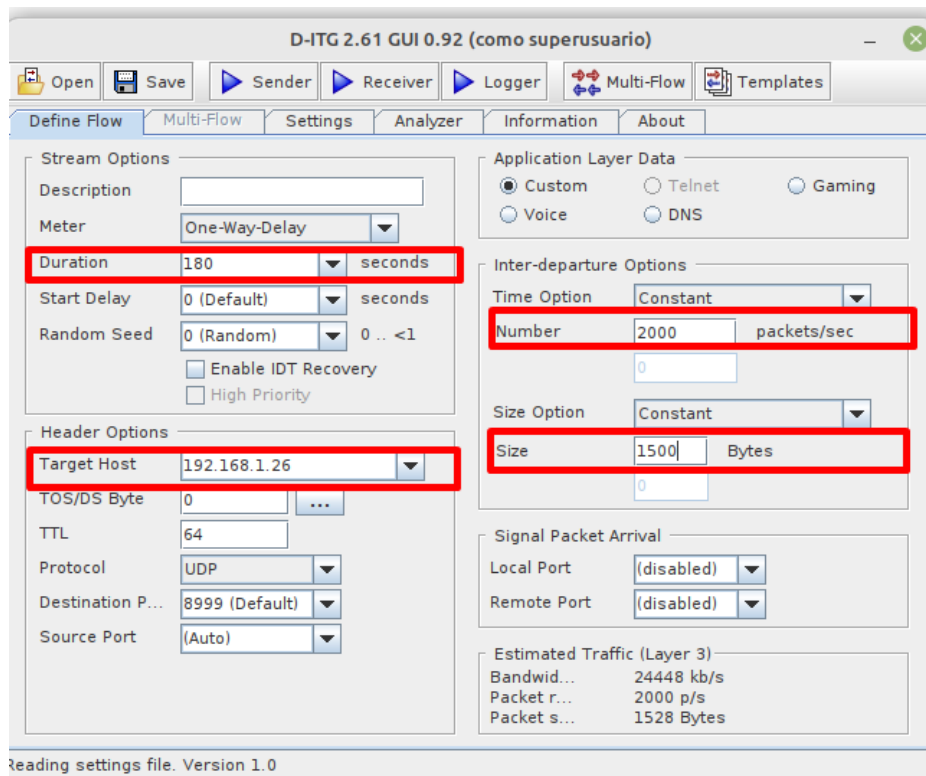
Tabla 25

Terminología IPerf

| Comando | Descripción |
|---------|--|
| -s | Servidor |
| -c | Cliente |
| -t | Tiempo total para enviar paquetes (segundos) |

Nota. Fuente: (Javier Archidona, 2014) - Editado por Poleth Escobar

Con respecto a D-ITG es necesario configurar los parámetros en el emisor que se muestran en la Figura 39. Mientras que el receptor está a la escucha de recibir las transmisiones.

Figura 38*Configuración D-ITG modo Emisor*

Nota. Fuente: Autoría

La inyección de tráfico se basará en los datos de la Tabla 26, donde se enviarán 2000 paquetes por segundo durante un período de 3 minutos. Esto generará una carga de tráfico considerable, permitiendo evaluar cómo la red LiFi maneja una carga intensa durante un tiempo prolongado. Se ha seleccionado un tamaño de paquete de 1500 bytes, que es apropiado para la transmisión de datos en una red LiFi y se asemeja al tamaño máximo del paquete Ethernet estándar (MTU), donde no existirá fragmentación exhaustiva que puede ser contraproducente. Es importante destacar que el tamaño del MTU en LiFi no está especificado por el IEEE 802.15.7(IEEE802.15.7, 2018; Narváez, 2023).

Además, se utilizará UDP ya que es ideal para pruebas de estrés en la red porque permite enviar rápidamente grandes cantidades de datos sin esperar confirmaciones. Esto ayuda a evaluar la capacidad de la red para manejar tráfico a alta velocidad y bajo diferentes cargas.

Tabla 26*Parámetros de inyección de tráfico D-ITG*

| Parámetro | Descripción |
|--------------------------------|-----------------|
| Cliente L1 | 192.168.1.25/24 |
| Servidor L2 | 192.168.1.26/24 |
| Protocolo | UDP |
| Tamaño de paquete (Bytes) | 1500 bytes |
| Número de paquetes por segundo | 2000 pkts/seg |
| Duración (s) | 180 |

Nota. Fuente: (Narváez, 2023) – Editado por el Autor

5.1.1. Escenario 1: Sin interferencias (Ideal)

Objetivo: Evaluar el rendimiento de la red LiFi en ausencia de interferencias lumínicas externas o internas.

Procedimiento: Se establecerá un entorno controlado sin fuentes adicionales de luz, dentro del alcance de las antenas fotónicas, con el fin de observar la estabilidad de la conexión en base a las métricas anteriormente nombradas. La Figura 40 muestra físicamente la disposición del escenario 1.

Figura 39

Escenario de prueba 1 (Sin interferencias lumínicas)



Nota. Fuente: Autoría

- **Ancho de Banda**

La Figura 41 muestra la medición de ancho de banda entre el cliente y el servidor, mediante la herramienta de tráfico IPerf/JPerf. El ancho de banda absoluto se lo puede observar utilizando TCP, ya que al utilizar mecanismos de control de flujo y retransmisión garantiza la entrega de los paquetes a su destino permitiendo que exista una sobrecarga de ancho de banda para mantener la conexión fiable. Como resultado, ofrece una medición más precisa de la capacidad de la conexión en condiciones controladas.

-Cliente

```
Iperf3 -c 192.168.1.25 -t 180 -f m
```

-Servidor

```
Iperf3 -s
```

Figura 40

Ancho de banda absoluto E1 TCP



Nota. En un escenario sin interferencias de luz natural o artificial se puede observar que el

ancho de banda absoluto en una conexión TCP en 3 minutos es de 4.042 Gbps. Fuente:

Autoría

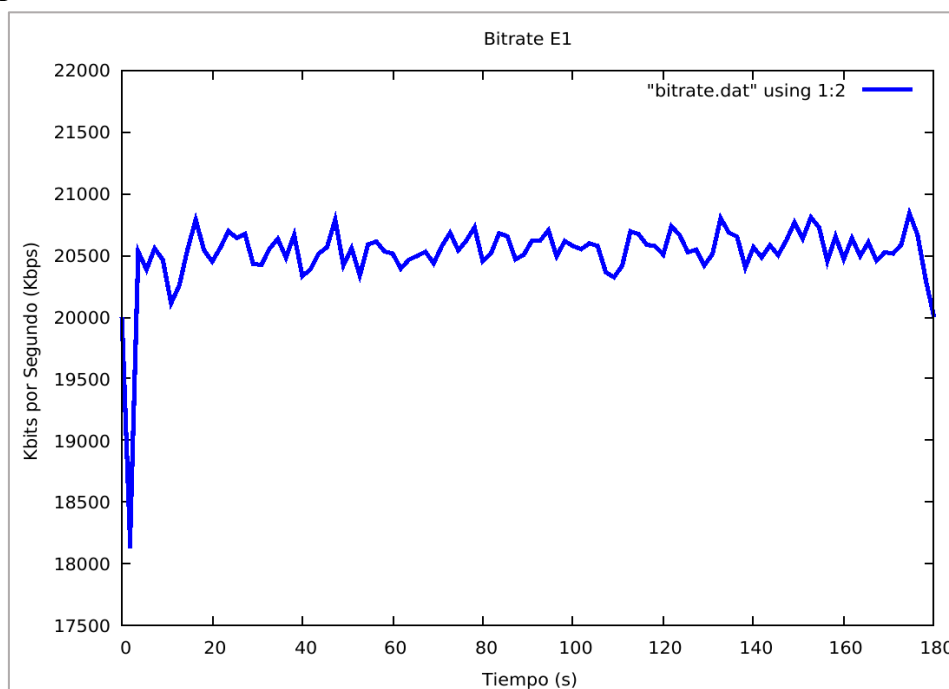
D-ITG se utilizará para medir las siguientes métricas, donde se pretende inyectar tráfico según la Tabla 26, todo se realiza mediante el protocolo UDP.

- **Bitrate**

El bitrate para esta primera conexión se lo aprecia en la Figura 42, el resultado de la tasa de transferencia promedio es de 20530.327991 Kbit/seg (20.530 Mbps).

Figura 41

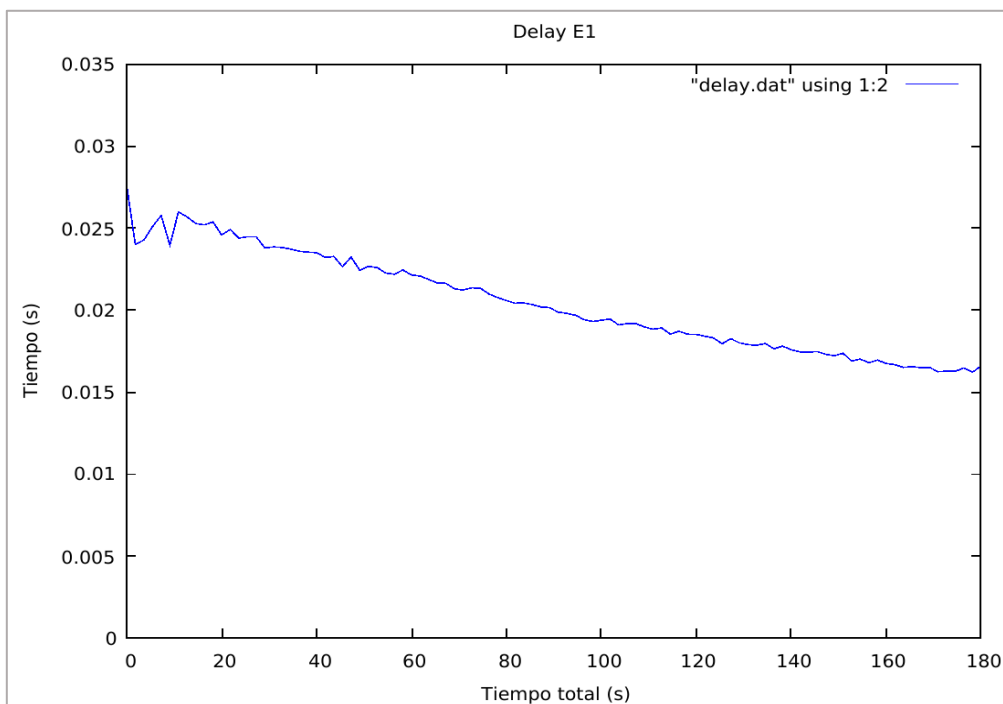
Bitrate E1



Nota. Fuente: Autoría

- **Retardo**

En el escenario 1 se pretende observar el retardo en la red, donde no existe ningún factor que en teoría pueda desafiar la estabilidad de la conexión a Internet (Obsérvese la Figura 43).

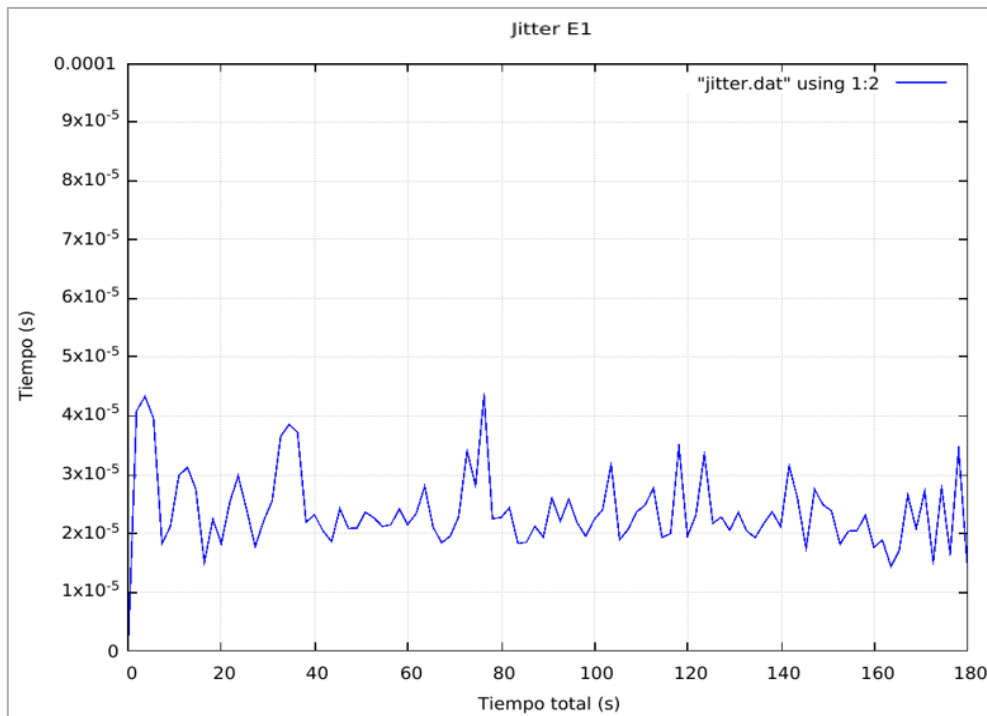
Figura 42*Delay E1*

Nota. El retardo promedio para esta conexión es de 21 ms, retardo mínimo 16.5 ms y retardo máximo 26 ms. Fuente: Autoría

- **Jitter**

El jitter se refiere a la variabilidad en el retardo de los paquetes de datos mientras viajan a través de una red. En otras palabras, es la fluctuación en los tiempos de llegada de los paquetes al destino. El Jitter percibido en el escenario 1 se muestra en la Figura 44 con un promedio de 29 us, lo que indica que la red tiene una mayor consistencia en la transmisión de datos.

Figura 43*Jitter E1*



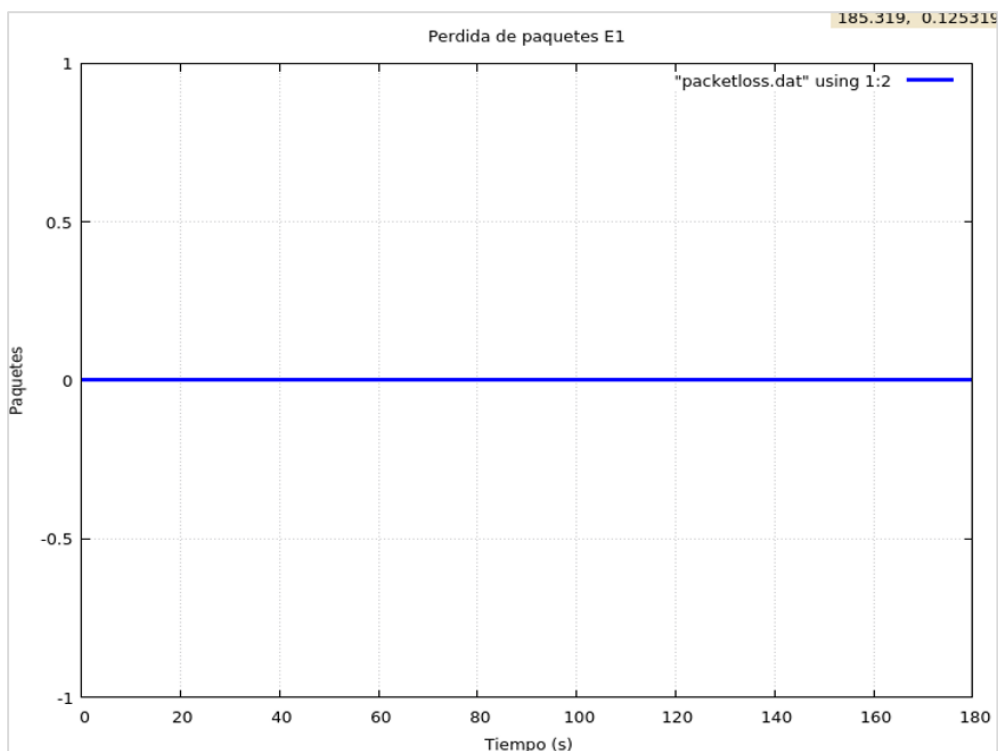
Nota. Fuente: Autoría

- ***Pérdida de paquetes***

Algunos paquetes enviados a través de una red utilizando UDP no llegan a su destino y se pierden en el camino. UDP no tiene mecanismos de retransmisión incorporados, lo que significa que los paquetes perdidos no se reenvían automáticamente, para el escenario 1 existen 0% de pérdida de paquetes.

Figura 44

Pérdida de paquetes E1



Nota. Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos de las diferentes métricas de evaluación para la red LiFi sin interferencias se puede apreciar en la Tabla 27.

Tabla 27

Resultados E1

| Resumen E1 | |
|-------------------|-------------------|
| Métrica | Resultados |
| Ancho de banda | 4.042 Gbps |
| Retardo mínimo | 16.5 ms |
| Retardo promedio | 21 ms |
| Retardo máximo | 26 ms |
| Jitter promedio | 29 us |
| Bitrate promedio | 20.590 Mbps |
| Paquetes perdidos | 0% |

Nota. Fuente: Autoría

5.1.2. Escenario 2: Interferencia de luz natural externa

Objetivo: Determinar cómo afecta la luz natural externa al rendimiento de la red LiFi implementada.

Procedimiento: Las pruebas se realizarán en un entorno con luz natural procedente de ventanas o espacios abiertos. Se medirá la calidad de la conexión en horas del día, exactamente entre las 8 y 11 am, ya que la luz solar puede intensificarse en esos momentos en el laboratorio. La Figura 45 muestra físicamente la disposición del escenario 2.

Figura 45

Escenario de prueba 2 (Interferencia por luz ambiental)



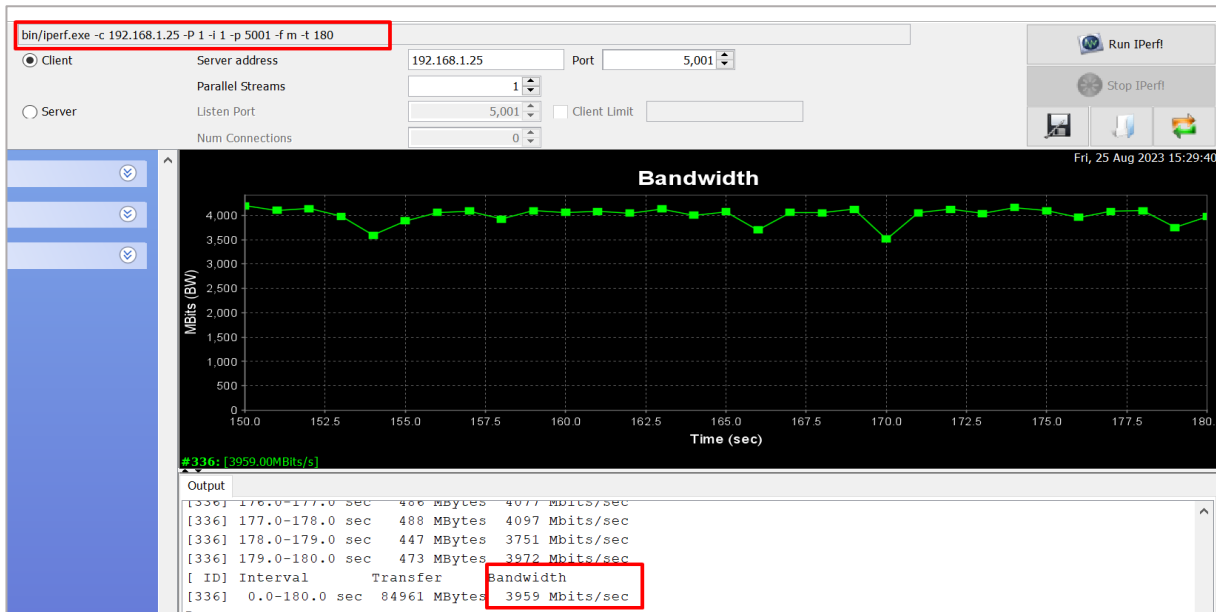
Nota. Fuente: Autoría

- **Ancho de Banda**

Al igual que en el escenario anterior se medirá el ancho de banda absoluto con TCP, con el fin de visualizar si la interferencia de la luz ambiental externa recae sobre el rendimiento de la red o no.

Figura 46

Ancho de banda absoluto E2 TCP



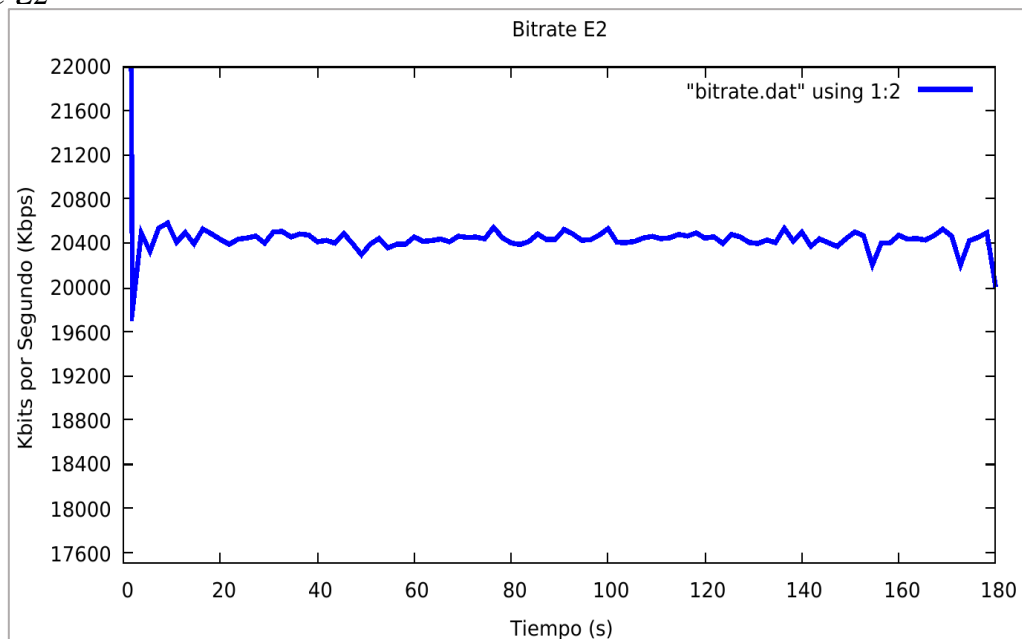
Nota. En el escenario 2 los resultados muestran que el ancho de banda absoluto utilizando TCP en un periodo de 180 segundos es de 3.959 Gbps. Fuente: Autoría

- **Bitrate**

En la Figura 47 se muestra el bitrate con un promedio de 20417.659458 Kbit/s (20.417 Mbps) para el escenario2.

Figura 47

Bitrate E2



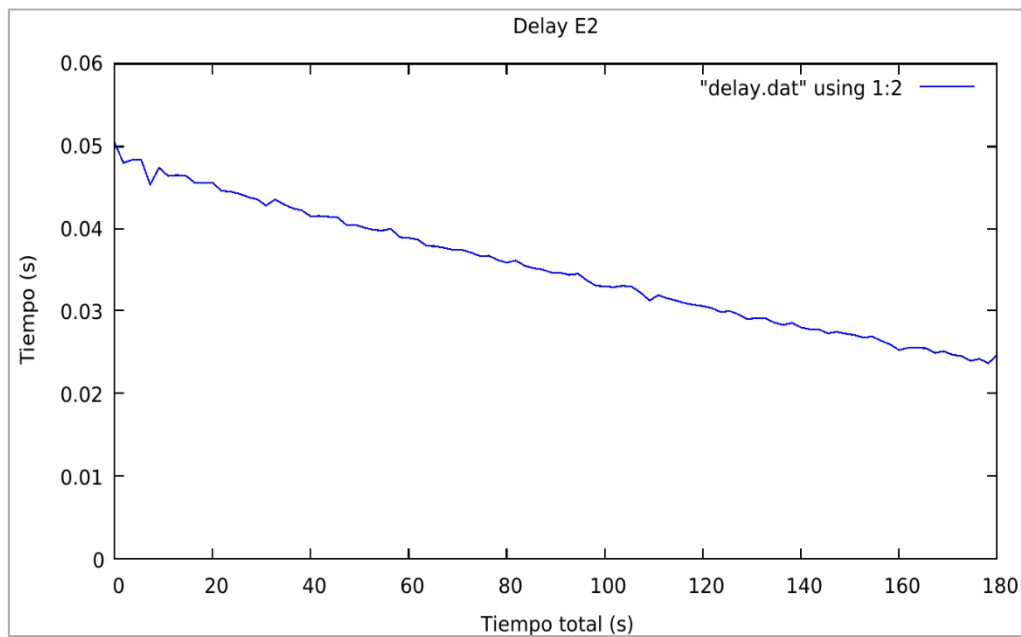
Nota. Fuente: Autoría

- **Retardo**

El retardo promedio para esta transmisión es de 36 ms, retardo mínimo 0.22 ms y retardo máximo 50 ms.

Figura 48

Delay E2



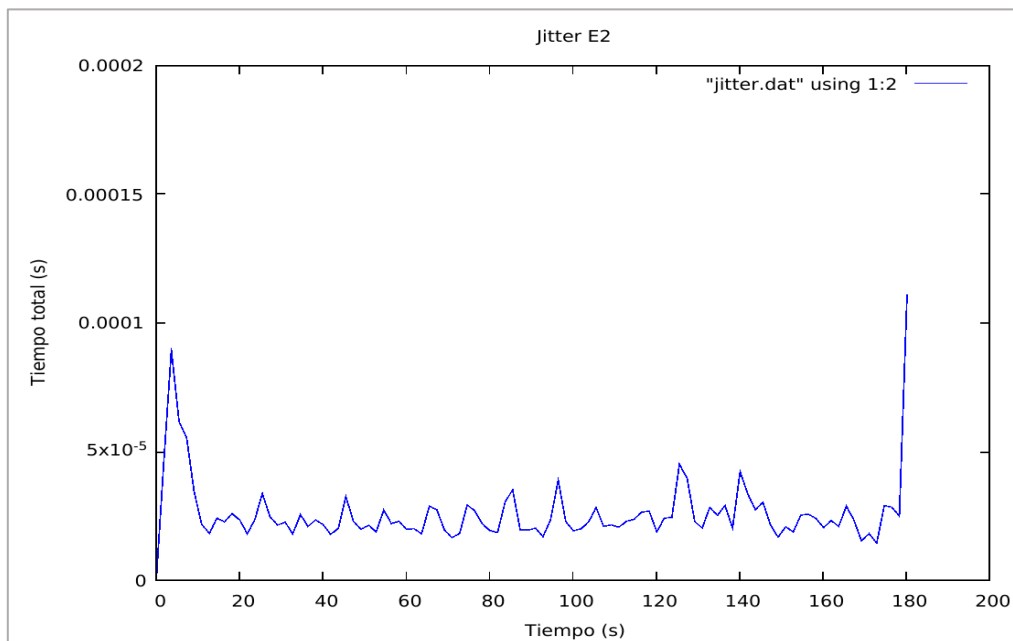
Nota. Fuente: Autoría

- **Jitter**

El jitter como se conoce es la fluctuación en los tiempos de llegada de los paquetes al destino, en este escenario se observa si el ruido óptico introducido por la luz ambiental en el laboratorio aumenta o no. El jitter promedio para E2 es de 33 us.

Figura 49

Jitter E2



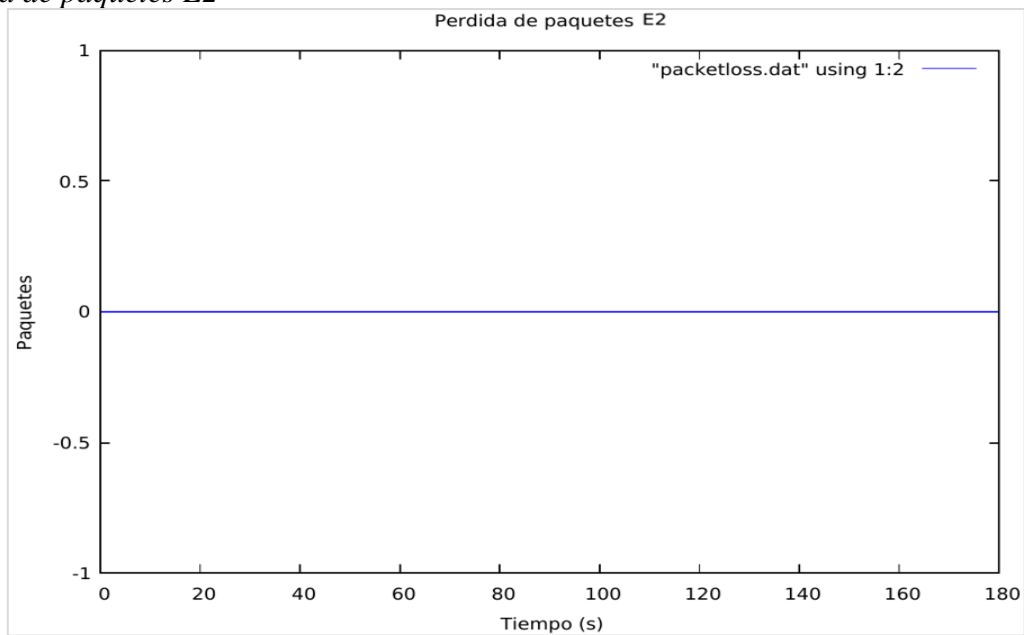
Nota. Fuente: Autoría

- **Pérdida de paquetes**

Pese a que se está utilizando UDP, en un escenario con interferencia no existe paquetes perdidos durante las transmisiones.

Figura 50

Pérdida de paquetes E2



Nota. Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos de las diferentes métricas de evaluación para la red LiFi con interferencia de luz natural externa de por medio se puede apreciar en la Tabla 28.

Tabla 28

Resultados E2

| Resumen E2 | |
|-------------------|-------------------|
| Métrica | Resultados |
| Ancho de banda | 3.959 Gbps |
| Retardo mínimo | 22 ms |
| Retardo promedio | 36 ms |
| Retardo máximo | 50 ms |
| Jitter | 33 us |
| Bitrate | 20.445 Mbps |
| Paquetes perdidos | 0% |

Nota. Fuente: Autoría

5.1.3. Escenario 3: Interferencia de luz artificial

Objetivo: Evaluar cómo afectan otras fuentes de luz artificial al rendimiento de la red LiFi.

Procedimiento: Las pruebas se llevarán a cabo en presencia de lámparas en el entorno de prueba. Se medirán las interferencias provocadas por estas fuentes de luz y se evaluarán sus efectos sobre la estabilidad de la conexión LiFi. La Figura 51 muestra físicamente la disposición del escenario 3.

Figura 51

Escenario de prueba 3 (Interferencia por luz artificial)



Nota. Fuente: Autoría

- **Ancho de Banda**

En el escenario 3 los resultados muestran que el ancho de banda absoluto utilizando TCP en un periodo de 180 segundos es de 3.932 Gbps.

Figura 52

Ancho de banda absoluto E3 TCP



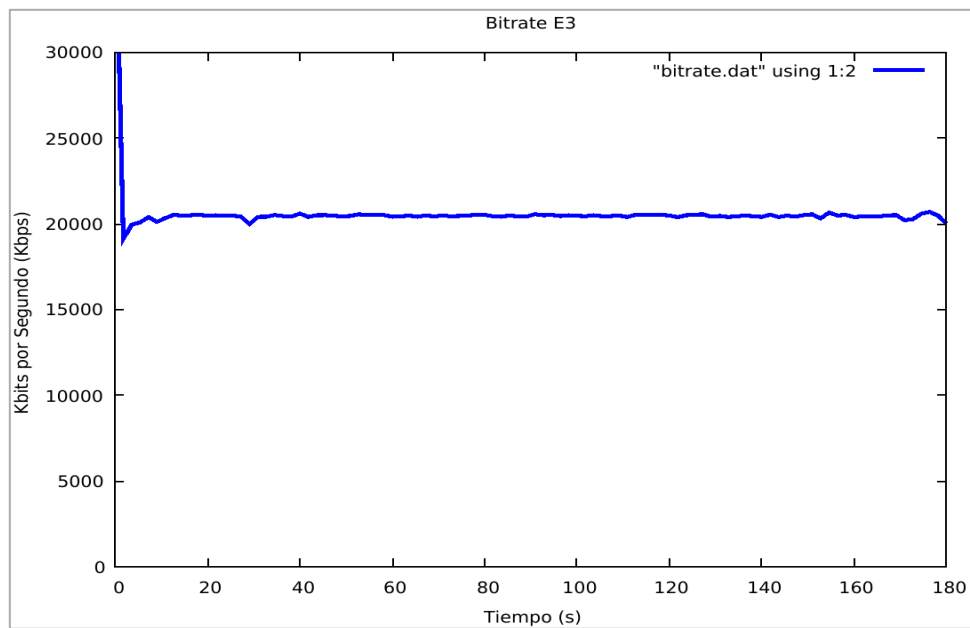
Nota. Los picos bajos indican que hay menos flujo de tráfico en la red y los picos levemente altos indican un flujo de datos más altos. Fuente: Autoría

- **Bitrate**

La Figura 53 muestra el bitrate para el escenario 3, en promedio para esta conexión es de 20443.940778 Kbit/s (20.443 Mbps).

Figura 53

Bitrate E3



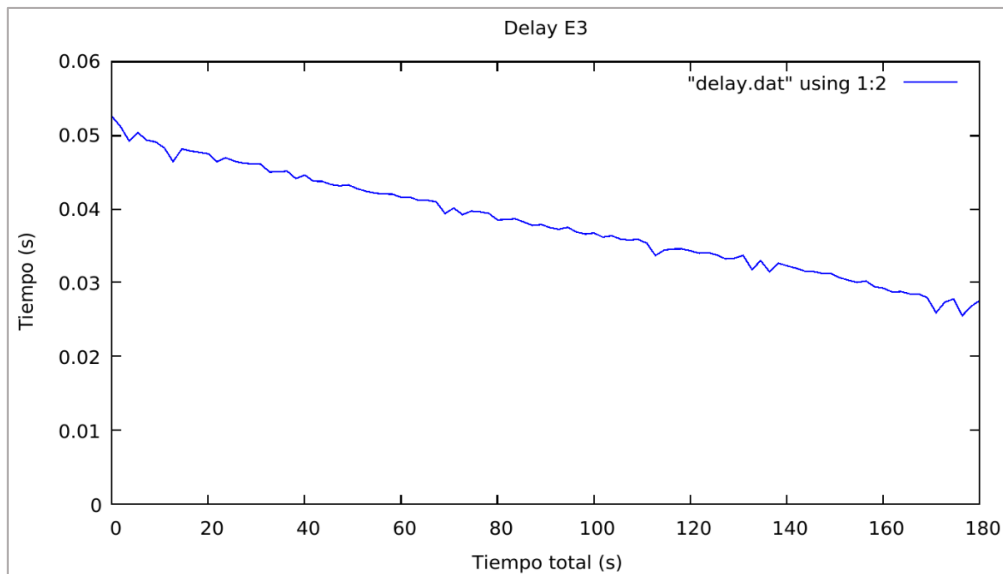
Nota. Fuente: Autoría

- **Retardo**

El ruido óptico dado por interferencia de luz artificial puede causar mayor retardo al momento de recibir una respuesta de un paquete enviado, con respecto al E1. El retardo promedio para el escenario 3 es de 33 ms. (Obsérvese la Figura 54).

Figura 54

Delay E3



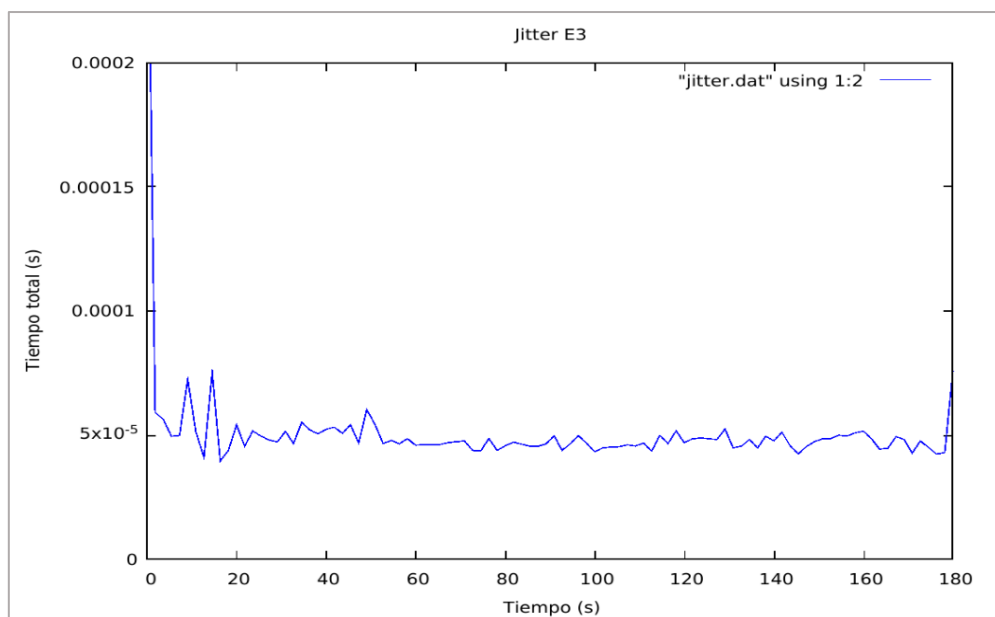
Nota. Fuente: Autoría

- **Jitter**

A continuación, se indica en la Figura 56 el jitter promedio, donde da como resultado 53 us. Es decir, pese a que existe interferencia causada por luz artificial donde hay la probabilidad de que el jitter aumente en teoría, aumento tan solo pocos us en comparación con el E1.

Figura 55

Jitter E3



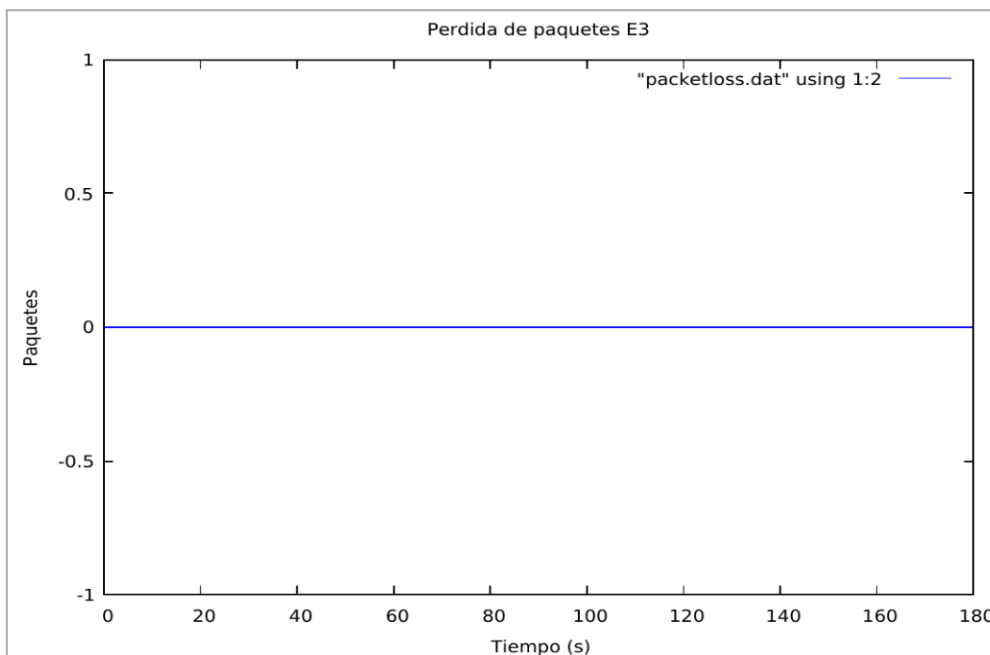
Nota. Fuente: Autoría

- *Pérdida de paquetes*

La pérdida de paquetes al igual que en los escenarios anteriores, la conexión entre dispositivos bajo la red LiFi se mantiene en cero.

Figura 56

Pérdida de paquetes E3



Nota. Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos de las diferentes métricas de evaluación para la red LiFi con interferencia de luz artificial de por medio, se puede apreciar en la Tabla 29.

Tabla 29

Resultados E3

| Resumen E3 | |
|-------------------|-------------------|
| Métrica | Resultados |
| Ancho de banda | 3.932 Gbps |
| Retardo mínimo | 27 ms |
| Retardo promedio | 33 ms |

| | |
|-------------------|-------------|
| Retardo máximo | 52 ms |
| Jitter | 53 us |
| Bitrate | 20.443 Mbps |
| Paquetes perdidos | 0% |

Nota. Fuente: Autoría

5.1.4. Escenario 4: Interferencia Combinada

Objetivo: Evaluar cómo se comporta la red LiFi en un entorno con interferencias lumínicas combinadas de luz natural y artificial.

Procedimiento: Se realizarán pruebas en un entorno donde haya presencia de luz ambiental y artificial al mismo tiempo, con el fin de observar la estabilidad de la conexión que en teoría puede ser afectada por el ruido óptico existente. La disposición del escenario 4 se muestra en la Figura 57.

Figura 57

Escenario de prueba 4 (Interferencia combinada)



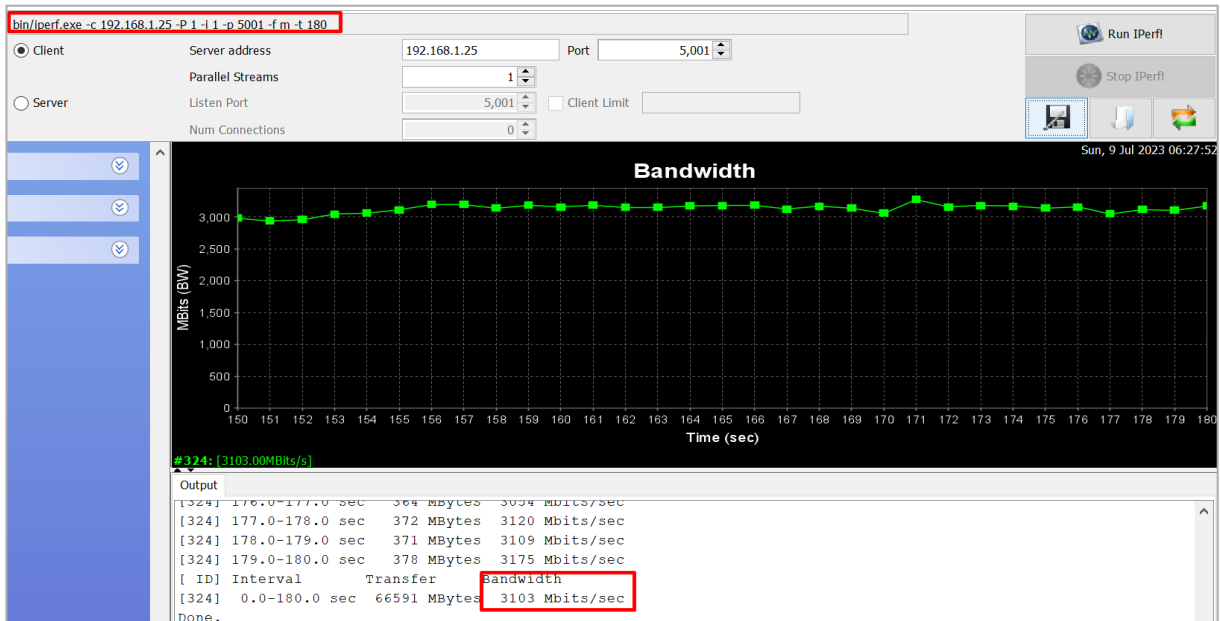
Nota. Fuente: Autoría

- **Ancho de banda**

La Figura 58, indica el resultado al medir esta métrica en un escenario donde existe interferencia doble, e introduce doble ruido óptico.

Figura 58

Ancho de banda absoluto E4 TCP



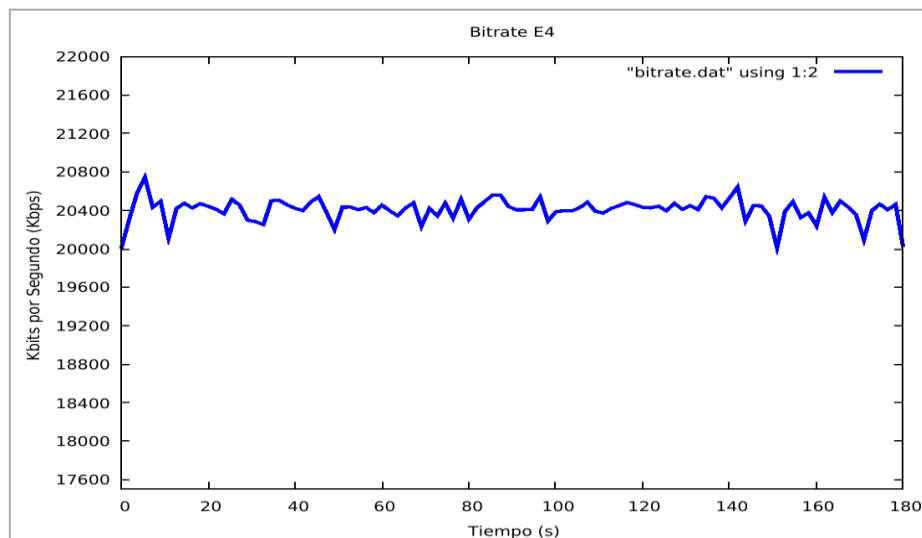
Nota. Los resultados muestran que el ancho de banda absoluto utilizando TCP en un periodo de 180 segundos en el escenario 4 es de 3.103 Gbps. Fuente: Autoría

- **Bitrate**

La tasa de transferencia para esta conexión se la muestra en la Figura 59, donde se tiene un promedio de 20417.659458 Kbit/s (20.417 Mbps).

Figura 59

Bitrate E4



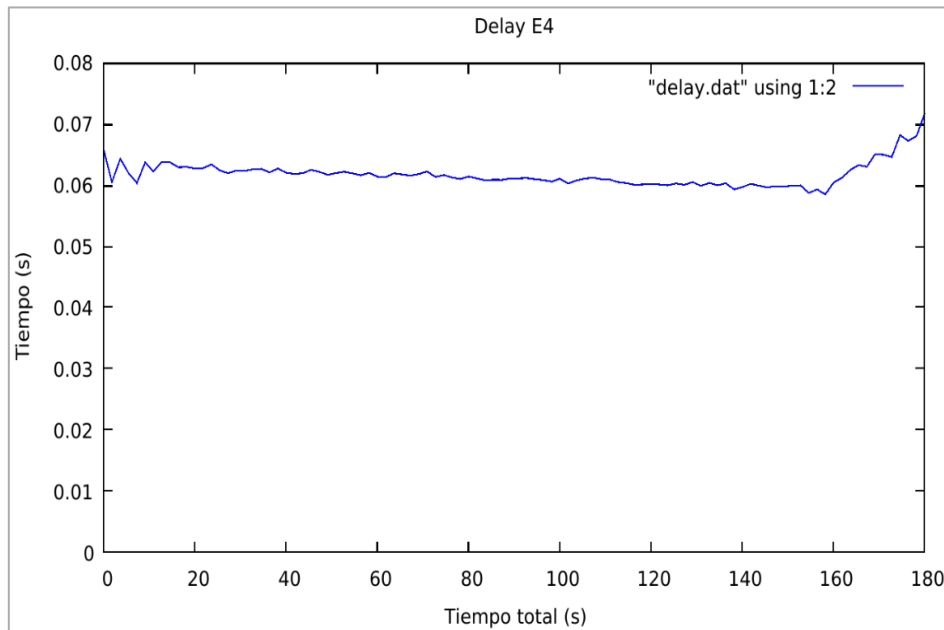
Nota. Fuente: Autoría

- **Retardo**

El retardo en esta conexión es de 63 ms en promedio, con un valor mínimo de 61 ms y un máximo de 76 ms (Obsérvese la Figura 60).

Figura 60

Delay E4



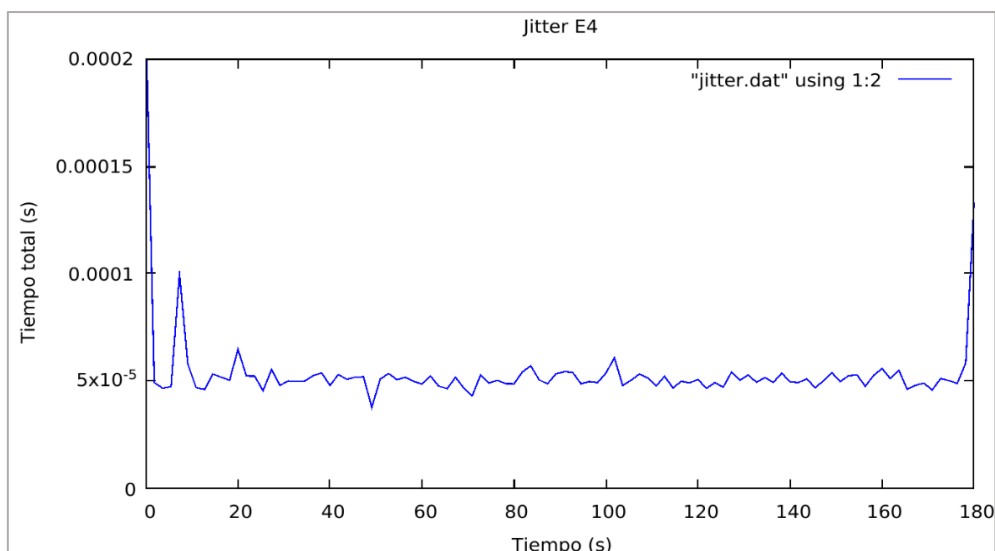
Nota. Fuente: Autoría

- **Jitter**

El jitter como se conoce es la fluctuación en los tiempos de llegada de los paquetes al destino, en este escenario se observa si el ruido óptico introducido por las bombillas de luz artificial aumenta o no está métrica.

Figura 61

Jitter E4



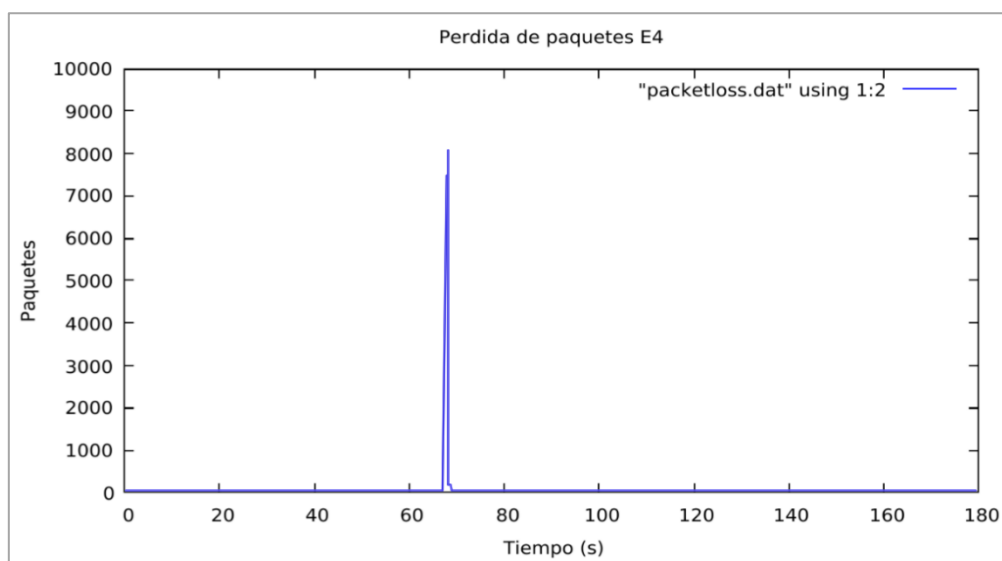
Nota. El jitter en este escenario fue de 0.000056 s (56 us). Fuente: Autoría

- **Pérdida de paquetes**

En este escenario al introducir mayor ruido óptico debido a las interferencias lumínicas existentes en el laboratorio, la transmisión entre dispositivos tiene una pérdida de paquetes del 2.11%. La Figura 62 indica los momentos en que existe pérdida a lo largo del tiempo, tomando en cuenta que se está utilizando UDP.

Figura 62

Pérdida de paquetes E4



Nota. Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos de las diferentes métricas de evaluación para la red LiFi con interferencia de luz artificial de por medio se puede apreciar en la Tabla 30.

Tabla 30

Resultados E4

| Resumen E4 | |
|-------------------|-------------------|
| Métrica | Resultados |
| Ancho de banda | 3.103 Gbps |
| Retardo mínimo | 60 ms |
| Retardo promedio | 63 ms |
| Retardo máximo | 70 ms |
| Jitter | 56 us |
| Bitrate | 20.417 Mbps |
| Paquetes perdidos | 2.11% |

Nota. Fuente: Autoría

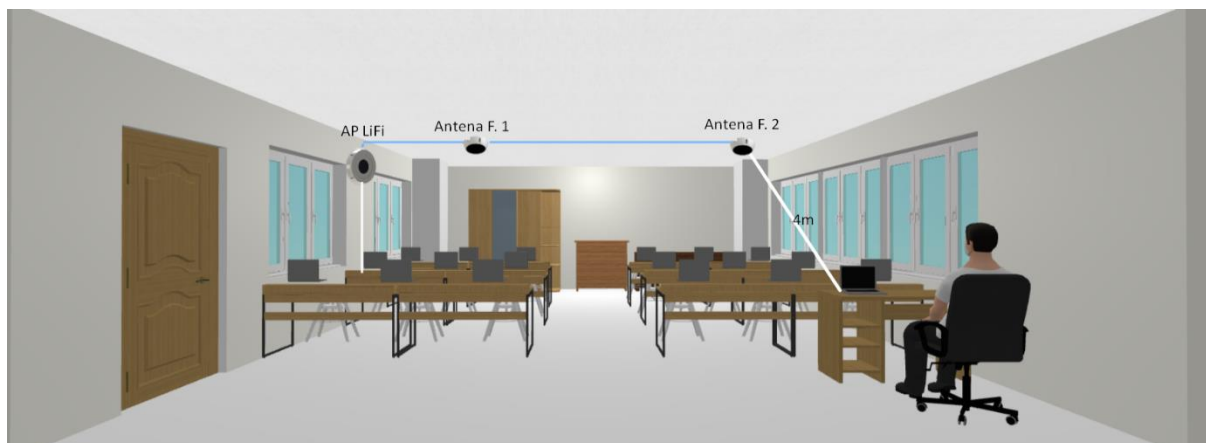
5.1.5. Escenario 5: Cobertura y alcance de la red LiFi

Objetivo: Evaluar el alcance - cobertura efectiva de la red LiFi instalada en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas.

Procedimiento: Se realizarán las pruebas a 4 metros de distancia dentro del área de cobertura de las antenas LiFi. Utilizando las métricas para analizar el rendimiento de la red se pretende observar la estabilidad de la conexión a medida que se alejan los dispositivos de las antenas.

Figura 63

Escenario de prueba 5 (Cobertura - alcance)



Nota. Cada una de las antenas LiFi implementadas en el laboratorio, según el fabricante tienen un alcance de 10 m^2 aproximadamente. Fuente: Autoría.

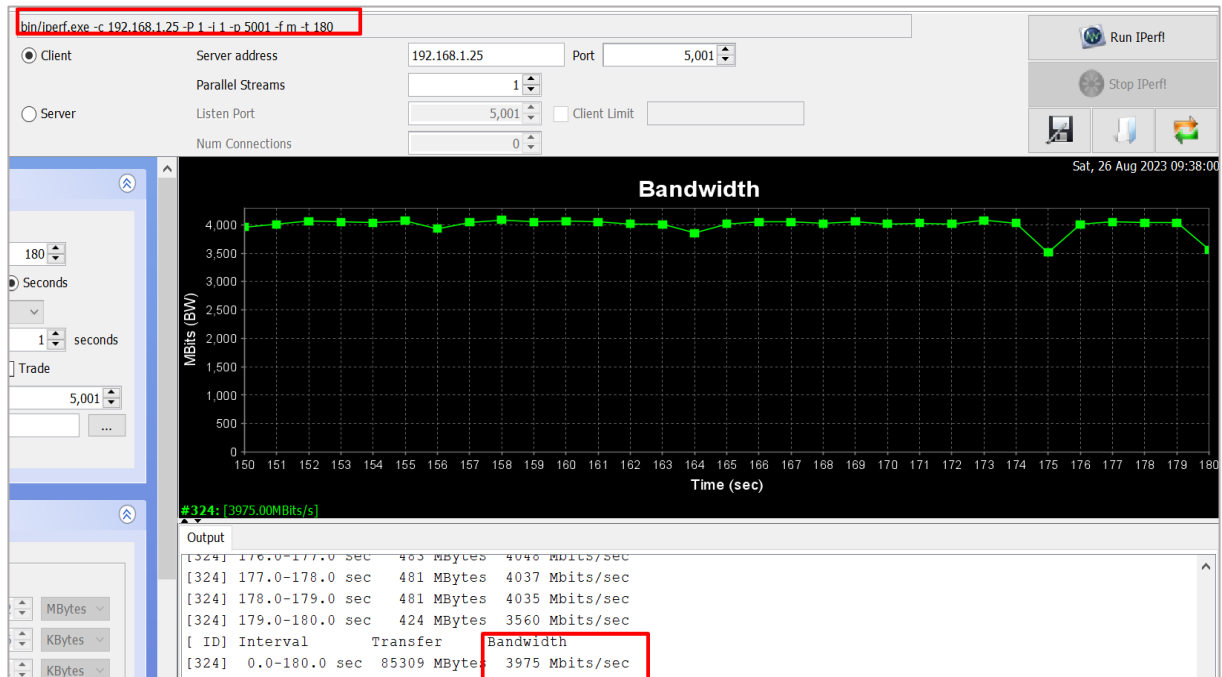
Tomando en cuenta uno de los factores que afectan la calidad de la conexión como lo es la cobertura, se realiza las pruebas a 4 metros de distancia aproximadamente desde la antena fotónica 2 al fotoreceptor como muestra la Figura 63.

Según (Benítez, 2019; IEEE802.15.7, 2018) mencionan que en LiFi mientras el receptor se encuentra a una corta distancia del transmisor, la intensidad de la luz es mayor y por ende la velocidad de transmisión de la red tiende a ser mucho mayor que cuando el receptor y transmisor están más alejados, debido a que la atenuación de la luz es menor y existe menos degradación en la señal.

Tomando en cuenta el criterio de cobertura limitada se pone a prueba el rendimiento de la red LiFi considerando los mismos parámetros de inyección de tráfico de los escenarios anteriores.

- **Ancho de banda**

El ancho de banda capturado para el escenario 5 muestra una capacidad de 3.975 Gbps.

Figura 64*Ancho de banda Absoluto E5 TCP*

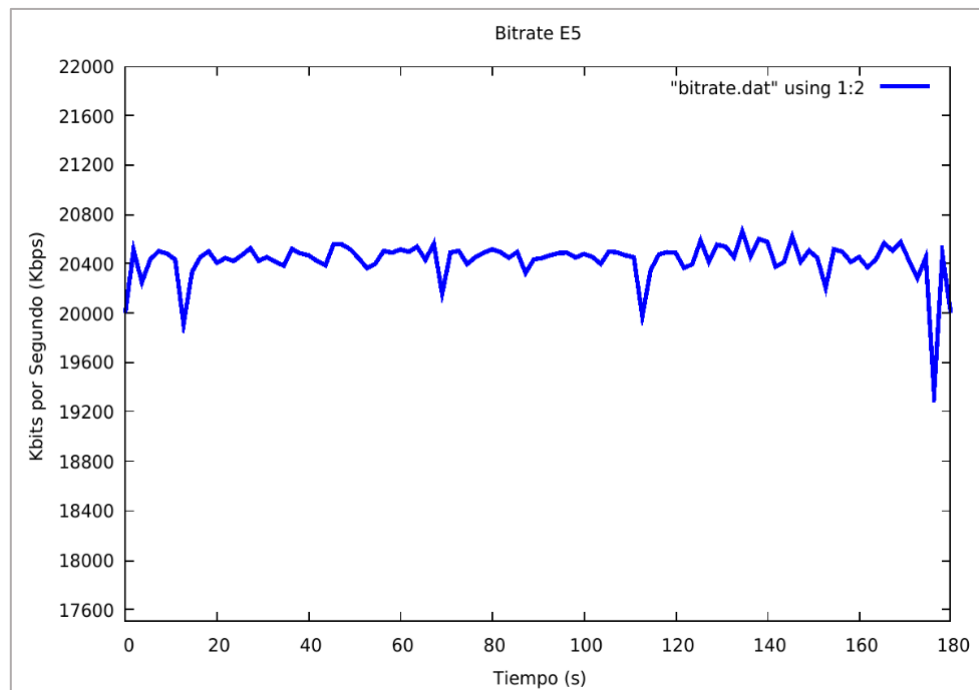
Nota. Fuente: Autoría

Con respecto al escenario 2, donde el fotoreceptor estaba a un metro de distancia de la antena 1 se puede observar que el ancho de banda disminuyó un poco, pero no hace mucha diferencia en términos de transferencia.

- **Bitrate**

El bitarte para esta conexión es de 20447.888946 Kbit/s (20.447 Mbps), es decir, la tasa de transferencia no se ve afectada por la cobertura bajo la red LiFi.

Figura 65*Bitrate E5*



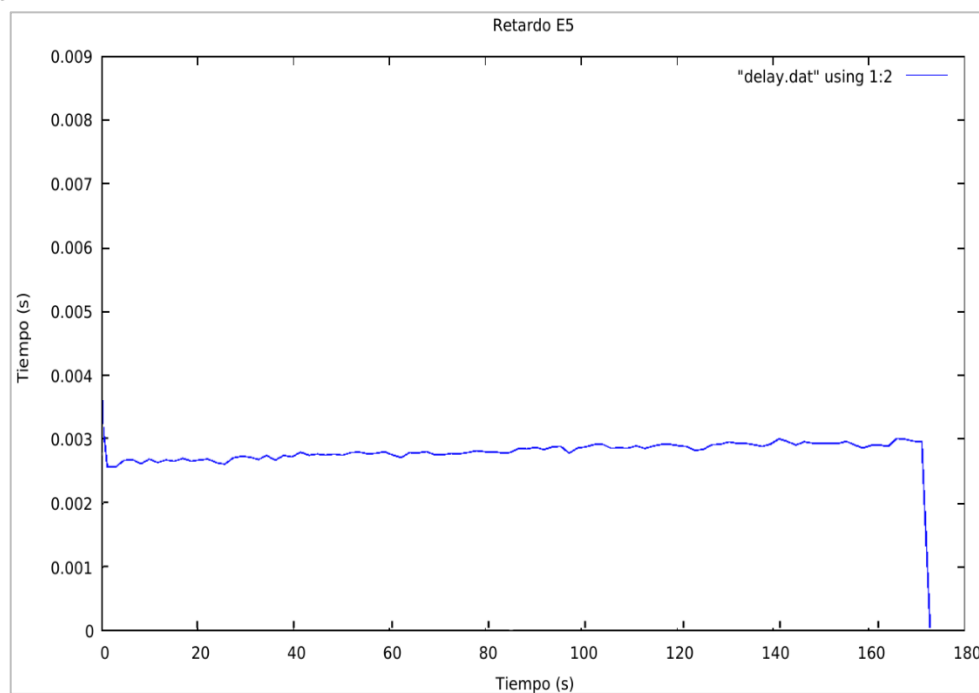
Nota. Fuente: Autoría

- **Retardo**

El retardo en esta transmisión da como promedio general 27,88 ms, mientras que el retardo mínimo 13 ms es y el retardo máximo es 29,11 ms (Obsérvese la Figura 66).

Figura 66

Delay E5



Nota. Fuente: Autoría

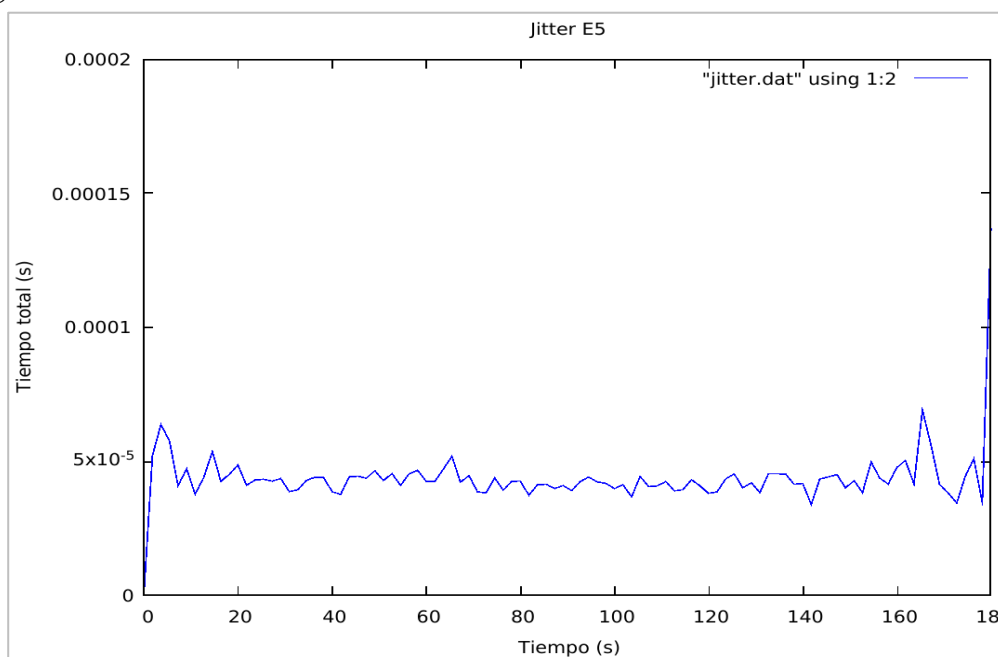
El retardo promedio obtenido es muy aceptable, pese a que existe mayor distancia entre el transmisor y receptor, lo que significa que la distancia frente al escenario 1 si hace un poco la diferencia en términos de rendimiento; sin embargo, si se desea salir del área de cobertura de las antenas fotónicas, simplemente el fotoreceptor tendría problemas y la conexión decaería.

- **Jitter**

El Jitter resultante se lo presenta en la Figura 67, donde se puede mostrar las diferentes fluctuaciones en la transmisión bajo la red LiFi, con un valor promedio de 52 μ s.

Figura 67

Jitter E5



Nota. Fuente: Autoría

Un jitter de 52 μ s es muy aceptable, ya que muestra que la red está logrando mantener una entrega constante de los paquetes con muy poca variación en los tiempos de llegada pese a que la distancia entre el transmisor y receptor es mayormente amplia comparada para los anteriores escenarios. Sin embargo, el incremento del jitter frente al escenario 1, confirma la

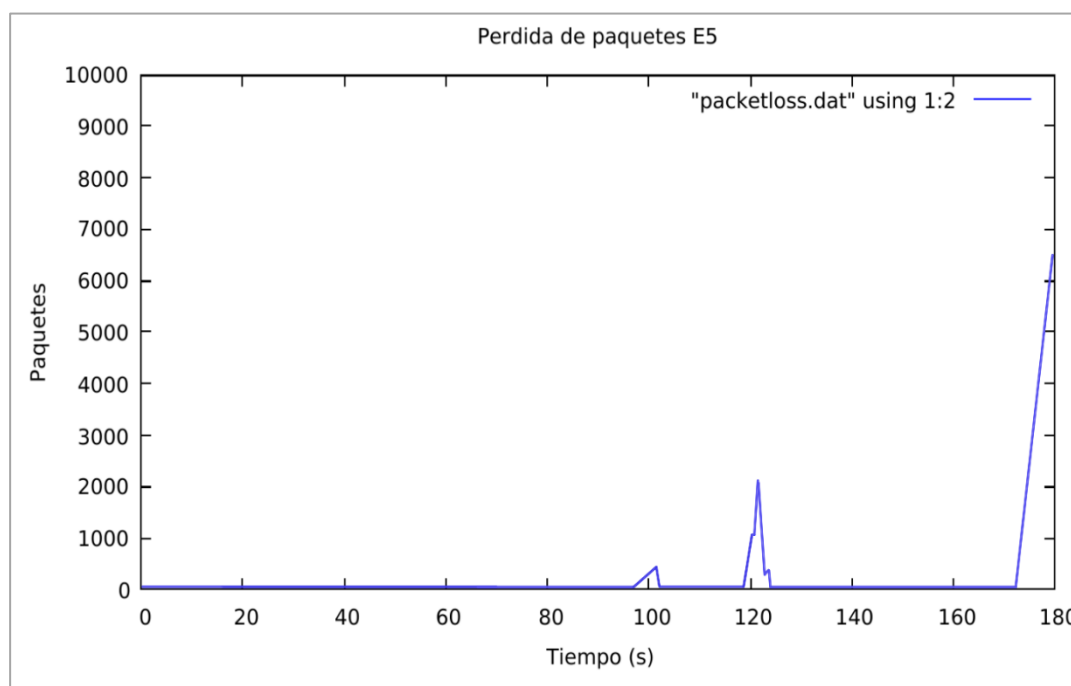
teoría dada, de que entre mayor distancia la probabilidad de que la conexión se vea levemente afectada es correcta.

- **Pérdida de paquetes**

La Figura 68 indica la pérdida de paquetes para este escenario, con un valor porcentual de 2,51 %, es decir, este resultado se le atribuye a que existe mayor distancia entre el transmisor y el receptor, a diferencia del escenario 1, donde la pérdida de paquetes resulta nula.

Figura 68

Pérdida de paquetes E5



Nota. Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos de las diferentes métricas de evaluación para la red LiFi con una distancia de 4 metros desde el transmisor, se puede apreciar en la Tabla 30.

Tabla 31

Resultados E5

| Resumen E5 | |
|-------------------|-------------------|
| Métrica | Resultados |
| Ancho de banda | 3.975 Gbps |
| Retardo mínimo | 13 ms |
| Retardo promedio | 27,88 ms |
| Retardo máximo | 29,11 ms |
| Jitter promedio | 52 us |
| Bitrate promedio | 20.530 Mbps |
| Paquetes perdidos | 2,51 % |

Nota. Fuente: Autoría

5.1.6. Escenario 6: Multiusuarios

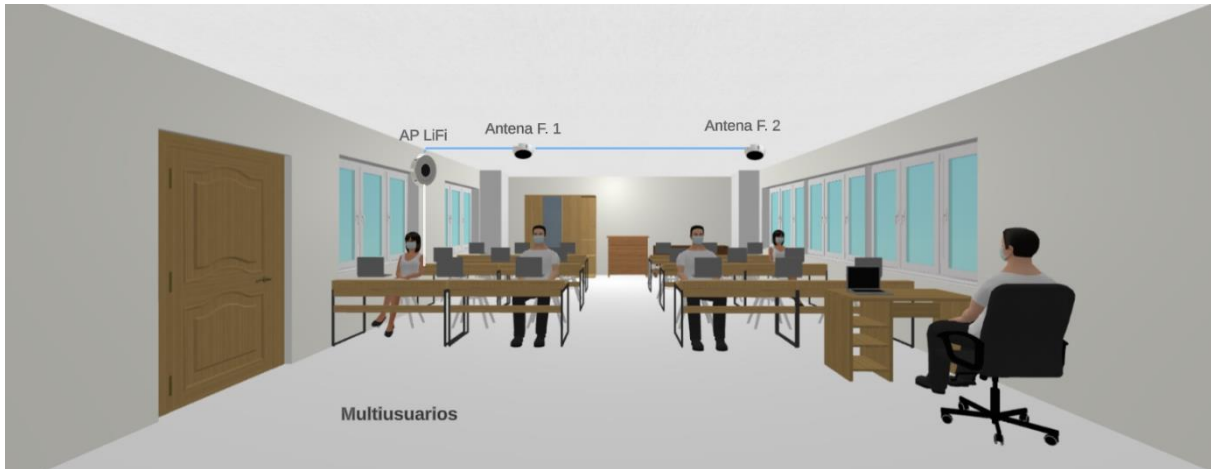
Objetivo: Evaluar el rendimiento de la red LiFi bajo condiciones de carga intensa por parte de diferentes usuarios.

Procedimiento: En este escenario varios 5 accederán simultáneamente a aplicaciones tipo streaming bajo la red LiFi. Se medirá la capacidad de la red para gestionar la carga intensa durante un periodo de tiempo de 3 minutos

Cada antena del sistema LiFiMAX puede abastecer a 8 dispositivos y el AP puede satisfacer hasta 32 usuarios conectados al mismo tiempo. Sin embargo, para el presente proyecto se realizó la adquisición de 5 dongles o fotoreceptores, por lo tanto, para esta prueba se hará uso de 5 dispositivos conectados al AP, entre las dos antenas fotónicas. Los dispositivos accederán a aplicaciones en Internet donde se requiera mayor consumo de ancho de banda, como streaming, con el fin de ver el comportamiento de la red ante esta situación. La Figura 70 muestra físicamente la disposición del escenario 6.

Figura 69

Escenario 6 (Carga Multiusuarios)



Nota. Fuente: Autoría

Utilizando el software controlador del sistema LiFiMAX se puede monitorear el acceso de los dispositivos, pues si se desea que ciertos dispositivos con IP únicas accedan se dará paso, caso contrario se denegará la conexión. En la Figura 70 se muestra los dispositivos conectados al AP de LiFi.

Figura 70

Multiusuarios conectamos simultáneamente.

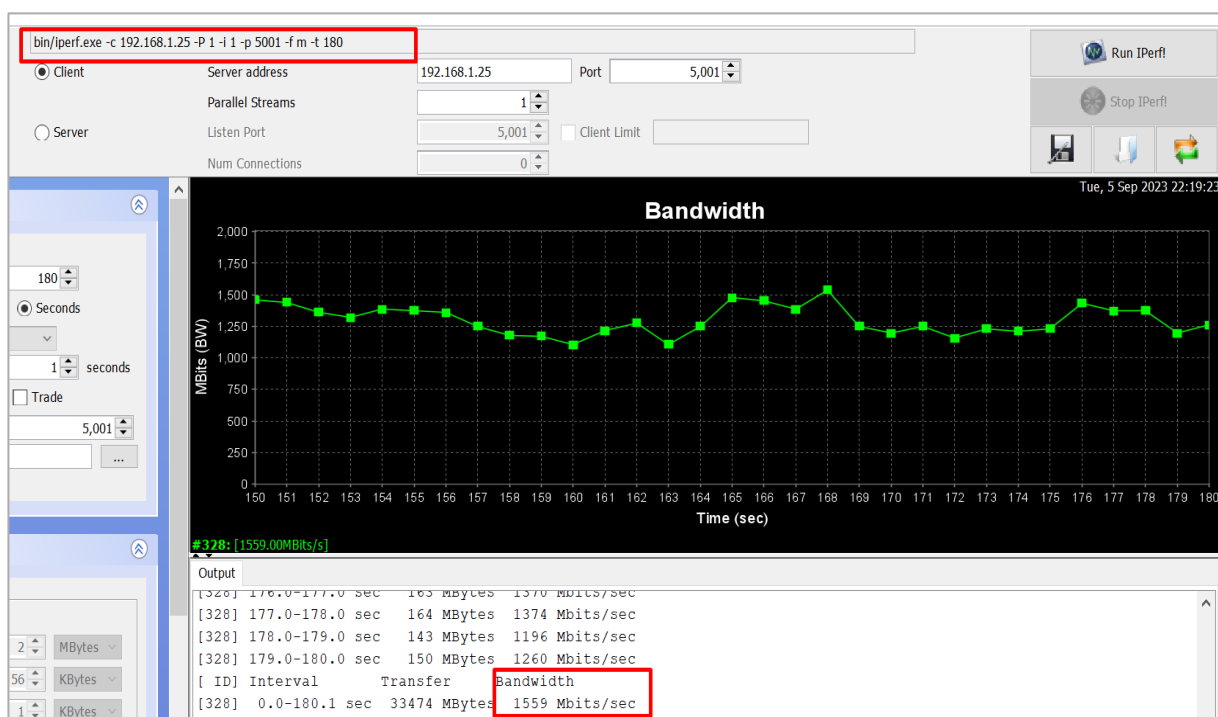
| # | Name | Mac Address | State |
|---|-----------|-------------------|-------|
| 1 | Undefined | 70:B3:D5:A4:3F:4E | UP |
| 2 | Undefined | C0:EA:C3:9F:FD:A5 | UP |
| 3 | Undefined | C0:EA:C3:9F:FD:61 | UP |
| 4 | Undefined | C0:EA:C3:9F:FD:89 | DOWN |
| 5 | Undefined | C0:EA:C3:9F:FD:81 | UP |
| 6 | Undefined | C0:EA:C3:9F:FD:99 | UP |
| 7 | Undefined | C0:EA:C3:9F:FD:8F | DOWN |

Nota. Fuente: Autoría

- **Ancho de banda**

En el escenario 6, donde se simula la conexión de 5 usuarios que están observando contenido en streaming simultáneamente, se registra un ancho de banda de 1.559 Gbps. Esto representa una disminución significativa en comparación con el escenario 1, donde no había interferencias y se alcanzaba un ancho de banda mucho mayor. Sin embargo, es importante destacar que esta capacidad de ancho de banda sigue siendo muy adecuada, especialmente cuando se compara con otras tecnologías inalámbricas (Obsérvese la Figura 71).

Figura 71



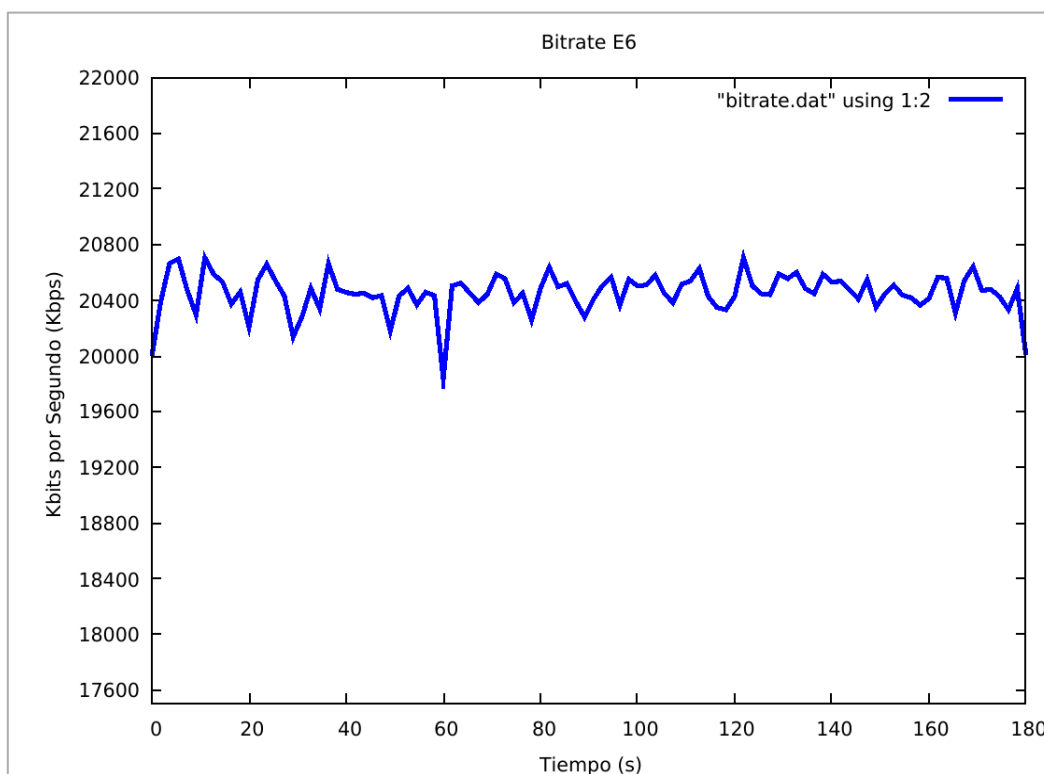
Nota. Fuente: Autoría

- **Bitrate**

Aplicando 2000 paquetes por segundo, cada uno de 1500 bytes, da como resultado un bitrate de 20.442 Mbps (Obsérvese la Figura 72).

Figura 72

Bitrate E6



Nota. Fuente: Autoría

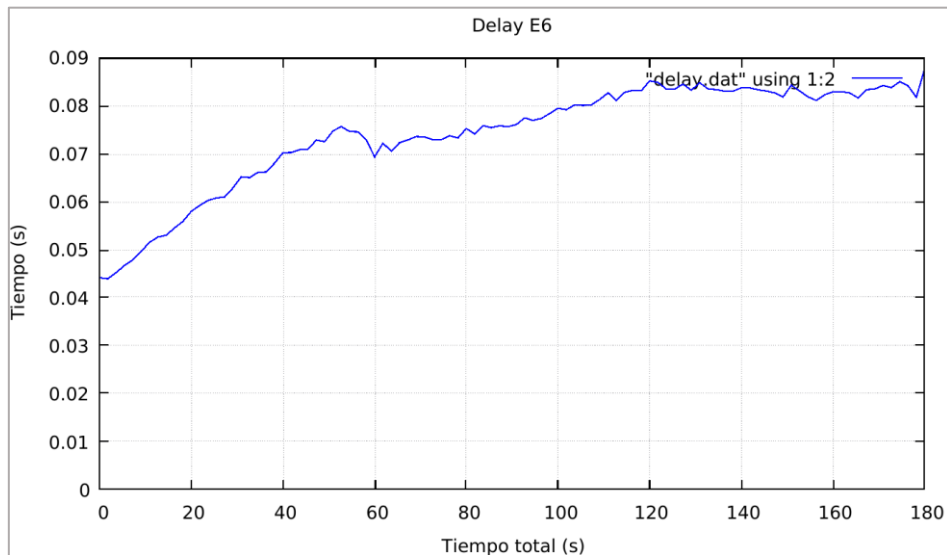
- **Retardo**

En un entorno con múltiples usuarios, el retardo se incrementa a 0.077006 segundos (77 ms), lo que representa un aumento significativo en comparación con situaciones de menor carga. Esta variación en el retardo podría tener un impacto en la calidad de la conexión, especialmente cuando los usuarios están utilizando aplicaciones de transmisión en tiempo real (Obsérvese la Figura 73).

La tolerancia al retardo puede variar según la aplicación. Por ejemplo, en aplicaciones de juegos en línea o realidad virtual, donde la sincronización precisa es crítica, un retardo de 77 ms podría ser más perceptible y menos ideal. En tales casos, se busca reducir al mínimo el retardo.

Figura 73

Delay E6



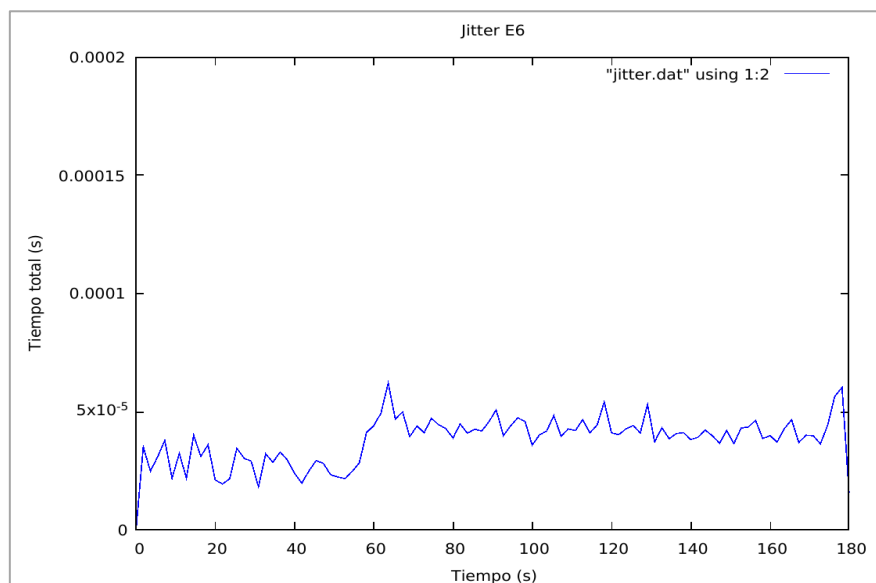
Nota. Fuente: Autoría

- **Jitter**

En un entorno multiusuario, un valor de jitter de $47 \mu\text{s}$ es muy alentador. Es decir, las fluctuaciones en el transcurso de las múltiples transmisiones en aplicaciones de alta tasa de datos se siguen manteniendo baja. Esto sugiere que la red LiFi está ofreciendo una transmisión de datos muy consistente y eficiente. (Obsérvese la Figura 74).

Figura 74

Jitter E6



Nota. Fuente: Poleth Escobar

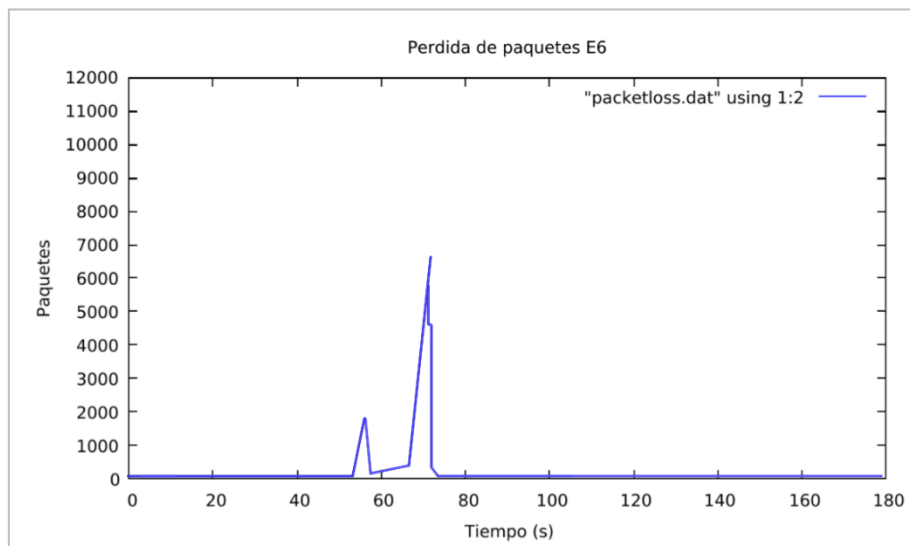
Un jitter tan bajo es esencial para aplicaciones en tiempo real, donde la consistencia de los datos es esencial para una experiencia de usuario ininterrumpida. Estos resultados confirman la capacidad de LiFi para mantener una calidad de conexión excepcional incluso en escenarios con múltiples usuarios, lo que resulta muy prometedor para su aplicación en diversos campos.

- **Pérdida de paquetes**

La Figura 75 indica la pérdida de paquetes en un entorno multiusuario, con un valor porcentual total de 2,597 %, los paquetes en esta prueba se vieron mayormente afectados que los otros escenarios debido a la carga intensa de datos, pese a que no se está introduciendo ruido óptico.

Figura 75

Pérdida de paquetes E6



Nota. Fuente: Autoría

Los resultados obtenidos de las diferentes métricas de evaluación para la red LiFi con múltiples usuarios, se puede apreciar en la Tabla 32.

Tabla 32

Resultados E6

| Resumen E6 | |
|-------------------|-------------------|
| Métrica | Resultados |
| Ancho de banda | 1.559 Gbps |
| Retardo mínimo | 45 ms |
| Retardo promedio | 77 ms |
| Retardo máximo | 85 ms |
| Jitter promedio | 47 us |
| Bitrate promedio | 20.442 Mbps |
| Paquetes perdidos | 2, 597% |

Nota. Fuente: Autoría

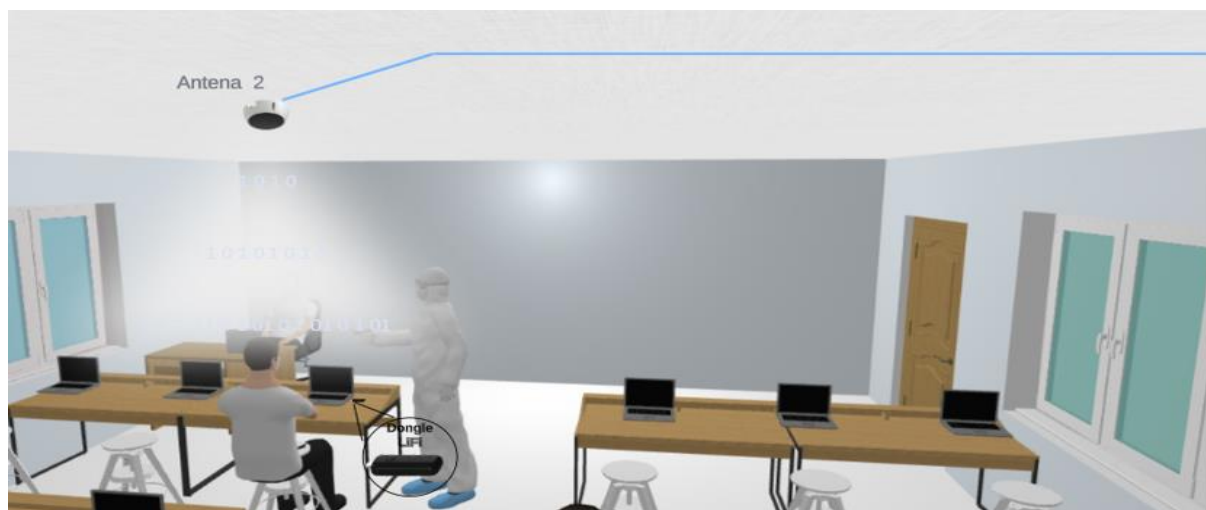
5.1.7. Escenario 7: Obstrucciones Físicas

Como es de conocimiento LiFi utiliza el espectro de luz visible para establecer conexión; sin embargo, es importante tomar en cuenta las diferentes obstrucciones físicas en esta red, pueden bloquear la señal, afectando la calidad y la velocidad de la transmisión.

Al obstruir el paso de la luz entre el transmisor y receptor afecta la capacidad del receptor (dongle LiFi) para detectar y decodificar los datos transmitidos de forma correcta. La simulación del escenario 7 se lo indica en la Figura 76.

Figura 76

Escenario 7 (Diseño físico)



Nota. Fuente: Autoría

Utilizando un test de velocidad en línea se pretende visualizar la caída de la conexión al obstruir la línea de vista entre el transmisor y el receptor. La intensidad de la luz se ve afectada inmediatamente por lo que el receptor no puede capturar las longitudes de onda en el medio óptico y la conexión decae rápidamente.

Figura 77

Caída de velocidad por obstrucciones físicas



Nota. Puede observarse una disminución de la velocidad de conexión en la zona resaltada en rojo como resultado de colocar brevemente la mano sobre el fotorreceptor. Fuente: Autoría

Por lo tanto, la atenuación de la señal es clara debido al hecho de pasar algún objeto por delante del fotorreceptor, el cual absorbe profundamente la señal, es decir, cuanto mayor sea el bloqueo de la señal entre el transmisor y receptor mayor será la pérdida de la señal.

5.2. Recopilación de resultados obtenidos por las métricas de medición

En esta cláusula se recopila la información de cada métrica perteneciente a su escenario mediante diferentes gráficas de escalas, con el fin de visualizar de forma general y agrupada el comportamiento de estas variables en los escenarios planteados.

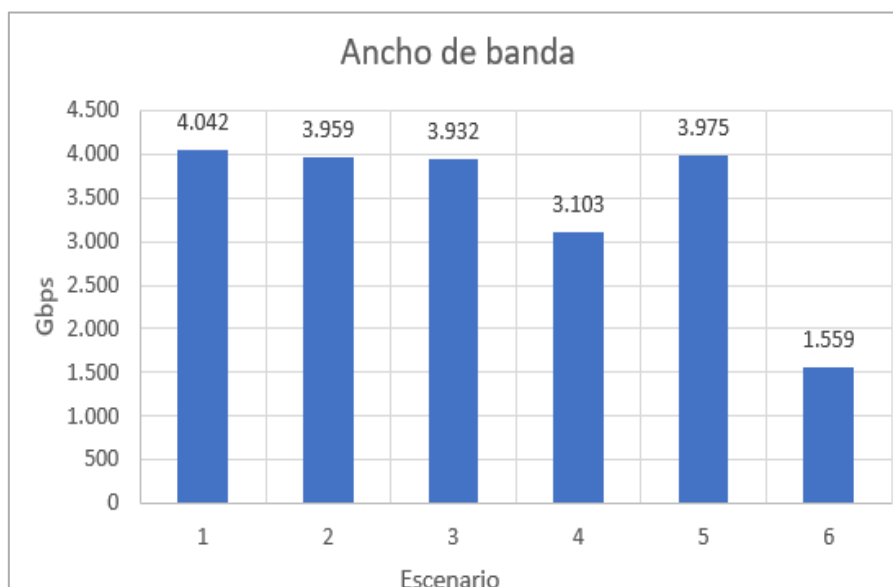
Cabe señalar que, en la actualidad, hay una escasez de equipos y herramientas disponibles para verificar la transmisión de datos a través de la luz. A diferencia de las tecnologías de radiofrecuencia que pueden ser evaluadas mediante analizadores de espectros, la detección y evaluación de la transmisión de datos ópticos, como LiFi, se encuentra en una etapa menos avanzada. Por lo tanto, en el contexto de este trabajo, se concluye que la red está funcionando en la banda de luz visible. Esto indica que LiFi opera en el espectro de aproximadamente 420 a los 770 THz, con una longitud de onda que oscila entre los 380-780 nanómetros (nm).

5.2.1. Ancho de banda

Según (Espinosa & Vivanco, 2017) “LiFi utiliza la luz como medio para transmitir los datos, por lo que su espectro es 10000 veces mayor que el espectro electromagnético utilizado por WiFi”, por lo que en teoría puede transmitir mayor densidad de datos. No obstante, en una red LiFi, la variabilidad del ancho de banda puede deberse a diversas razones, como las condiciones de iluminación ambiental, la distancia entre dispositivos, obstáculos físicos y la capacidad de los receptores y transmisores de esta tecnología. Estos desafíos específicos llevaron a la creación de seis escenarios en los cuales se registraron las mediciones del ancho de banda, tal como se muestra en la Figura 78.

Figura 78

Resumen ancho de banda escenarios LiFi TCP



Nota. Fuente Autoría

La evaluación del ancho de banda en la red LiFi muestra una variabilidad en la tasa de transferencia de datos en función de las condiciones específicas de cada escenario. Los valores registrados oscilan entre 1.559 Mbps en el escenario 6 y 4.042 Mbps en el escenario 1. Estos resultados reflejan cómo factores como la presencia de interferencias de luz natural o artificial, la distancia entre el transmisor y el receptor, la cobertura y la capacidad multiusuario pueden influir en la estabilidad del ancho de banda en la red.

Es importante destacar que, en general, los valores de ancho de banda en todos los escenarios siguen siendo relativamente altos, lo que sugiere que LiFi tiene el potencial de proporcionar tasas de transferencia de datos significativas, mucho mayores a WiFi. Sin embargo, estos resultados resaltan la necesidad de considerar y optimizar las condiciones del entorno y los factores que afectan la calidad de la señal para garantizar un rendimiento constante y óptimo en aplicaciones del mundo real.

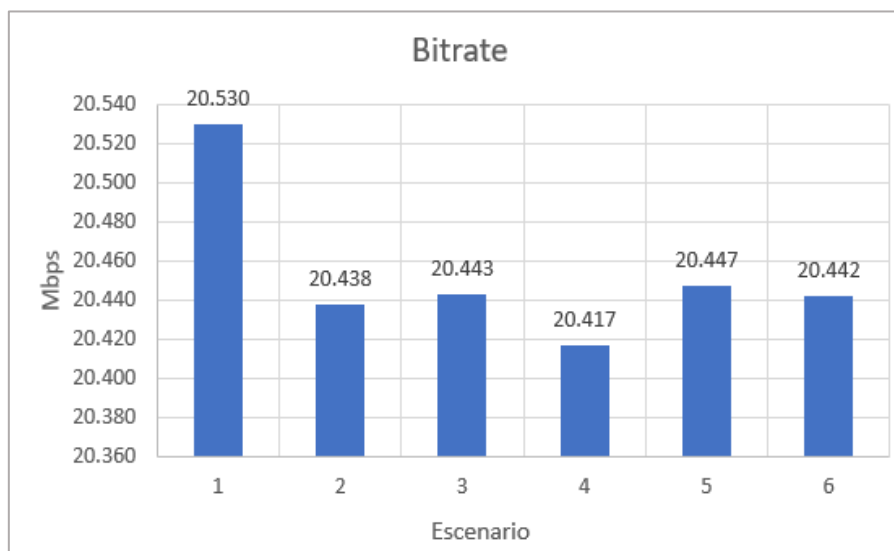
Aunque LiFi posee un espectro más amplio que WiFi en teoría, en la práctica, interferencias y factores ambientales pueden influir en el ancho de banda real. La tecnología LiFi está diseñada para adaptarse a diversas condiciones de iluminación, pero en entornos con mucha luz ambiental o artificial, pueden requerirse estrategias de mitigación, como técnicas de modulación y corrección de errores, para mantener un rendimiento óptimo.

5.2.2. *Bitrate*

El bitrate se refiere a la cantidad de bits transmitidos o procesados por unidad de tiempo en una red, es decir, es la capacidad máxima teórica de transferencia de datos. A continuación, se presenta un resumen del bitrate obtenido en los 6 escenarios, en los cuales se inyectó el mismo tráfico bajo diversas condiciones.

Figura 79

Resumen Bitrate escenarios LiFi UDP



Nota. Fuente Autoría

La evaluación del bitrate en los diferentes escenarios de la red, muestra consistencia en los valores de transferencia de datos. El bitrate oscila alrededor de los 20,4 Mbps, lo que indica una estabilidad y un rendimiento constante en términos de la velocidad de transmisión de datos.

No obstante, en los escenarios 2, 3 y 4, donde se presentan diferentes formas de interferencia de luz, se observa una disminución mínima en el bitrate. En el escenario 2, con interferencia de luz natural externa, se obtuvo un bitrate de 20.438 Mbps, mientras que en los escenarios 3 y 4, con interferencias de luz artificial y combinada, los valores registrados fueron de 20.443 Mbps y 20.417 Mbps respectivamente.

En los escenarios 5 y 6, que se enfocan en la cobertura y capacidad multiusuario, se obtuvieron bitrates de 20.447 Mbps y 20.442 Mbps respectivamente. Este nivel de coherencia es un indicativo positivo de que la tecnología LiFi está funcionando de manera confiable en diversos entornos y condiciones.

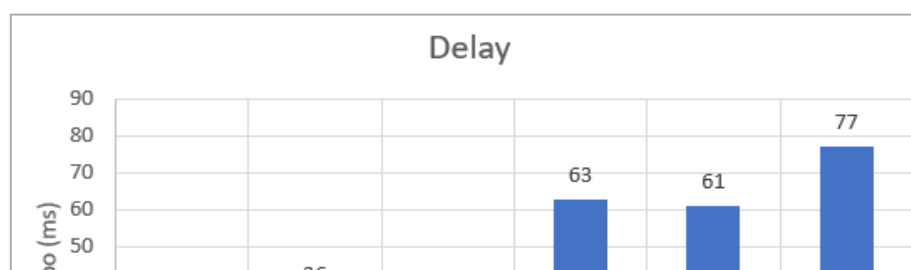
La evaluación del bitrate en los diferentes escenarios de la red demuestra cómo las interferencias, la cobertura, el alcance y la capacidad multiusuario pueden afectar la eficiencia de la transmisión de datos en mínima cantidad, pues los resultados se mantienen en una línea casi constante. Esto permite considerar la importancia de los desafíos y limitaciones específicas de cada escenario al implementar esta tecnología y resaltar la necesidad de optimizar los factores que afectan la calidad de la señal para lograr un mejor rendimiento en términos de bitrate.

5.2.3. Retardo (Delay)

La evaluación del retardo de la red LiFi, revela variaciones en los tiempos en cada escenario. Estos valores de retardo representan el tiempo que lleva que un paquete de datos viaje desde el emisor al receptor y regrese. La Figura 81 muestra el retardo en los diferentes escenarios planteados.

Figura 80

Resumen retardo escenarios LiFi UDP



Nota. Fuente Autoría

Los resultados muestran que el retardo oscila en un rango que va desde 21 ms en el escenario 1 hasta 77 ms en el escenario 6, en este último escenario donde existe conexión multiusuario el retardo es significativamente más alto que en otros escenarios, lo que puede causar retardos adicionales en la transmisión de datos .

En general, se concluye que la tecnología LiFi es capaz de proporcionar tiempos de retardo bajos, pero es importante considerar las condiciones y escenarios específicos para garantizar un rendimiento óptimo en aplicaciones que requieren tiempo de respuesta rápida.

5.2.4. Jitter

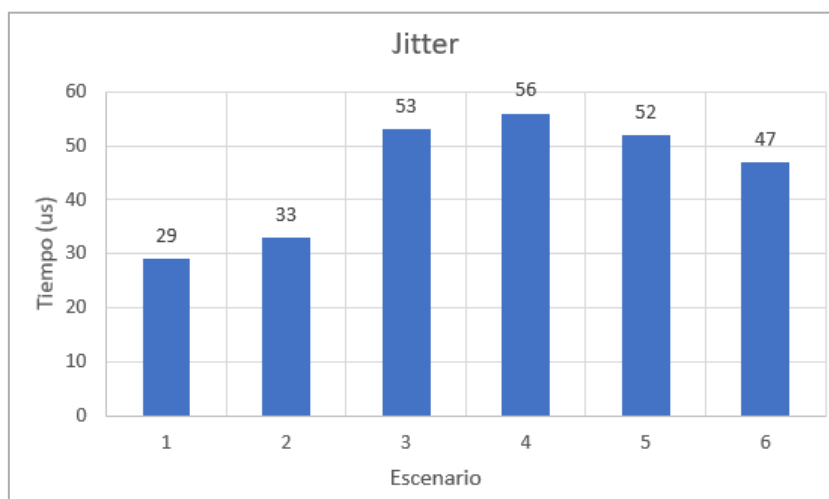
Tanto las conexiones UDP como las TCP pueden registrar jitter, pero el impacto y la medición de cada conexión son únicos. El jitter es más perceptible en las conexiones UDP debido a la falta de control de flujo y entrega de paquetes organizada. Es el resultado de variaciones en el tiempo que tardan los paquetes en llegar a su destino, lo que refleja cambios en la duración del retardo de la red.

El jitter existente depende de varios factores en el entorno, por lo que no puede ser el mismo valor tanto de ida como de regreso, ya que aspectos como las rutas asimétricas, el

balanceo de carga, el procesamiento de paquetes y los efectos de congestión en el camino pueden variar los valores. En la Figura 81 se muestra las variaciones de jitter en los diferentes escenarios.

Figura 81

Resumen jitter escenarios LiFi UDP



Nota. Fuente Autoría

El jitter que oscila desde 29 us en el escenario 1 hasta 56 us en el escenario 4. Estos valores indican que, en algunos escenarios, existe una mayor variabilidad en el tiempo de entrega de los paquetes en comparación con otros.

Cabe señalar que se utiliza el protocolo UDP para la transmisión de datos en estas pruebas. UDP es un protocolo de entrega rápida por lo que no garantiza la confirmación de entrega de paquetes, dando lugar a variaciones en el jitter. Sin embargo, en general, los valores de jitter observados en estos escenarios son bajos y pueden considerarse aceptables para muchas aplicaciones, con el fin de garantizar una transmisión estable y una experiencia de usuario fluida.

5.2.5. Pérdida de paquetes

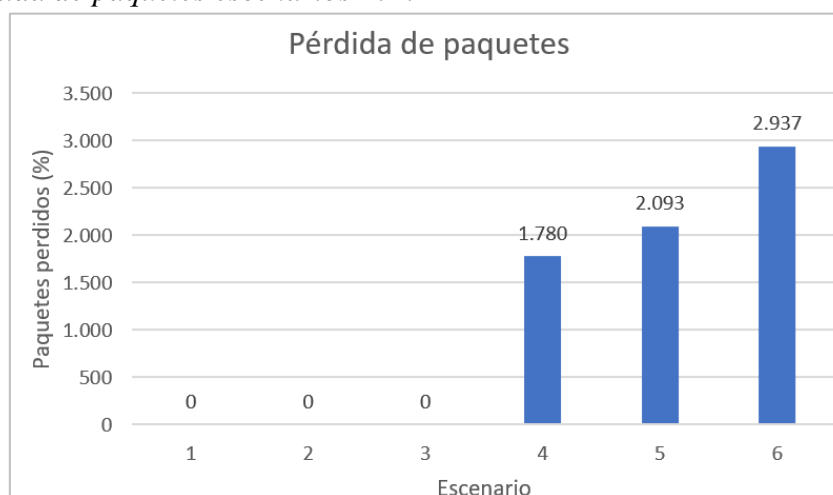
La evaluación de la pérdida de paquetes en los diferentes escenarios de la red LiFi muestra resultados altamente satisfactorios, ya que todos los escenarios registran una pérdida de paquetes baja (Obsérvese la Figura 82).

Los escenarios 1,2,3 reflejan una estabilidad en la conexión, debido a que existe un 0% en la pérdida de paquetes, a diferencia de los escenarios 4,5,6 donde los desafíos para LiFi están muy presentes, como lo son la interferencia lumínica externa e interna simultáneamente y la cobertura, se presenta un valor de 1.78% de pérdida para el escenario 4 y 2.093% para el escenario 5. En el caso del escenario 6, la capacidad multiusuario utilizando aplicaciones tipo streaming, refleja claramente el mayor valor de pérdida de paquetes, con un total de 2.937%.

Es decir, LiFi no es una red inalámbrica perfecta, depende de varios factores para que la conexión sea un 100 % eficiente, sin embargo, cabe recalcar la tolerancia ante la pérdida de paquetes utilizando UDP, lo cual es un indicador positivo de la calidad de la señal y la capacidad de la red para garantizar la entrega confiable de los datos transmitidos.

Figura 82

Resumen pérdida de paquetes escenarios LiFi




Nota. Fuente Autoría

5.3.Módulo de guías de laboratorio

A continuación, se presenta el módulo de guías de laboratorio, el cual evalúa la tecnología LiFi basada en el IEEE 802.15.7. Las guías de laboratorio tienen 4 puntos de evaluación importantes: cobertura, rendimiento, calidad de servicio (QoS) y seguridad.

5.3.1. Guía 1: “Configuración y análisis de la cobertura LiFi en un entorno controlado”


| | |
|---|--|
|  | UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES COMUNICACIONES INALÁMBRICAS |
|---|--|

| | | | |
|--------------------|--|---------|---|
| Nombre y Apellido: | | Guía #: | 1 |
| Docente: | | | |
| Técnico-docente: | | | |
| Fecha: | | | |
| Nivel: | | | |

| | |
|-------------------------------|---|
| Tema: | <i>“Configuración y análisis de la cobertura LiFi en un entorno controlado”</i> |
| Objetivo general: | Analizar la cobertura de la red LiFi en el laboratorio de comunicaciones inalámbricas, mediante herramientas de software libre. |
| Objetivos específicos: | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar un test de velocidad en línea y percibir los cambios de velocidad dada la cobertura limitada de LiFi • Evaluar la cobertura de la red en diferentes ubicaciones del laboratorio • Analizar qué factores preceden para que LiFi pierda potencia. • Realizar un informe técnico, detallando los requerimientos de la guía |
| Marco teórico: | Investigar los temas a continuación: <ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías mediante luz visible • LiFi funcionamiento • Desafíos de LiFi • Arquitectura de IEEE 802.15.7 |

| | |
|------------------------------|---|
| Materiales y equipos: | <p>Hardware:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Antenas fotónicas • Adaptadores USB • Dongles LiFi – fotoreceptores <p>Software:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Test de velocidad online • Wireshark |
| Procedimiento: | <ol style="list-style-type: none"> 1. Conecte el dongle LiFi a su PC utilizando el adaptador de red de ser el caso 2. Desactive WiFi, y podrá notar que se activa Internet como un adaptador de red Ethernet, por lo general lo reconoce como “Ethernet 3” 3. Coloque el receptor en distintas posiciones dentro del laboratorio de comunicaciones inalámbricas. 4. Mida la intensidad de la señal LiFi recibida por el receptor en cada ubicación. |
| Resultados: | <ul style="list-style-type: none"> • Analice los datos recopilados y evalúe la cobertura de la red LiFi en diferentes ubicaciones del laboratorio. • Identifique áreas donde la señal LiFi se debilite o se pierda. |
| Conclusiones: | Redactar 5 conclusiones con respecto a la práctica N°1 |
| Recomendaciones: | Redactar 5 recomendaciones con respecto a la práctica N°1 |
| Bibliografía: | Presentar la bibliografía utilizada en formato APA 7 |

5.3.2. Guía 2: “Evaluación del rendimiento de LiFi (IEEE 802.15.7)”

| | |
|---|--|
|  | UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES COMUNICACIONES INALÁMBRICAS |
|---|--|


| | | | |
|--------------------|--|---------|---|
| Nombre y Apellido: | | Guía #: | 2 |
| Docente: | | | |
| Técnico-docente: | | | |
| Fecha: | | | |
| Nivel: | | | |

| | |
|-------------------------------|--|
| Tema: | “Evaluación del rendimiento de LiFi (IEEE 802.15.7)” |
| Objetivo general: | Evaluar el rendimiento de una red LiFi por medio de la medición de parámetros clave con el fin de analizar los resultados. |
| Objetivos específicos: | <ul style="list-style-type: none"> • Probar las diferentes métricas de rendimiento de una red • Analizar los resultados obtenidos • Comparar el ancho de banda de LiFi vs WiFi • Realizar un informe técnico, detallando los requerimientos de la guía |
| Marco teórico: | Investigar los temas a continuación: <ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento de LiFi: • Ventajas y desventajas de sistemas VLC • Aplicaciones de sistemas VLC • Métricas de rendimiento (BW, jitter, bitrate, Packet loss, etc.) |

| | |
|-------------------------------------|---|
| <p>Materiales y equipos:</p> | <p>Hardware:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Antenas fotónicas • Adaptadores USB • Dongles LiFi – fotoreceptores <p>Software:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Iperf • Wireshark |
| <p>Procedimiento:</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Conecte el dongle LiFi a su PC utilizando el adaptador de red de ser el caso 2. Desactive WiFi, y podrá notar que se activa Internet como un adaptador de red Ethernet, por lo general lo reconoce como “Ethernet 3” 3. Instale un servidor y cliente Iperf (2 PC o 1 PC con una MV incluida). Caso contrario siga el manual de instalación de la siguiente página: https://reparar.info/uso-de-iperf-para-probar-la-velocidad-y-el-ancho-de-banda-de-la-red-rendimiento/ 4. Valide la conexión mediante ICMP entre cliente y servidor 5. Determine las etiquetas de Iperf que se utilizarán en la práctica mediante una tabla. 6. Medición básica del ancho de banda 7. Prueba con múltiples transmisiones 8. Medir el ancho de banda bidireccional 9. Medir el Jitter con TCP 10. Medir el Jitter con UDP 11. ¿Existe pérdida de paquetes? 12. Calcular el bitrate 13. Determinar el Throughput 14. Prueba el rendimiento con múltiples transmisiones |

| | |
|-------------------------|---|
| Resultados: | <ul style="list-style-type: none">• Manual de instalación de la herramienta Iperf para los SO. Windows y Linux• Tabla de etiquetas Iperf utilizados• Gráficas de las distintas métricas con su análisis respectivo• ¿Existe ruido óptico, si, no, por qué? |
| Conclusiones: | Redactar 5 conclusiones con respecto a la práctica N°2 |
| Recomendaciones: | Redactar 5 recomendaciones con respecto a la práctica N°2 |
| Bibliografía: | Presentar la bibliografía utilizada en formato APA 7 |

5.3.3. Guía 3: “Evaluación de QoS en una red LiFi”

| | |
|---|--|
|  | UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES COMUNICACIONES INALÁMBRICAS |
|---|--|


| | | | |
|--------------------|--|---------|---|
| Nombre y Apellido: | | Guía #: | 3 |
| Docente: | | | |
| Técnico-docente: | | | |
| Fecha: | | | |
| Nivel: | | | |

| | |
|-------------------------------|--|
| Tema: | “Evaluación de QoS con una red LiFi” |
| Objetivo general: | Analizar la calidad de servicio (QoS) de LiFi, utilizando herramientas de control tráfico, para poder ver el comportamiento de la red. |
| Objetivos específicos: | <ul style="list-style-type: none"> • Levantar el servicio de VoIP para determinar la calidad de servicio de la red. • Utilizar Wireshark para visualizar los protocolos de aplicaciones en tiempo real y determinar el desempeño de la red. • Realizar un informe técnico que valide los procesos de la guía 2 planteados. |
| Marco teórico: | Investigar los temas a continuación: <ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento de LiFi: • Ventajas y desventajas de sistemas VLC • Aplicaciones de sistemas VLC • Calidad de servicio (QoS) y calidad de experiencia (QoE) en LiFi • Servicios multimedia, ¿Es factible utilizar LiFi en ambientes de realidad virtual? |

| | |
|-------------------------------------|---|
| <p>Materiales y equipos:</p> | <p>Hardware:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Antenas fotónicas • Adaptadores USB • Dongles LiFi – fotoreceptores <p>Software:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wireshark • Issabel PBX • Oracle Virtual Box • Máquinas virtuales |
| <p>Procedimiento:</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Conecte el dongle LiFi a su PC utilizando el adaptador de red de ser el caso 2. Desactive WiFi, y podrá notar que se activa Internet como un adaptador de red Ethernet, por lo general lo reconoce como “Ethernet 3”. 3. Identifique los parámetros clave para evaluar la calidad de servicio (QoS) en una red LiFi, como la latencia, la tasa de error, el ancho de banda y la estabilidad de la conexión. 4. Determine los valores de referencia para cada parámetro basados en los requisitos y el estándar IEEE 802.15.7 establecido. 5. Instale Issabel PBX virtual bajo el mismo direccionamiento que LiFi le provee, y mediante otra MV compruebe el funcionamiento de la PBX ingresando la IP de la misma, en el navegador de la MV. 6. Cree extensiones en la PBX para el cliente 1 (MV Linux) y cliente 2 (MV Windows), bajo el mismo direccionamiento dado por DHCP por el AP de LiFi 7. Instale y configure softphones en los dos clientes con las extensiones creadas en la PBX. 8. Pruebe el funcionamiento realizando una llamada entre los clientes |

| | |
|-------------------------|---|
| | <ol style="list-style-type: none"> 9. Capture los paquetes utilizando Wireshark 10. Utilice la herramienta de “Análisis RTP (Protocol Real Time)” para visualizar los paquetes enviados en la llamada y observar el comportamiento de LiFi en aplicaciones multimedia 11. Registre el jitter y la pérdida de paquetes tanto de ida como de regreso. 12. Desconecte LiFi 13. Cambie las opciones de adaptador de VBox para tener conexión con WiFi, verifique el direccionamiento para que la PBX y los clientes tengan conexión 14. Realice la llamada nuevamente y capture los RTP con Wireshark |
| Resultados: | <ul style="list-style-type: none"> • Manual de instalación de Issabel PBX • Compare las gráficas y los datos obtenidos de jitter y pérdida de paquetes • Registro de llamada durante 5 minutos entre los clientes • Realice pruebas de estabilidad de la conexión LiFi en diferentes condiciones y ubicaciones dentro del laboratorio. • Registre cualquier interrupción o fluctuación en la conexión y analice los factores que pueden influir en la estabilidad. • Analice las causas de posibles errores y proponga soluciones o mejoras para mejorar la tasa de error y garantizar una conexión estable y confiable en la red LiFi. |
| Conclusiones: | Redactar 5 conclusiones con respecto a la práctica N°3 |
| Recomendaciones: | Redactar 5 recomendaciones con respecto a la práctica N°3 |
| Bibliografía: | Presentar la bibliografía utilizada en formato APA 7 |

5.3.4. Guía 4: “Evaluación de la seguridad LiFi frente a ataques de hombre en el medio (MITM) en comparación con WiFi.”

| | |
|---|--|
|  | UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES COMUNICACIONES INALÁMBRICAS |
|---|--|

| | | | |
|--------------------|--|---------|---|
| Nombre y Apellido: | | Guía #: | 4 |
| Docente: | | | |
| Técnico-docente: | | | |
| Fecha: | | | |
| Nivel: | | | |

| | |
|-------------------------------|--|
| Tema: | <i>“Evaluación de la Seguridad LiFi frente a Ataques de Hombre en el Medio (MITM) en Comparación con WiFi.”</i> |
| Objetivo general: | Demostrar cómo LiFi proporciona una mayor seguridad en la transmisión de datos frente a un ataque de Hombre en el Medio (MITM) en comparación con WiFi. |
| Objetivos específicos: | <ul style="list-style-type: none"> • Visualizar el cifrado de paquetes con la red LiFi • Introducir un atacante (hombre en el medio) en la red LiFi y WiFi • Comparar resultados en base a los datos obtenidos • Realizar un informe técnico, detallando los requerimientos de la guía |
| Marco teórico: | Investigar los temas a continuación: <ul style="list-style-type: none"> • Seguridad en WiFi • Seguridad en LiFi • Arquitectura de IEEE 802.15.7 e IEEE 802.11 • Ataque de hombre en el medio |

| | |
|-------------------------------------|---|
| <p>Materiales y equipos:</p> | <p>Hardware:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AP LiFi • Antenas fotónicas • Adaptadores USB • Dongles LiFi – fotoreceptores • AP WiFi <p>Software:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wireshark • Ethercap |
| <p>Procedimiento:</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Descargue e instale metaspoitable. 2. Utilizando la aplicación en Kali Linux Ethercap, se realizará el ataque de hombre en el medio. Se debe seleccionar a las 2 víctimas del ataque. 3. Abra Wireshark y empiece a capturar paquetes utilizando la interfaz de salida WiFi. 4. Realice el ataque de hombre en el medio, mediante la inundación de ARP en las tablas ARP de las víctimas bajo la red WiFi. 5. Acceda desde usuario 1 a usuario 2 a phpMyAdmin, utilizando cualesquier credenciales. 6. Ingrese nuevamente desde la máquina atacante a wireshark, y observe que ha capturado paquetes de tipo HTTP 7. Verifique los datos en texto plano mediante TCP Streams en la red WiFi. |

| | |
|-------------------------|--|
| | <p>8. Simulación de un ataque MITM en LiFi. Realice el mismo proceso anterior, con la diferencia de que debe de estar el usuario 1 y 2 conectados bajo la red LiFi, y el atacante estará conectado mediante una red WiFi externa.</p> <p>9. Repita los mismos pasos anteriores y verifique si un dispositivo atacante desde una red externa WiFi puede o no descifrar los datos obtenidos.</p> |
| Resultados: | <ul style="list-style-type: none"> • Compare los resultados obtenidos en la transmisión de datos entre LiFi y WiFi. • Destaque cómo LiFi proporciona una mayor seguridad y confidencialidad en la transmisión de datos al no ser vulnerable a un ataque MITM. • Resalte cómo la transmisión de datos a través de LiFi está protegida por el medio físico (la luz) y no puede ser fácilmente interceptada por un atacante. |
| Conclusiones: | Redactar 5 conclusiones con respecto a la práctica N°4 |
| Recomendaciones: | Redactar 5 recomendaciones con respecto a la práctica N°4 |
| Bibliografía: | Presentar la bibliografía utilizada en formato APA 7 |

CONCLUSIONES

Los escenarios de evaluación de LiFi revelaron coherencia en las métricas, destacándose la diferencia entre el escenario ideal (sin interferencias) y el escenario con interferencias cruzadas. Aunque el escenario 4 mostró valores menos favorables, aún son atractivos frente a otras tecnologías. Estos resultados respaldan la robustez de LiFi en diversos entornos y su potencial para brindar conectividad confiable y de alta calidad.

Las pruebas de laboratorio han destacado que LiFi es considerablemente más resistente a ataques de hombre en el medio (MITM) en comparación con WiFi. Esto se debe a que transmite datos a través de la luz, que limita la señal LiFi a su espacio físico y dificulta que un atacante interceda. En contraste, las señales WiFi, al propagarse por el aire, son más susceptibles a la interceptación, es así que LiFi ofrece una mayor seguridad en la transmisión de datos, siendo una elección sólida para aplicaciones que requieren alta seguridad.

LiFi es una solución prometedora para abordar los desafíos de congestión e interferencia en las redes WiFi existentes. Al ofrecer ancho de banda adicional a través de la transmisión de datos mediante luz, LiFi desempeña un papel crucial en la expansión de la capacidad de comunicación sin añadir presión a las redes WiFi ya saturadas. Esta capacidad para aliviar la congestión y las interferencias se traduce en un mejor rendimiento de las redes inalámbricas, una mayor eficiencia en la transmisión de datos y una experiencia de usuario más satisfactoria.

La implementación del módulo de prácticas basado en el estándar IEEE 802.15.7 ofrece a los estudiantes de Ingeniería de Telecomunicaciones un conocimiento especializado esencial para comprender en profundidad las comunicaciones ópticas inalámbricas. Esto les permite aplicar los conceptos teóricos en un entorno práctico, desarrollando habilidades técnicas cruciales, contribuyendo así al avance tecnológico en esta área.

RECOMENDACIONES

LiFi se encuentra en conformidad con el estándar IEEE 802.15.7, como parte de las tecnologías VLC. Sin embargo, es importante destacar que, a finales de julio de 2023, se aprobó un estándar específico para esta tecnología, el IEEE 802.11bb, diseñado con el propósito expreso de proporcionar una definición técnica precisa de LiFi. Por lo tanto, para aquellos que estén considerando realizar investigaciones o proyectos relacionados con LiFi, se recomienda que, a medida que este nuevo estándar se publique y esté disponible, se tome en consideración su adopción en lugar del estándar IEEE 802.15.7.

Se recomienda la adopción de LiFi en instituciones bancarias, financieras y gubernamentales debido a sus características únicas que la hacen idónea para aplicaciones que exigen niveles elevados de seguridad y confiabilidad en la transmisión de datos. Al utilizar la luz visible, LiFi restringe la señal a áreas específicas, lo que asegura un alto nivel de seguridad al impedir la interceptación fuera de ese espacio físico. Esta cualidad la convierte en la elección perfecta para la transferencia de datos sensibles y confidenciales, que son comunes en este tipo de instituciones.

Cada una de las modulaciones OOK, ASK y PSK, descritas en el IEEE 802.15.7 están definidas para comprender cómo se manipulan las señales de luz visible para transmitir datos. Es importante explorar las ventajas y desventajas de cada técnica en diferentes escenarios, lo que proporcionará una comprensión completa de su aplicabilidad en situaciones del mundo real.

En aplicaciones de tiempo real con alta QoS, es vital analizar y abordar el jitter en redes LiFi. Si esta variable incrementa implica identificar causas potenciales y tomar medidas para minimizarlo, dado que, en entornos no ideales, el jitter puede aumentar. Se deben considerar interferencias, calidad de señal y otros factores que afecten la estabilidad de la transmisión LiFi para garantizar una comunicación de datos confiable.

BIBLIOGRAFÍA

- Albor, L. (2014, September 16). *Del teléfono de Graham Bell a una internet que cambia el wifi por bombillas*. https://www.eldiario.es/hojaderouter/tecnologia/fotofono-graham-bell-internet-bombillas-li-fi_1_4647863.html
- Ali, K. A., & Mouftah, H. T. (2011). Wireless personal area networks architecture and protocols for multimedia applications. *Ad Hoc Networks*, 9(4), 675–686.
<https://doi.org/10.1016/J.ADHOC.2010.09.006>
- Arteaga, E. A. (2020). *system for high-speed data transmission*. 14(27), 73–81.
- Benítez, J. A. P. (2019). Evaluación de desempeño de una red IEEE 802.15.7 en modo infraestructura para ambientes indoor. *Repositorio.Espe.Edu.Ec*.
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15813/1/T-ESPE-040692.pdf>
- Bosh C., & Itziar A. (2015). *Implementación software del nivel físico (PHY) del estándar IEEE-802 . 15 . 7 (VLC) para. 7(Vlc)*.
- Buendía José. (2016, April 15). *LiFi, ¿cuáles son sus orígenes?*
<https://www.muycomputerpro.com/2016/04/15/lifi-origenes>
- Cedeño, M., Steeven, C., Ullauri, C., & Emmanuel, P. (2021). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO PROYECTO TÉCNICO : DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DEL ESTÁNDAR IEEE SOFTWARE .*
- Espinosa, M., & Vivanco, M. (2017). Li-Fi: Velocidad de Internet sorprendente bajo la Luz Visible. *Killkana Técnica*, 1(2), 1. https://doi.org/10.26871/killkana_tecnica.v1i2.76

- Fontal, B. (2005). *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones VII Escuela Venezolana Para la Enseñanza de la Química*.
- Fraunhofer IPMS. (2018). *LI-FI-OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION LI-FI-OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION Hands-On Session LI-FI HOTSPOT LI-FI GIGADOCK*
 ®. www.ipms.fraunhofer.de
- Galeano Susana. (2022, January 27). *El número de usuarios de internet en el mundo crece un 4% y roza los 5.000 millones (2022) - Marketing 4 Ecommerce - Tu revista de marketing online para e-commerce*. <https://marketing4ecommerce.net/usuarios-de-internet-mundo/>
- Gelani, B., Pandi, G., & Departments, H. P. (2018). *LI-FI (LIGHT FIDELITY): A WAY TO EFFICIENT DATA COMMUNICATION BASED ON OFDM APPROACH*. 6(2), 2320–2882. www.ijcrt.org
- Gerer David. (2017, May 5). *Li-Fi: High-Speed Communication via LED Modulation*. https://www.architectmagazine.com/technology/lighting/li-fi-high-speed-communication-via-led-modulation_o
- HELENO, S., & BARON, E. (2020). *ESTUDIO DE LAS VULNERABILIDADES EN LAS REDES DE TECNOLOGIA LI-FI* [Universidad Cooperativa de Bogotá]. http://repository.radenintan.ac.id/11375/1/PERPUS_PUSAT.pdf%0Ahttp://business-law.binus.ac.id/2015/10/08/pariwisata-syariah/%0Ahttps://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results%0Ahttps://journal.uir.ac.id/index.php/kiat/article/view/8839
- Hikmatyarsyah, Rahardjo, S., & Junde, J. (2019). Light fidelity (Li-Fi): Security and market sector. *PHOTOPTICS 2019 - Proceedings of the 7th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, Photoptics*, 154–162. <https://doi.org/10.5220/0007369901540162>

- Hollsen, A. (2018). *Tecnología LiFi — LiFi*. <https://www.lifitn.com/im-new>
- IEEE802.15.7. (2018). *IEEE802.15.7*.
- Javier Archidona. (2014, February 5). *Comandos interesantes, iperf ~ El mundo en bits*.
<https://www.elmundoenbits.com/2014/05/comandos-interesantes-iperf.html>
- Kahn, J. M. (1997). Wireless infrared communications. *Proceedings of the IEEE*, 85(2), 265–298. <https://doi.org/10.1109/5.554222>
- Laoyan Sarah. (2021, October 5). *Todo lo que necesitas saber acerca de la gestión de proyectos en cascada • Asana*. <https://asana.com/es/resources/waterfall-project-management-methodology>
- Lema, V. (2017). *Diseño De Una Red Li-Fi Para Una Sala Queri*. 523(85), 85.
- León, D. (2018). *Estudio y simulación de las técnicas DCO-OFDM, ACO-OFDM y HACO-OFDM para la tecnología Li-Fi en ambientes indoor*. 120.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19647>
- LOT, L. O. D. L. T. (2015). *2-Tercer Suplemento-Registro Oficial N° 439-Miércoles 18 de febrero de 2015*.
- Molero P., J. M. (2018). *AFE para transmisión LIFI* [Universidad de Sevilla].
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/12475/fichero/PFC-2475-MOLERO.pdf>
- Narváez, A. (2023). *“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA TECNOLOGÍA 802.11 AX MEDIANTE UN TESBED PARA EL LABORATORIO DE LA MATERIA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA*. Universidad Técnica del Norte.
- Oledcomm. (2020, November). *LiFiMAX - LiFi.co*. <https://lifi.co/lifi-product/lifimax/>
- Ortiz Fernanda. (2016, March 30). *Harald Haas y el LiFi, el futuro de las redes sin cables*.

<https://www.muycomputerpro.com/2016/03/30/harald-hass-tecnologia-lifi>

Oyola, I., Ponce, C., & Alvarado, S. (2016). *ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA LI-FI COMO ALTERNATIVA DE COMUNICACIÓN DE FORMA INALÁMBRICA EN LA BIBLIOTECA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN NETWORKING Y TELECOMUNICACIONES. PROYECTO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y FINANCIERA DEL CULTIVO DE OSTRA DEL PACÍFICO EN LA PARROQUIA MANGLARALTO, CANTÓN SANTA ELENA, PROVINCIA DE SANTA ELENA*, 136.

Peñañiel, J. (2015). 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 Sede Cuenca*, 1–104.
<http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/7770>

PureLifi. (2018). *Features • Fully networked LiFi system providing end-to end IP connectivity*.

Ramadhani, E., & Mahardika, G. P. (2018). The Technology of LiFi: A Brief Introduction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 325(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/325/1/012013>

Salazar, J. (2015, September 12). *REDES INALÁMBRICAS*.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf

Sarbazi, E., Uysal, M., & Carlo, M. (2013). PHY Layer Performance Evaluation of the IEEE. *International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*, 35–39.

Sarode, H., Kundu, S., Pawar, S., & Tote, V. (2023). MEDIA TRANSMISSION USING LI-FI. *Www.Irjmets.Com @International Research Journal of Modernization in*

Engineering. <https://doi.org/10.56726/IRJMETS35882>

Signifi. (2022). *Technical specification Trulifi 6002 Point-to-Multi-Point System Access Point 6002.1*.

Srivastava, S., Anmulwar, S., Sapkal, A. M., Batra, T., Gupta, A. K., & Kumar, V. (2014).

Comparative study of various traffic generator tools. *2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences, RA ECS 2014*, 6–8.

<https://doi.org/10.1109/RA ECS.2014.6799557>

Stallings, W. (2008). *COMUNICACIONES Y REDES DE COMPUTADORES Séptima edición*. 897.

Suarez Morales, A. G. (2017). *Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones usando la tecnología FSO*. [UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL].

<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/9201/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-243.pdf>

Sufyan Islim, M., & Haas, H. (2016). Modulation Techniques for Li•Fi Modulation

Techniques for Li•Fi Special Topic. *ZTE COMMUNICATIONS*, 14(2).

<https://doi.org/10.3969/j>

TERRA FERMA. (2021). *AP TERRA FERMA*. [https://terraferma.com/wp-](https://terraferma.com/wp-content/uploads/LiFi-AP-Datasheet-July-2021_07092021.pdf)

[content/uploads/LiFi-AP-Datasheet-July-2021_07092021.pdf](https://terraferma.com/wp-content/uploads/LiFi-AP-Datasheet-July-2021_07092021.pdf)

UIT T. (2013). *I.366.2. 2*.

UTN. (2021). *Misión y Visión*. https://telecomunicaciones.utn.edu.ec/?page_id=9

Velázquez, A. (2016, September 25). *La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones (artículo) | Khan Academy*.

<https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

ANEXOS

Anexo 1: Desarrollo Guía de laboratorio 1

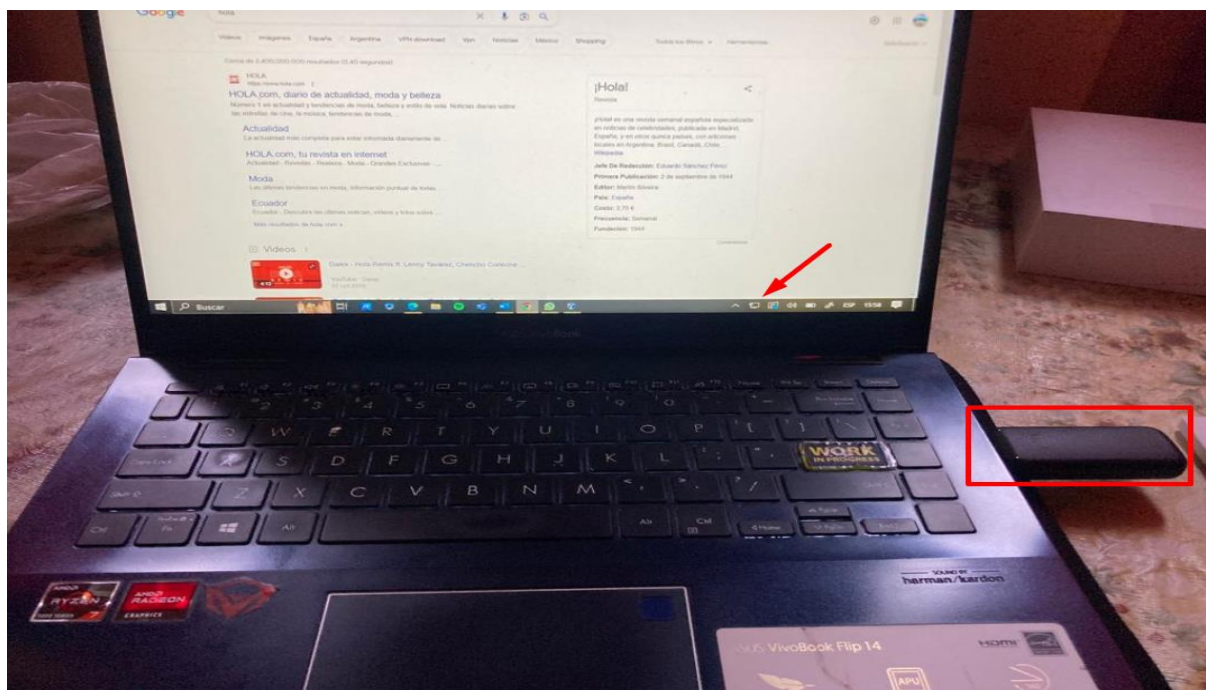
Tema: Configuración y análisis de la cobertura LiFi en un entorno controlado

Desarrollo de la práctica

1. Conecte el dongle LiFi a su PC utilizando el adaptador de red de ser el caso.

Figura 83

Conexión PC a LiFi



Nota. Fuente: Autoría

2. Desactive WiFi, y podrá notar que se activa Internet como un adaptador de red Ethernet, por lo general lo reconoce como “Ethernet 3”.
3. Coloque el receptor en una posición fija y mueva el transmisor en diferentes ubicaciones del laboratorio.

Figura 84*Ubicaciones para pruebas LiFi**Nota.* Fuente: Autoría

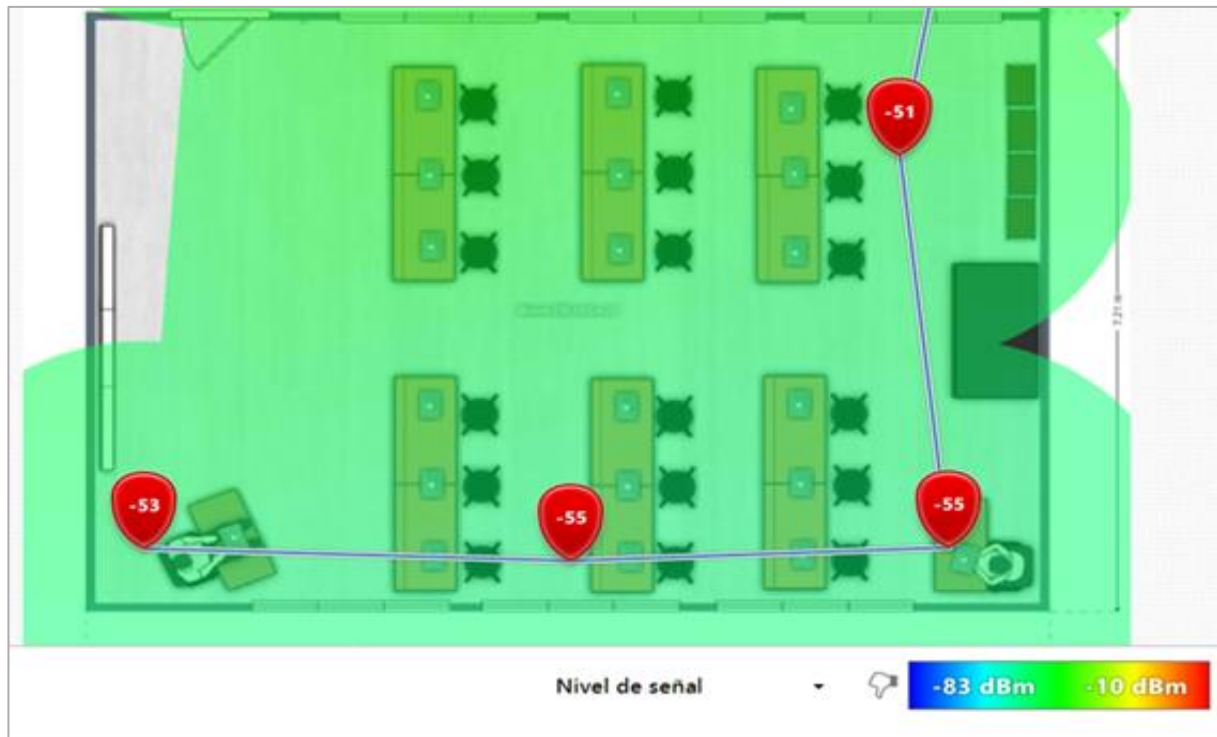
- Mida la intensidad de la señal LiFi recibida por el receptor en cada ubicación mediante un test rápido de velocidad.

Figura 85*Test de velocidad**Nota.* Fuente: Autoría

5. Construya un mapa de calor en base a los resultados obtenidos (Recuerde que no existen aplicaciones de mapeo para LiFi, debe basarse en una aplicación similar a NetSpot para construir su mapa de calor).

Figura 86

Mapa de calor LiFi



Nota. Fuente: Autoría

Anexo 2: Desarrollo Guía de laboratorio 2

Tema: Evaluación del rendimiento de LiFi (IEEE 802.15.7)

Desarrollo de la práctica

1. Conecte el dongle LiFi a su PC utilizando el adaptador de red de ser el caso
2. Desactive WiFi, y podrá notar que se activa Internet como un adaptador de red Ethernet, por lo general lo reconoce como “Ethernet 3”
3. Instale un servidor y cliente Iperf (2 PC o 1 PC con una MV incluida).

Figura 87

Instalación de Iperf en Linux

```
poleth@poleth:~$ sudo apt-get install iperf3
[sudo] contraseña para poleth:
Leyendo lista de paquetes... Hecho
Creando árbol de dependencias
Leyendo la información de estado... Hecho
```

Nota. Fuente: Autoría

En el caso de Windows, debe dirigirse al siguiente enlace

<https://www.solvetic.com/tutoriales/article/12263-como-usar-iperf3-windows-instalar-iperf3/>

para descargar el paquete de Iperf, luego de descomprimir la carpeta descargada se ingresa en la barra de nombre “cmd”, lo cual dirigirá a la dirección para ejecutar iPerf.

Figura 88

Instalación de Iperf en Windows

```
C:\Users\escob\Downloads\software\iperf-3.1.3-win64>dir
El volumen de la unidad C es OS
El número de serie del volumen es: BE7A-01ED

Directorio de C:\Users\escob\Downloads\software\iperf-3.1.3-win64
11/07/2023  00:58    <DIR>          .
11/07/2023  00:58    <DIR>          ..
21/04/2016  22:14             3.539.372  cygwin1.dll
09/06/2016  10:30             468.748  iperf3.exe
                2 archivos          4.008.120 bytes
```

Nota. Fuente: Autoría

4. Valide la conexión mediante ICMP entre cliente y servidor

Figura 89

Verificación de conexión entre cliente-servidor IPerf

```
C:\Users\escob\Downloads\software\iperf-3.1.3-win64>ping 192.168.1.25
Haciendo ping a 192.168.1.25 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.1.25: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.25: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.25: bytes=32 tiempo<1m TTL=64

poleth@poleth:~$ ping 192.168.1.114
PING 192.168.1.114 (192.168.1.114) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.1.114: icmp_seq=1 ttl=128 time=0.415 ms
64 bytes from 192.168.1.114: icmp_seq=2 ttl=128 time=0.339 ms
64 bytes from 192.168.1.114: icmp_seq=3 ttl=128 time=0.528 ms
```

Nota. La imagen superior representa una conexión exitosa mediante ICMP desde el cliente al servidor y la imagen inferior muestra una conexión exitosa desde el servidor al cliente.

Fuente: Autoría

5. Determine las etiquetas de Iperf que se utilizarán en la práctica mediante una tabla.

Tabla 33

Parámetros Iperf a utilizar

| Comando | Descripción |
|---------|--|
| -s | Servidor |
| -c | Cliente |
| -u | UDP |
| -d | Ancho de banda bidireccional |
| -P | Número de flujos o transmisiones |
| -f | Formato (kbits, Mbits, Gbits, Tbits) |
| -t | Tiempo total para enviar paquetes (segundos) |

Nota. Fuente: Autoría

6. Medición básica del ancho de banda

Figura 90*AB básico*

```
C:\Users\escob\Downloads\software\iperf-3.1.3-win64> iperf3 -c 192.168.1.25
Connecting to host 192.168.1.25, port 5201
[ 4] local 192.168.1.8 port 64049 connected to 192.168.1.25 port 5201
[ ID] Interval          Transfer    Bandwidth
[ 4]  0.00-1.00      sec    501 MBytes  4.20 Gbits/sec
[ 4]  1.00-2.00      sec    518 MBytes  4.34 Gbits/sec
[ 4]  2.00-3.00      sec    520 MBytes  4.36 Gbits/sec
[ 4]  3.00-4.00      sec    548 MBytes  4.60 Gbits/sec
[ 4]  4.00-5.00      sec    546 MBytes  4.59 Gbits/sec
[ 4]  5.00-6.00      sec    538 MBytes  4.52 Gbits/sec
[ 4]  6.00-7.00      sec    542 MBytes  4.55 Gbits/sec
[ 4]  7.00-8.00      sec    520 MBytes  4.36 Gbits/sec
[ 4]  8.00-9.00      sec    552 MBytes  4.63 Gbits/sec
[ 4]  9.00-10.00     sec    543 MBytes  4.56 Gbits/sec
-----
[ ID] Interval          Transfer    Bandwidth
[ 4]  0.00-10.00     sec    5.20 GBytes  4.47 Gbits/sec
[ 4]  0.00-10.00     sec    5.20 GBytes  4.47 Gbits/sec
sender
receiver
```

Nota. Fuente: Autoría

7. Medir el ancho de banda bidireccional

Figura 91*AB bidireccional*

```
C:\Users\escob\Downloads\software\iperf-3.1.3-win64> iperf3 -c 192.168.1.25 -d
send_parameters:
{
    "tcp": true
}
[ 4]  9.00-10.00     sec    524 MBytes  4.39 Gbits/sec
-----
[ ID] Interval          Transfer    Bandwidth
[ 4]  0.00-10.00     sec    5.07 GBytes  4.35 Gbits/sec
[ 4]  0.00-10.00     sec    5.07 GBytes  4.35 Gbits/sec
sender
receiver
iperf Done.
```

Nota. Ancho de banda bidireccional. Fuente: Autoría

8. Medir el Jitter con UDP

Figura 92

Jitter con UDP

```
C:\Users\escob\Downloads\software\iperf-3.1.3-win64> iperf3 -c 192.168.1.25 -u
Connecting to host 192.168.1.25, port 5201
[ 4] local 192.168.1.8 port 59121 connected to 192.168.1.25 port 5201
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Total Datagrams
[ 4] 0.00-1.00 sec      136 KBytes       1.11 Mbits/sec     17
[ 4] 1.00-2.00 sec      120 KBytes       983 Kbits/sec      15
[ 4] 2.00-3.00 sec      144 KBytes       1.18 Mbits/sec     18
[ 4] 3.00-4.00 sec      136 KBytes       1.11 Mbits/sec     17
[ 4] 4.00-5.00 sec      128 KBytes       1.05 Mbits/sec     16
[ 4] 5.00-6.00 sec      120 KBytes       985 Kbits/sec      15
[ 4] 6.00-7.00 sec      128 KBytes       1.05 Mbits/sec     16
[ 4] 7.00-8.00 sec      120 KBytes       983 Kbits/sec      15
[ 4] 8.00-9.00 sec      128 KBytes       1.05 Mbits/sec     16
[ 4] 9.00-10.00 sec     128 KBytes       1.05 Mbits/sec     16
-----
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 4] 0.00-10.00 sec    1.26 MBytes      1.05 Mbits/sec    3697978.194 ms  0/160 (0%)
[ 4] Sent 160 datagrams
```

Nota. Fuente: Autoría

9. ¿Existe pérdida de paquetes?

Figura 93

Pérdida de paquetes

```
C:\Users\escob\Downloads\software\iperf-3.1.3-win64> iperf3 -c 192.168.1.25 -u
Connecting to host 192.168.1.25, port 5201
[ 4] local 192.168.1.8 port 59121 connected to 192.168.1.25 port 5201
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Total Datagrams
[ 4] 0.00-1.00 sec      136 KBytes       1.11 Mbits/sec     17
[ 4] 1.00-2.00 sec      120 KBytes       983 Kbits/sec      15
[ 4] 2.00-3.00 sec      144 KBytes       1.18 Mbits/sec     18
[ 4] 3.00-4.00 sec      136 KBytes       1.11 Mbits/sec     17
[ 4] 4.00-5.00 sec      128 KBytes       1.05 Mbits/sec     16
[ 4] 5.00-6.00 sec      120 KBytes       985 Kbits/sec      15
[ 4] 6.00-7.00 sec      128 KBytes       1.05 Mbits/sec     16
[ 4] 7.00-8.00 sec      120 KBytes       983 Kbits/sec      15
[ 4] 8.00-9.00 sec      128 KBytes       1.05 Mbits/sec     16
[ 4] 9.00-10.00 sec     128 KBytes       1.05 Mbits/sec     16
-----
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth          Jitter      Lost/Total Datagrams
[ 4] 0.00-10.00 sec    1.26 MBytes      1.05 Mbits/sec    3697978.194 ms  0/160 (0%)
[ 4] Sent 160 datagrams
```

Nota. Fuente: Autoría

10. Calcular el bitrate

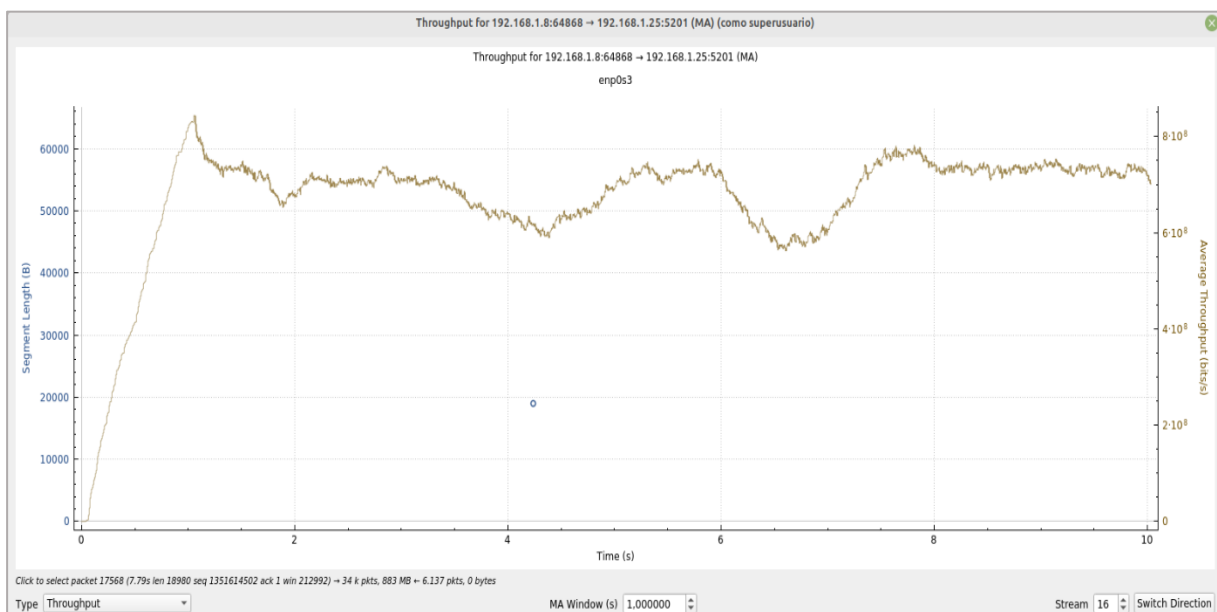
El cálculo del bitrate es en base al total de bytes capturados en la transmisión.

$$\text{Bitrate} = \frac{\text{(Cantidad de bytes capturados)}}{\text{Tiempo transcurrido (seg)}}$$

11. Determinar el Throughput

Figura 94

Throughput Lab 2



Nota. Fuente: Autoría

12. Prueba el rendimiento con múltiples transmisiones

Figura 95

Múltiples transmisiones LiFi

```
C:\Users\escob\Downloads\software\iperf-3.1.3-win64>iperf3 -c 192.168.1.25 -P 50
Connecting to host 192.168.1.25, port 5201
[ 4] local 192.168.1.8 port 50639 connected to 192.168.1.25 port 5201
[ 6] local 192.168.1.8 port 50640 connected to 192.168.1.25 port 5201
```

Nota. Fuente: Autoría

Anexo 3: Desarrollo Guía de laboratorio 3

Tema: Evaluación de QoS con una red LiFi

Desarrollo de la práctica

1. Conecte el dongle LiFi a su PC utilizando el adaptador de red de ser el caso
2. Desactive WiFi, y podrá notar que se activa Internet como un adaptador de red Ethernet, por lo general lo reconoce como “Ethernet 3”.
3. Identifique los parámetros clave para evaluar la calidad de servicio (QoS) en una red LiFi, como la latencia, la tasa de error, el ancho de banda y la estabilidad de la conexión.
4. Determine los valores de referencia para cada parámetro basados en los requisitos y el estándar IEEE 802.15.7 establecido.
5. Instale Issabel PBX virtual bajo el mismo direccionamiento que LiFi le provee, y mediante otra MV compruebe el funcionamiento de la PBX ingresando la IP de la misma, en el navegador de la MV.

Figura 96

Instalación Issabel PBX

```

https://192.168.1.118
Your opportunity to give back: http://www.patreon.com/issabel
System load:  0.73 (1min) 0.16 (5min) 0.05 (15min)      Uptime:  0 min
Asterisk:    Asterisk 11.25.3                        Active Calls: 0
Memory:      [=====>-----] 10% 316/3006M
Usage on /:  [===>-----] 7% 2,8/46G
Swap usage:  0.0%
SSH logins:  1 open sessions
Processes:   144 total, 96 yours

[root@issabel ~]#

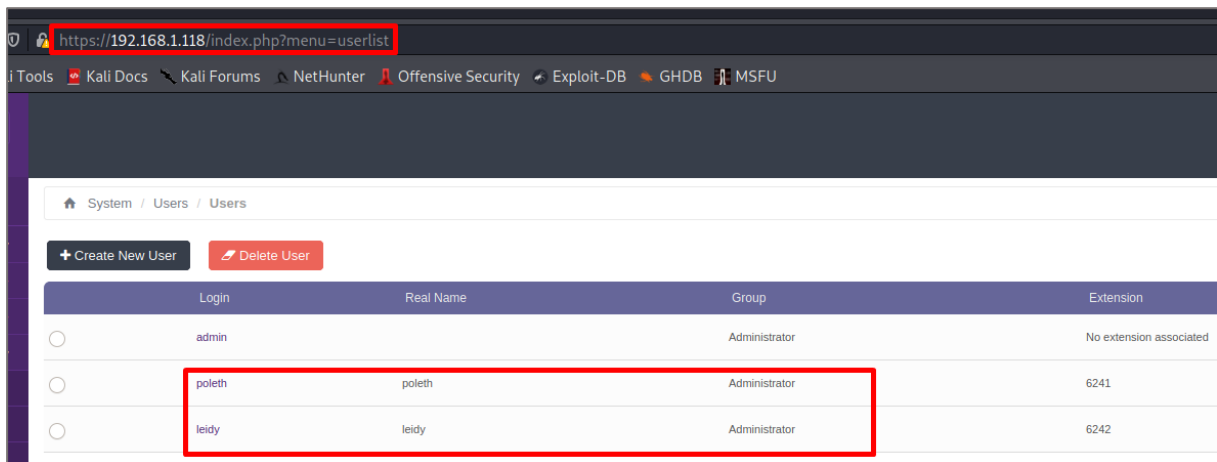
```

Nota. Fuente: Autoría

6. Cree extensiones en la PBX para el cliente 1 (MV Linux) y cliente 2 (MV Windows), bajo el mismo direccionamiento dado por DHCP por el AP de LiFi

Figura 97

Extensiones PBX



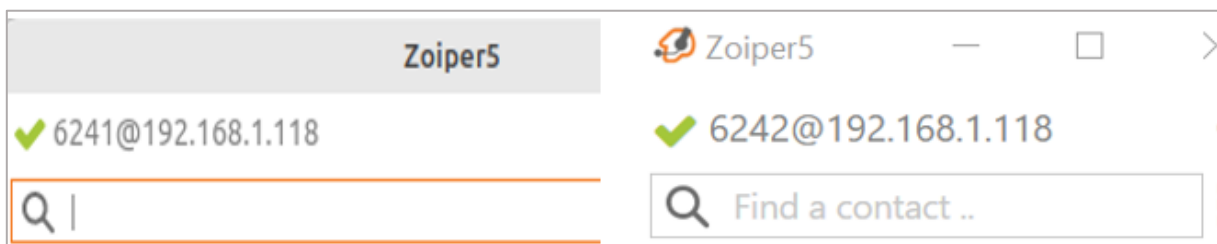
| | Login | Real Name | Group | Extension |
|-----------------------|--------|-----------|---------------|-------------------------|
| <input type="radio"/> | admin | | Administrator | No extension associated |
| <input type="radio"/> | poleth | poleth | Administrator | 6241 |
| <input type="radio"/> | leidy | leidy | Administrator | 6242 |

Nota. Fuente: Autoría

7. Instale y configure softphones en los dos clientes con las extensiones creadas en la PBX.

Figura 98

Cuentas Softphones

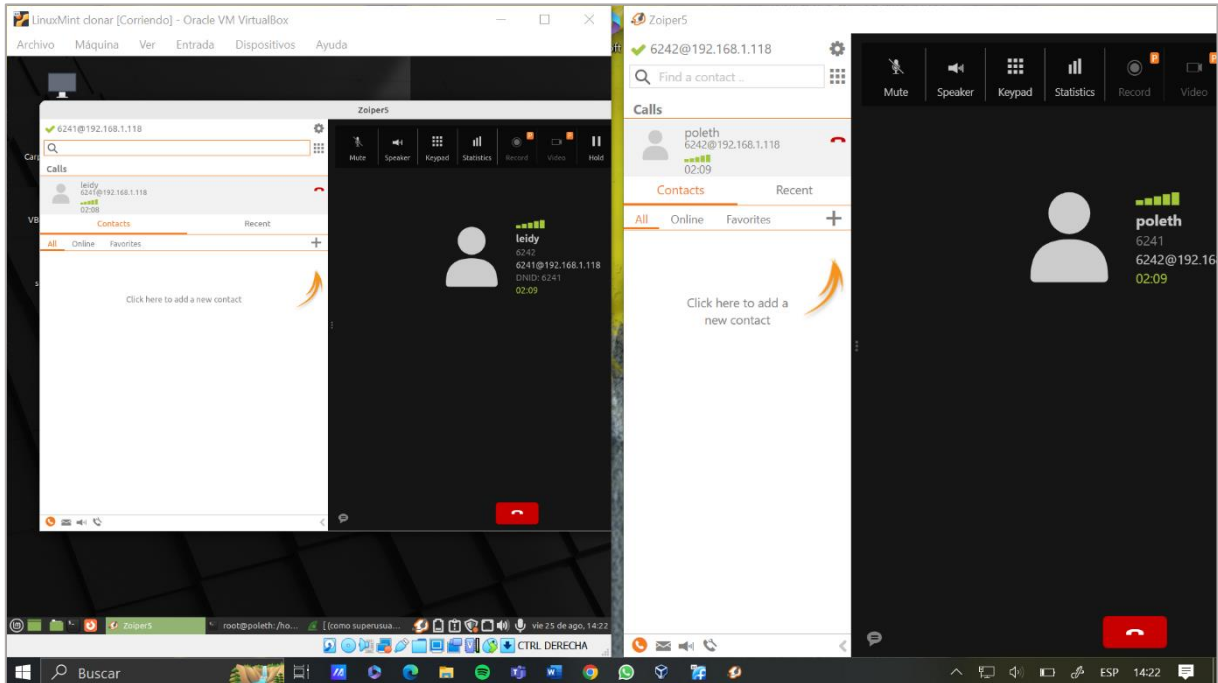


Nota. Fuente: Autoría

8. Realice una llamada entre los clientes durante 3 minutos.

Figura 99

Llamada VoIP bajo LiFi



Nota. Fuente: Autoría

9. Capture los paquetes utilizando Wireshark

Figura 100

Paquetes RTP bajo LiFi

| No. | Time | Source | Destination | Protocol | Length | Info |
|-----|--------------|---------------|---------------|----------|--------|--|
| 553 | 16.238184641 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 55 | PT=Unassigned, SSRC=0xB67513A2, Seq=59954, Time=24 |
| 557 | 16.318944419 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59955, Tim |
| 558 | 16.319583938 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11182, Tim |
| 559 | 16.338636121 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59956, Tim |
| 560 | 16.339092236 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11183, Tim |
| 561 | 16.345481807 | 192.168.1.8 | 192.168.1.118 | RTP | 60 | PT=Unassigned, SSRC=0x49ED67F5, Seq=20311, Time=83 |
| 563 | 16.368922489 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59957, Tim |
| 564 | 16.369918647 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11184, Tim |
| 565 | 16.388525805 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59958, Tim |
| 566 | 16.389102658 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11185, Tim |
| 567 | 16.418757332 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59959, Tim |
| 568 | 16.419302884 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11186, Tim |
| 569 | 16.438301998 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59960, Tim |
| 570 | 16.438802487 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11187, Tim |
| 571 | 16.458818718 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59961, Tim |
| 572 | 16.459611174 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11188, Tim |
| 573 | 16.478364868 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59962, Tim |
| 574 | 16.478972567 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11189, Tim |
| 575 | 16.498359622 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59963, Tim |
| 576 | 16.499131316 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11190, Tim |
| 577 | 16.519041348 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59964, Tim |
| 578 | 16.519720741 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11191, Tim |
| 579 | 16.538591575 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59965, Tim |
| 580 | 16.538634015 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59966, Tim |
| 581 | 16.539113854 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11192, Tim |
| 582 | 16.539114415 | 192.168.1.118 | 192.168.1.8 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0x1715C15A, Seq=11193, Tim |
| 583 | 16.568971308 | 192.168.1.25 | 192.168.1.118 | RTP | 214 | PT=ITU-T G.711 PCMA, SSRC=0xB67513A2, Seq=59967, Tim |

▶ Frame 559: 214 bytes on wire (1712 bits), 214 bytes captured (1712 bits) on interface enp0s3, id 0
 ▶ Ethernet II, Src: PcsCompu_2a:c6:e6 (08:00:27:2a:c6:e6), Dst: PcsCompu_4:bd:7c (08:00:27:c4:bd:7c)
 ▶ Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.25, Dst: 192.168.1.118
 ▶ User Datagram Protocol, Src Port: 53386, Dst Port: 16136
 ▶ Real-Time Transport Protocol

Nota. Fuente: Autoría

10. Utilice la herramienta de “Análisis RTP (Protocol Real Time)” para visualizar los paquetes enviados en la llamada y observar el comportamiento de LiFi en aplicaciones multimedia

Figura 101

Análisis RTP bajo LiFi

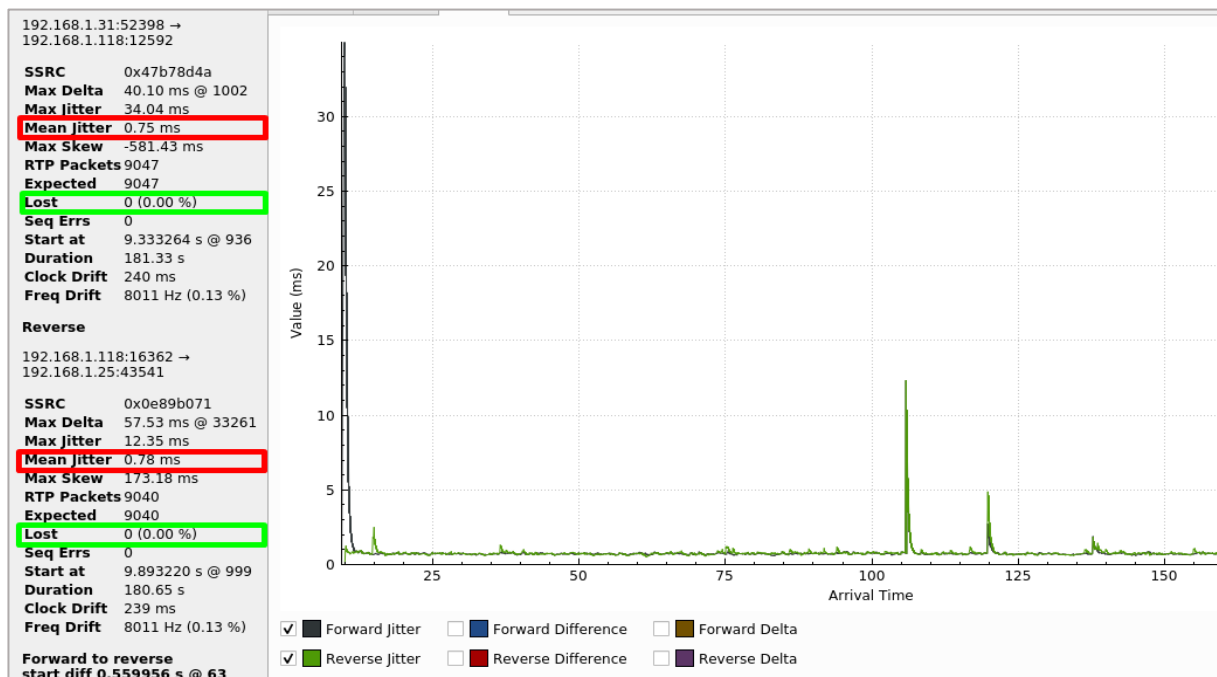
| Source Address | Source Port | Destination Address | Destination Port | SSRC | Payload | Packets | Lost | Max Delta (ms) | Max Jitter | Mean Jitter | Status |
|----------------|-------------|---------------------|------------------|------------|-------------------|---------|----------|----------------|------------|-------------|--------|
| 192.168.1.8 | 55368 | 192.168.1.118 | 11652 | 0x49ed67f5 | g711A, Unassigned | 6739 | 0 (0.0%) | 282.944 | 33.271 | 2.268 | |
| 192.168.1.25 | 55386 | 192.168.1.118 | 16136 | 0xb97513a2 | g711A, Unassigned | 6775 | 0 (0.0%) | 79.525 | 15.458 | 7.849 | |
| 192.168.1.118 | 16136 | 192.168.1.25 | 53386 | 0x74e128e3 | g711A | 6738 | 0 (0.0%) | 282.795 | 16.425 | 2.280 | |
| 192.168.1.118 | 11652 | 192.168.1.8 | 55368 | 0x1715c15a | g711A | 6769 | 0 (0.0%) | 79.114 | 15.464 | 7.857 | |

Nota. Fuente: Autoría

11. Registre el jitter y la pérdida de paquetes tanto de ida como de regreso.

Figura 102

Jitter y pérdida de paquetes bajo LiFi



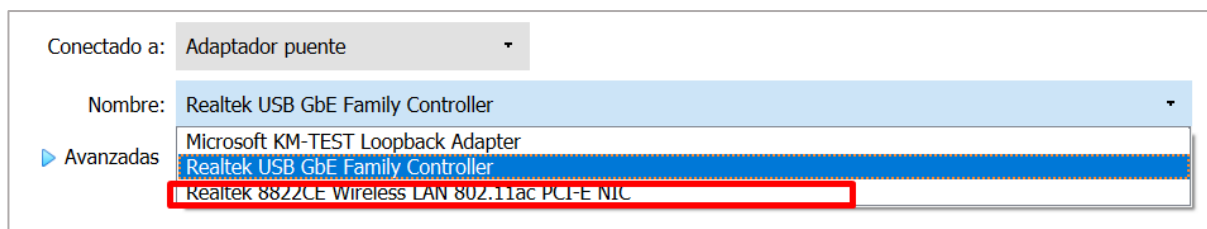
Nota. Fuente: Autoría

12. Desconecte LiFi

13. Cambie las opciones de adaptador de VBox para tener conexión con WiFi, verifique el direccionamiento para que la PBX y los clientes tengan conexión

Figura 103

Cambio de tarjeta de red

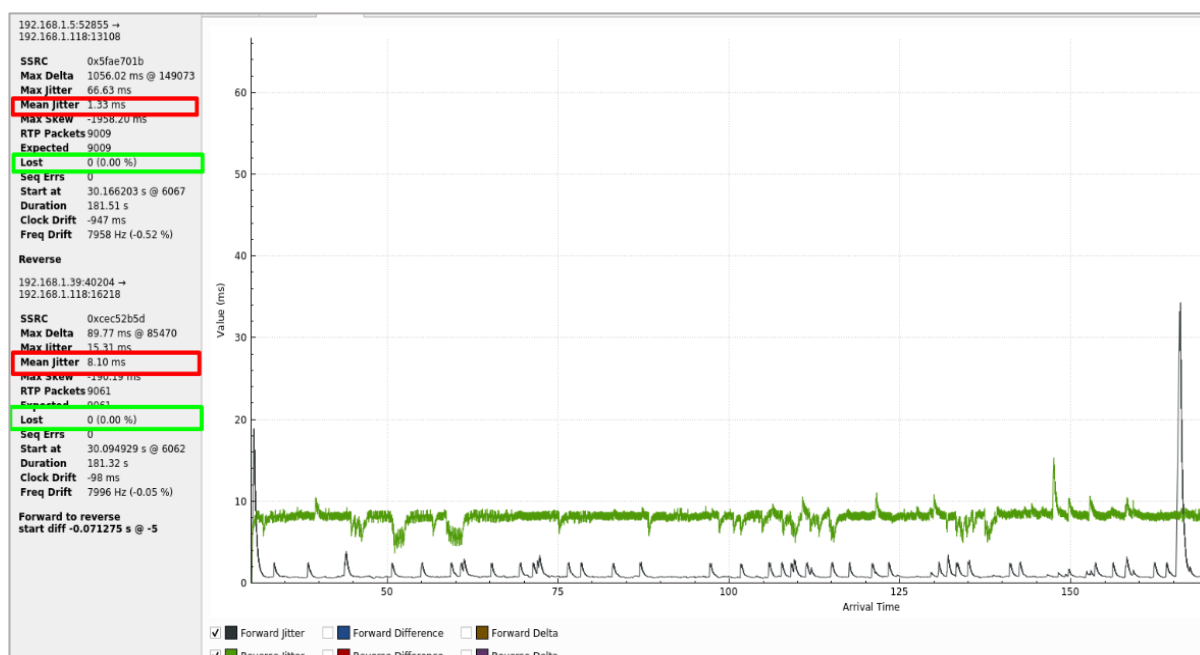


Nota. Fuente: Autoría

14. Realice la llamada nuevamente y capture los RTP con Wireshark

Figura 104

Jitter y pérdida de paquetes bajo WiFi



Nota. Fuente: Autoría

15. Compare los resultados de las gráficas y los datos obtenidos de jitter y pérdida de paquetes tanto de LiFi como WiFi.

Tabla 34*Resultados VoIP LiFi vs WiFi*

| Resultados VoIP | | |
|------------------------|------|------|
| Métrica | LiFi | WiFi |
| Jitter mínimo | --- | --- |
| Jitter máximo | --- | --- |
| Pérdida de paquetes | --- | --- |

Nota. Fuente: Autoría

Anexo 4: Desarrollo Guía de laboratorio 4

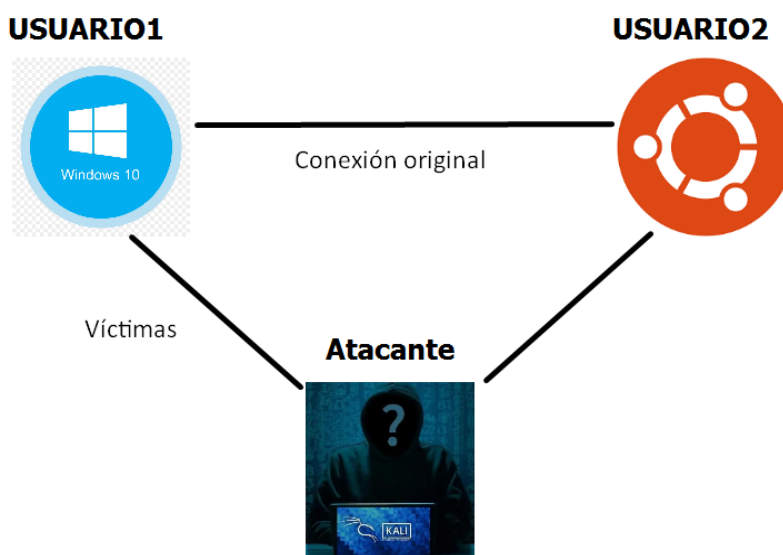
Tema: Evaluación de la Seguridad LiFi frente a Ataques de Hombre en el Medio (MITM) en Comparación con WiFi.

Desarrollo de la práctica

1. Levante la siguiente topología:

Figura 105

Topología Práctica N4



Nota. Fuente: Autoría

2. Realice una tabla de direccionamiento

Tabla 35

Direccionamiento WiFi topología P4

| Dispositivo | Interfaz | Dirección IP | Gateway |
|----------------------|------------|-----------------|-------------|
| Dispositivo 1 (WiFi) | Ethernet 3 | 192.168.1.25/24 | 192.168.1.1 |
| Dispositivo 2 (WiFi) | Ethernet 3 | 192.168.1.10/24 | 192.168.1.1 |
| Atacante (WiFi) | Eth0 | 192.168.1.9/24 | 192.168.1.1 |

Nota. Fuente: Autoría

3. Descargue metasploitable un entorno creado con vulnerabilidades fácil de ser atacado, que funcionará como usuario 2, acceda al siguiente enlace:

<https://sourceforge.net/projects/metasploitable/files/Metasploitable2/>

4. Cree una nueva máquina virtual en su entorno favorito de virtualización y añada el ISO de la MV.

Figura 106

MV Mesopoitable

```
* Running local boot scripts (/etc/rc.local)
nohup: appending output to 'nohup.out'
nohup: appending output to 'nohup.out'
[ OK ]

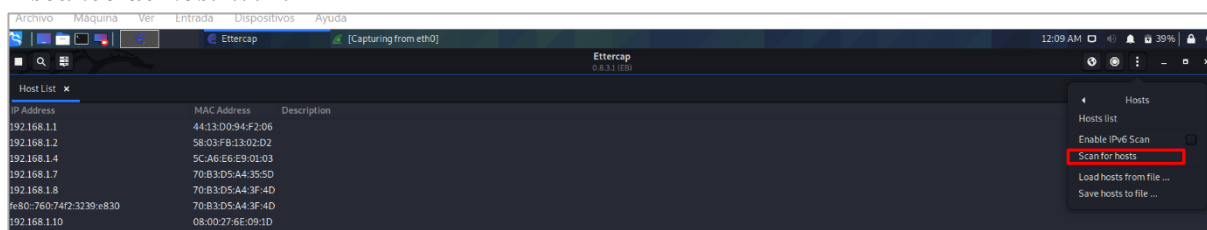
Warning: Never expose this VM to an untrusted network!
Contact: msfdev[at]metasploit.com
Login with msfadmin/msfadmin to get started
metasploitable login:
```

Nota. Fuente: Autoría

5. Utilizando la aplicación en Kali Linux Ettercap, se realizará el ataque de hombre en el medio, por lo que existe la necesidad en primera instancia de escanear a los dispositivos que se sujetan a la red WiFi.

Figura 107

Escaneo de host WiFi

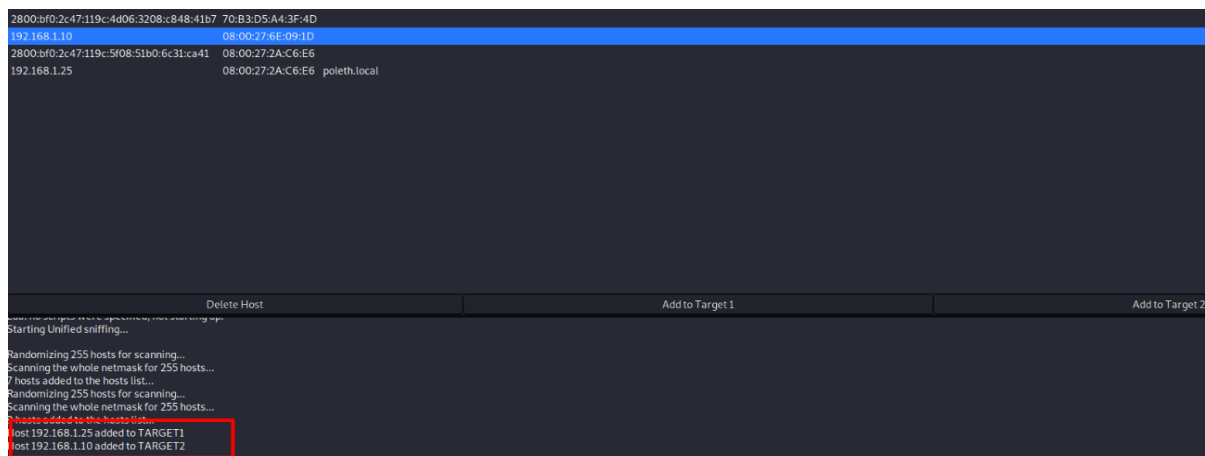


Nota. Fuente: Autoría

6. Se debe seleccionar a las 2 víctimas del ataque, en este caso contienen las IP mencionadas en la Tabla 35.

Figura 108

Selección de targets



Nota. Fuente: Autoría

7. Abra Wireshark y empiece a capturar paquetes utilizando la interfaz de salida WiFi de la máquina atacante “Kali Linux”. Además, en la sección de filtros debe de aplicar el protocolo **Http**.

Figura 109

Captura de paquetes 1 con Wireshark

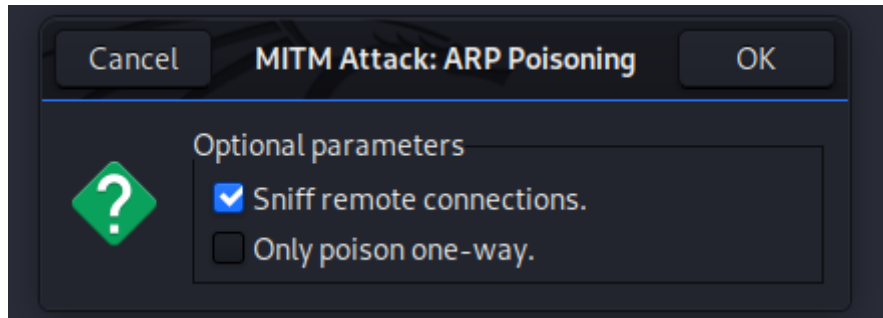


Nota. Fuente: Autoría

8. Realice el ataque de hombre en el medio, mediante la inundación de ARP en las tablas ARP de las víctimas bajo la red WiFi.

Figura 110

Ataque de MITM bajo LiFi

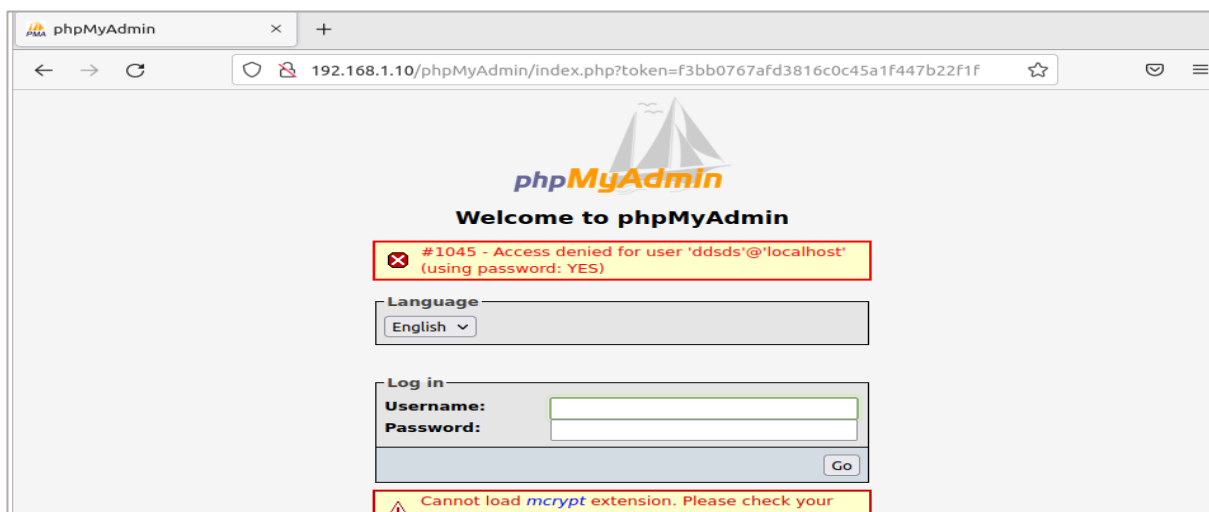


Nota. Fuente: Autoría

9. Acceda desde usuario 1 a usuario 2 a phpMyAdmin, utilizando cualesquier credenciales.

Figura 111

Acceso desde usuario 1 a usuario 2.



Nota. Fuente: Autoría

10. Ingrese nuevamente desde la máquina atacante a wireshark, y observe que ha capturado paquetes de tipo HTTP.

Figura 112

Verifique la captura de paquetes HTTP

| No. | Time | Source | Destination | Protocol | Length | Info |
|------|---------------|-------------------------|-------------------------|----------|--------|---|
| 1746 | 110.779653874 | 192.168.1.25 | 35.224.170.84 | HTTP | 153 | GET / HTTP/1.1 |
| 1875 | 116.781548249 | 2800:bf0:2c47:119c::... | 2001:67c:1562::23 | HTTP | 173 | GET / HTTP/1.1 |
| 1877 | 116.891279029 | 2001:67c:1562::23 | 2800:bf0:2c47:119c::... | HTTP | 275 | HTTP/1.1 204 No Content |
| 5431 | 382.751360817 | 192.168.1.25 | 192.168.1.10 | HTTP | 859 | POST /phpMyAdmin/index.php HTTP/1.1 (application/x-www-form-urlencoded) |
| 5436 | 382.813087036 | 192.168.1.10 | 192.168.1.25 | HTTP | 1050 | HTTP/1.1 302 Found |
| 5439 | 382.822179725 | 192.168.1.25 | 192.168.1.10 | HTTP | 743 | GET /phpMyAdmin/index.php?token=f3bb0767afd3816c0c45a1f447b22f1f HTTP/1.1 |
| 5453 | 382.860459782 | 2800:bf0:2c47:119c::... | 2600:1901:0:38d:: | HTTP | 398 | GET /canonical.html HTTP/1.1 |

Nota. Fuente: Autoría

11. Seleccione uno de los paquetes y diríjase al apartado de “Seguir”, “TCP Streams” donde aparecerá la información entrante y saliente ha sido capturada por el atacante.

Figura 113

Visualización de información vulnerada

```

Wireshark · Seguir flujo TCP (tcp.stream eq 11) · eth0

POST /phpMyAdmin/index.php HTTP/1.1
Host: 192.168.1.10
User-Agent: Mozilla/5.0 (X11; Linux x86_64; rv:95.0) Gecko/20100101 Firefox/95.0
Accept: text/html,application/xhtml+xml,application/xml;q=0.9,image/avif,image/webp,*/*;q=0.8
Accept-Language: es-ES,es;q=0.8,en-US;q=0.5,en;q=0.3
Accept-Encoding: gzip, deflate
Content-Type: application/x-www-form-urlencoded
Content-Length: 88
Origin: http://192.168.1.10
Connection: keep-alive
Referer: http://192.168.1.10/phpMyAdmin/index.php?token=f3bb0767afd3816c0c45a1f447b22f1f
Cookie: phpMyAdmin=0b42b699b2ed305cecf2446475c47c63b679f673; pma_lang=en-utf-8; pma_charset=utf-8; pmaUser-1=ADLSy
Upgrade-Insecure-Requests: 1

pma_username=poleth&pma_password=escobar&server=1&token=f3bb0767afd3816c0c45a1f447b22f1fHTTP/1.1 302 Found
Date: Wed, 06 Sep 2023 05:45:38 GMT
Server: Apache/2.2.8 (Ubuntu) DAV/2
X-Powered-By: PHP/5.2.4-2ubuntu5.10
Expires: Thu, 19 Nov 1981 08:52:00 GMT
Cache-Control: private, max-age=10800, pre-check=10800
Set-Cookie: pma_fontsize=deleted; expires=Tue, 06-Sep-2022 05:45:37 GMT; path=/phpMyAdmin/
Set-Cookie: pma_collation_connection=deleted; expires=Tue, 06-Sep-2022 05:45:37 GMT; path=/phpMyAdmin/; httponly
Set-Cookie: pma_theme=deleted; expires=Tue, 06-Sep-2022 05:45:37 GMT; path=/phpMyAdmin/
Set-Cookie: pmaUser-1=DY4YzWSQgD0%3D; expires=Fri, 06-Oct-2023 05:45:38 GMT; path=/phpMyAdmin/; httponly
Set-Cookie: pmaPass-1=V%2BX%2B0ko2rc8%3D; expires=Fri, 06-Oct-2023 05:45:38 GMT; path=/phpMyAdmin/; httponly
Last-Modified: Tue, 09 Dec 2008 17:24:00 GMT
Location: http://192.168.1.10/phpMyAdmin/index.php?token=f3bb0767afd3816c0c45a1f447b22f1f
Content-Length: 0
Keep-Alive: timeout=15, max=100
Connection: Keep-Alive
Content-Type: text/html

```

Nota. Fuente: Autoría

12. Simulación de un ataque MITM en LiFi. Realice el mismo proceso anterior, con la diferencia de que debe de estar el usuario 1 y 2 conectados bajo la red LiFi, y el atacante estará conectado mediante una red WiFi externa.

13. Direccionamiento LiFi y WiFi

Tabla 36

Direccionamiento LiFi/WiFi

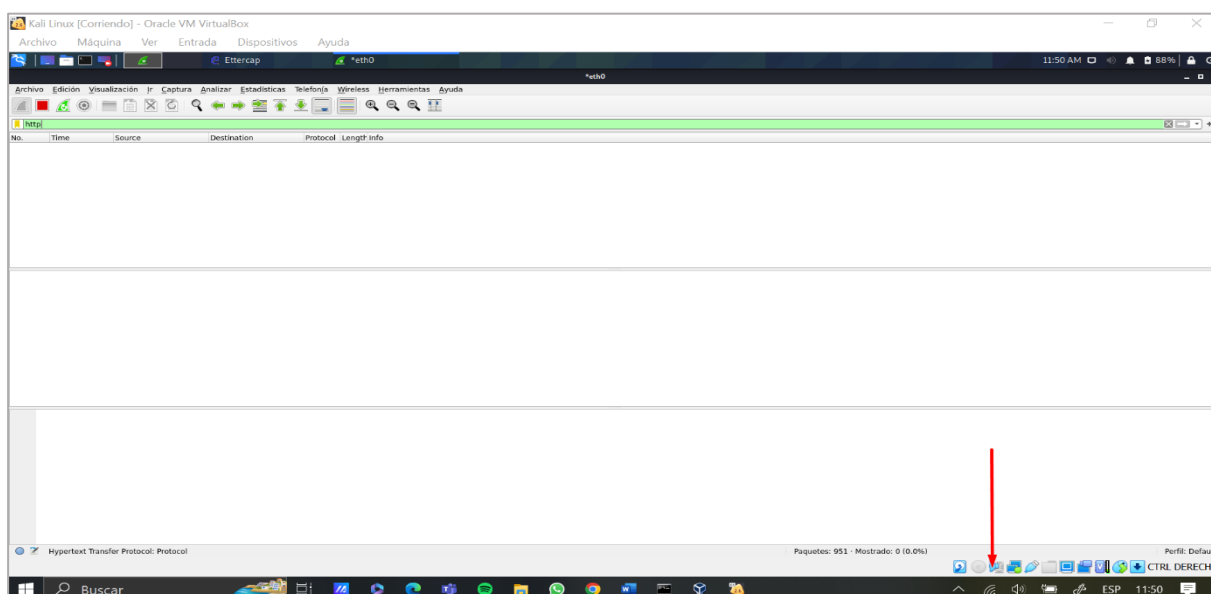
| Dispositivo | Interfaz | Dirección IP | Gateway |
|---------------------|------------|-----------------|-------------|
| Dispositivo 1(LiFi) | Ethernet 3 | 192.168.1.14/24 | 192.168.1.7 |
| Dispositivo 2(LiFi) | Ethernet 3 | 192.168.1.16/24 | 192.168.1.7 |
| Atacante (WiFi) | Eth0 | 172.20.10.3/24 | 172.20.10.1 |

Nota. Fuente: Autoría

14. Habrá Wireshark desde la máquina atacante bajo WiFi utilizando Kali Linux Y filtre los paquetes por HTTP.

Figura 114

Paquetes filtrados HTTP antes del ataque

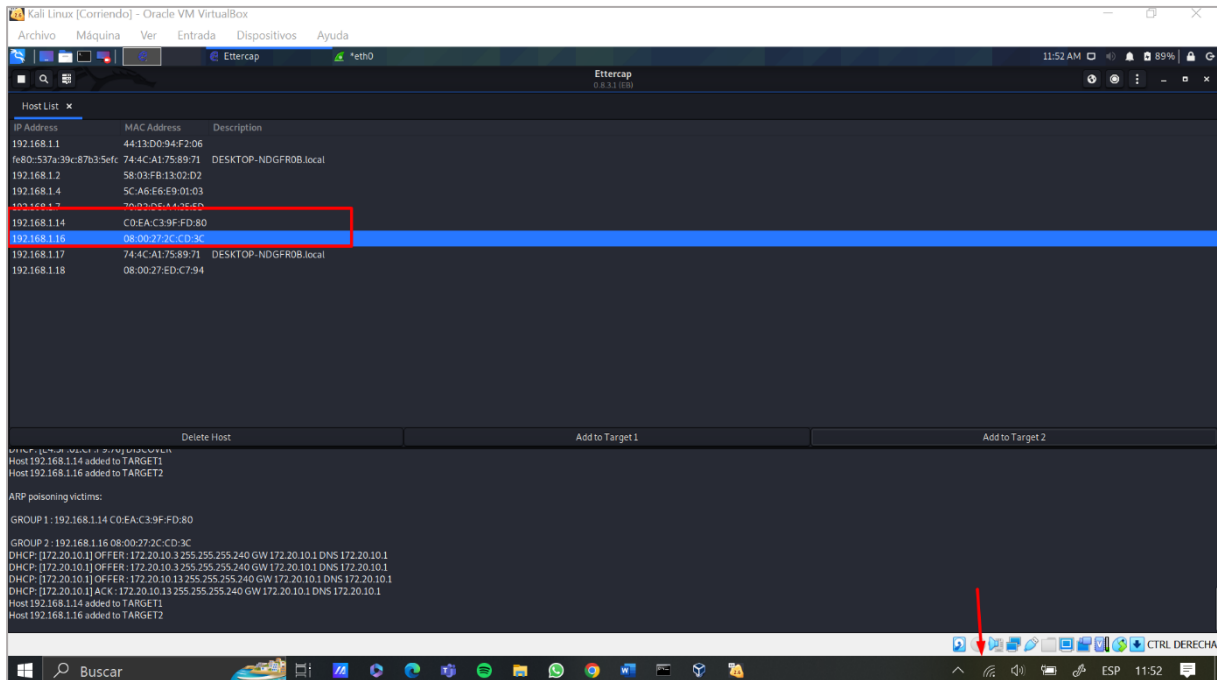


Nota. Fuente: Autoría

15. Utilizando Ettercap, haga un sondeo de host y escoja las IP de los usuarios LiFi que desea atacar.

Figura 115

Sondeo de host desde máquina atacante WiFi

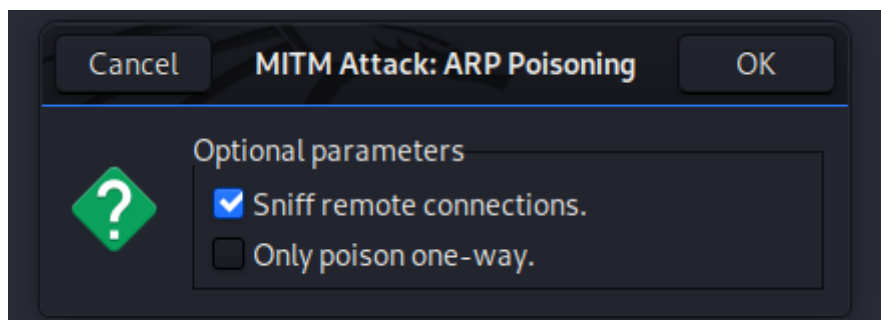


Nota. Fuente: Autoría

16. Haga un ataque mediante la inundación de ARP desde Ettercap con la máquina atacante.

Figura 116

Ataque de MITM bajo WiFi

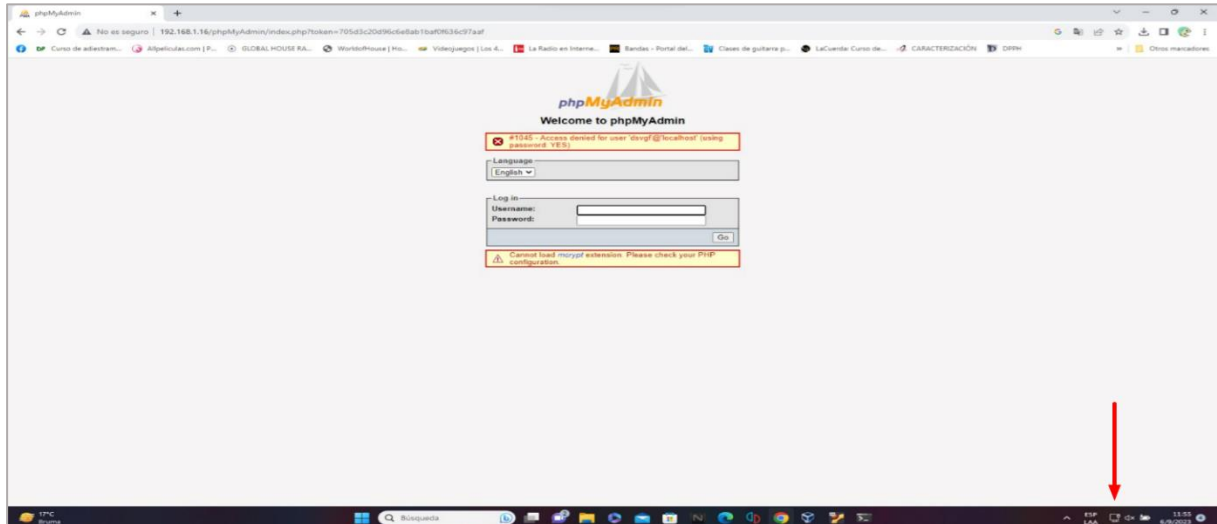


Nota. Fuente: Autoría

17. Acceda con las credenciales de phpMyAdmin desde el usuario 1 al 2.

Figura 117

Usuario 1 y 2 bajo LiFi

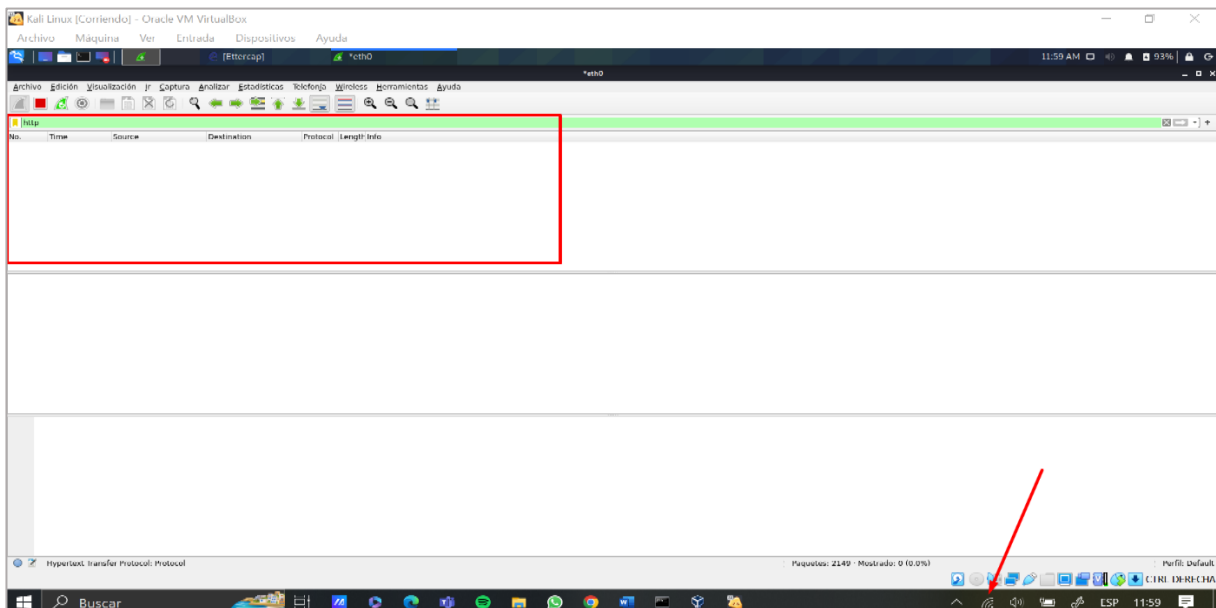


Nota. Fuente: Autoría

18. Verifique si se han capturado paquetes HTTP, con wireshark desde la máquina atacante.

Figura 118

Encriptación de datos fallida



Nota. Fuente: Autoría