



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Óptica de Espacio Libre: *RONJA* y sus
posibles mejoras electrónicas para
aumentar su capacidad.**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ing. Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Brandon Adrián Ortega Ramírez

ASESOR DE INFORME

Ing. Francisco José Rodríguez Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Agradezco de todo corazón a Dios y la vida por permitirme continuar con esta etapa tan importante de mi carrera.

A mis padres por su gran apoyo y ayuda en todos los aspectos que me han brindado. Por darme la vida que es el tesoro más grande. Por sus regaños y consejos que me han permitido crecer y tomar decisiones.

A mi hermano y mi tío como una muestra de cariño.

A mis profesores que me prepararon y formaron académicamente para el culmine de este momento y los que siguen.

A la persona a la que amo Carla Itzel y sus papás que me brindaron su apoyo y ayuda.

A mis amigos que sus palabras de aliento y ánimo me motivan para creer en mí y en lo que soy capaz de hacer.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. PRUEBA DEL EQUIPO <i>RONJA</i>	7
2.1. PRUEBAS DE LABORATORIO.....	7
2.2. PRUEBAS A 39 METROS.....	8
2.3. PRUEBAS A 118 METROS.....	11
2.4. PRUEBAS A 656 METROS.....	12
2.5. PRUEBAS A 1.06 KILÓMETROS.....	17
3. MEJORAS AL PROYECTO.....	28
3.1. MEJORAS TRANSMISOR.....	28
3.1.1. CAMBIO DE <i>LED</i>	28
3.1.2. ARREGLO DE <i>LED</i>	34
3.1.3. CAMBIO DE TECNOLOGÍA.....	36
3.2. MEJORAS RECEPTOR.....	45
3.2.1. CAMBIO DE FOTOSENSOR.....	45
3.2.2. CAMBIO DE TECNOLOGÍA.....	45
3.2.3. CAMBIO DE LENTES.....	51
3.2.4. ÓPTICA ADAPTATIVA.....	53
3.2.5. FILTRO DE ESPECTRO.....	54
3.3. MEJORAS INTERFACE.....	55
3.3.1. INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍAS DIGITALES EN UN SOLO CHIP 57	
3.3.2. ELIMINACIÓN DE LA INTERFACE.....	62
3.4. SISTEMA MÉCANICO DE ALINEACIÓN.....	62
4. CONCLUSIONES.....	65
5. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	66

6. ÍNDICE DE IMÁGENES	71
7. ÍNDICE DE TABLAS	75
8. ANEXOS	77
8.1. ANEXO A Envió de datos UDP	77
8.2. ANEXO B Recepción de datos UDP	80

1. INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones electrónicas son la transmisión, recepción y procesamiento de información usando circuitos electrónicos, para poder transmitir la información está debe convertirse en energía electromagnética, antes de que pueda propagarse por un sistema de comunicaciones electrónicas. Un sistema óptico de comunicaciones es un sistema electrónico de comunicaciones, que utiliza el espectro visible o infrarrojo de las ondas electromagnéticas como portador de la información, uno de los más utilizados en la actualidad es la fibra óptica y el sistema comunicación óptica del espacio libre (*FSO*, por sus siglas en inglés de *Free Space Optics*) no tan usado, los sistemas *FSO* utilizan la atmosfera como medio de transmisión al igual que los equipos de radiofrecuencia y de microondas; sin embargo, a diferencia de estas *FSO* provee inmunidad en caso de interferencia electromagnética [1].

RONJA (*Razonable Optical Near Joint Access*) es un proyecto de tecnología de enlace óptico de datos punto a punto, desarrollado por *Karel 'clock' Kulhavy* 1998-2016, la comunidad de redes inalámbricas Checa y *Twibright Labs*. El dispositivo tiene un alcance de 1.4 km y una tasa de datos full dúplex estable a 10 Mbps, con luz visible en *LED* de 630 nm (Rojo) o con *LED* infrarrojo de 875 nm. *RONJA* es un sistema prototipo *FSO* controlado por el usuario (como software libre) que se puede montar en casa y conectar a la red como un enlace inalámbrico de uso general. Cuenta con tres módulos electrónicos principales para la comunicación, los módulos de transmisión (TX) y recepción (RX) instalados en las “cabezas” que son tubos metálicos tipo telescopios con lentes que concentran la luz y el módulo *Twister* que es la interface entre el usuario conectado con un RJ45 a PC y los módulos TX y RX conectados vía cable coaxial [2] [3].

Este documento describe los pasos que se suscitaron durante las pruebas de enlace y distancia del proyecto *RONJA* y fue elaborado con la intención de probar esta tecnología y tener un acercamiento a *FSO* con ello, a su vez se describirán los obstáculos que se presentaron durante las pruebas, como es que se solucionaron, las posibles mejoras teóricas para un sistema más potente en tasa de transmisión y mayor alcance; comparado con sistemas modernos comerciales que utilizan este sistema para transmitir datos.

2. PRUEBA DEL EQUIPO RONJA

Debido a las condiciones en las que se debió probar el prototipo y observar el funcionamiento del proyecto, se dividieron en las siguientes etapas de desarrollo:

- Pruebas de laboratorio.
- Pruebas a 39 metros.
- Pruebas a 118 metros.
- Pruebas a 656 metros.
- Pruebas a 1.06 kilómetros.

2.1. PRUEBAS DE LABORATORIO

Se realizó el armado de las placas electrónicas (*PCB*) y las pruebas individuales de cada una de ellas (así como las respectivas caracterizaciones de los componentes dada la naturaleza eléctrica de los circuitos), se montaron los módulos a una distancia de aproximadamente 20 cm para comprobar el funcionamiento adecuado de los dispositivos en conjunto, para esto se creó con C Sharp (C#) una aplicación que mandara mensajes *UDP* y otra que los recibiera (**ANEXOS**). Una vez asegurada una correcta transmisión y recepción de información, los dispositivos fueron dispuestos sobre el sistema binocular para una prueba interna de aproximadamente 2 metros.

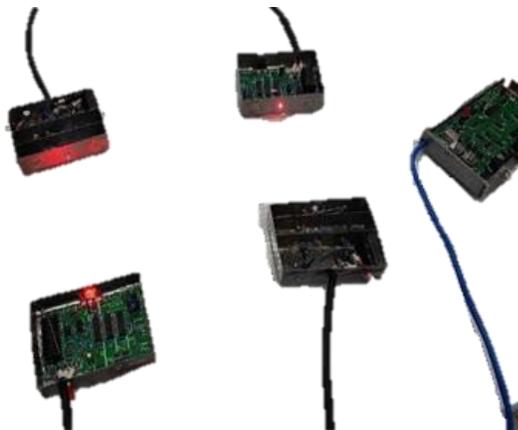


Fig. 1: Prueba de Laboratorio a 20 cm de distancia entre TX y RX.

Ambas pruebas dieron resultados satisfactorios, dando pie al siguiente escenario, que incluían una distancia de decenas de metros. Partiendo de un prototipo inicial análogo a los binoculares, se incorpora el sistema opto-electrónico. Ya que el sistema binocular es más eficiente en cuestión de orientación de las cabezas ópticas, también se incorporó una base móvil en forma de trípode que permitiera transportar el equipo para las diferentes pruebas de distancia, debido a que en lugares donde se realizaron estas pruebas no siempre se contaba con un lugar donde colocar el equipo con la estructura proporcionada en la documentación de *RONJA*. Una vez en conjunto, se hicieron pruebas de caracterización a diversas distancias y condiciones que evaluaran la calidad del funcionamiento del sistema mecánico.



Fig. 2: Sistema mecánico binocular

2.2. PRUEBAS A 39 METROS

Esta etapa conllevó varias transformaciones del prototipo, debido a las condiciones y dificultades añadidas durante dicha distancia, sobre todo en cuanto a la modificación binocular que no funcionó como se esperaba, debido a que los tubos utilizados para este proyecto fueron construidos a partir de *PVC* que se deformaron al añadirlos al sistema mecánico.



Fig. 3: Foto satelital de prueba a 39 metros.

Se realizó una prueba a dicha distancia, logrando una comunicación bidireccional. Sin embargo, el tiempo de alineación fue mayor al esperado. Observando que los tubos ópticos se encontraban con diferentes separaciones entre ellos, además del uso de calzas, que llevó a plantear un modo más eficiente de ajuste, que permitiera cumplir con el objetivo de una manera más rápida y eficiente. Debido a lo anterior, se diseñó e implementó el uso de separadores a la forma y medida de las cabezas ópticas, permitiendo que la distancia entre ambos tubos fuera la misma para ambos transceptores, disminuyendo así el desfase por separación o apertura. Todo esto aceleró el proceso de alineación con los dispositivos binoculares. Además se diseñó un sistema alternativo para la colocación de los módulos, que mejoró la alineación y ubicación del haz de luz dentro de los tubos. Una nueva prueba conllevó a demostrar que el sistema propuesto inicialmente no era el más eficiente, ya que el nuevo diseño con las caras de *PVC* absorbía el error de la forma y dimensiones de las cajas metálicas [4], obligando al *LED* (tanto del transmisor como del receptor) a permanecer centrados. Como complemento, se ajustaron mirillas de dimensiones pequeñas que permitían observar de manera más concisa el objetivo a la distancia.

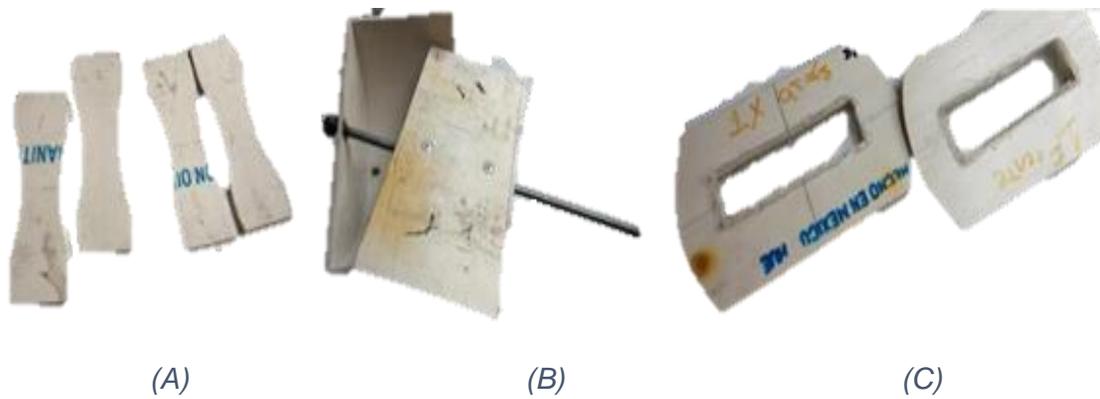


Fig. 4: Separadores para tubos de PVC (A). Primer modelo de desplazamiento para los módulos TX y RX dentro de los tubos (B). Placas de PVC para nuevo modelo de desplazamiento de módulos (C).

Con estas mejoras antes mencionadas, el sistema fue apto para ser probado a mayores distancias.

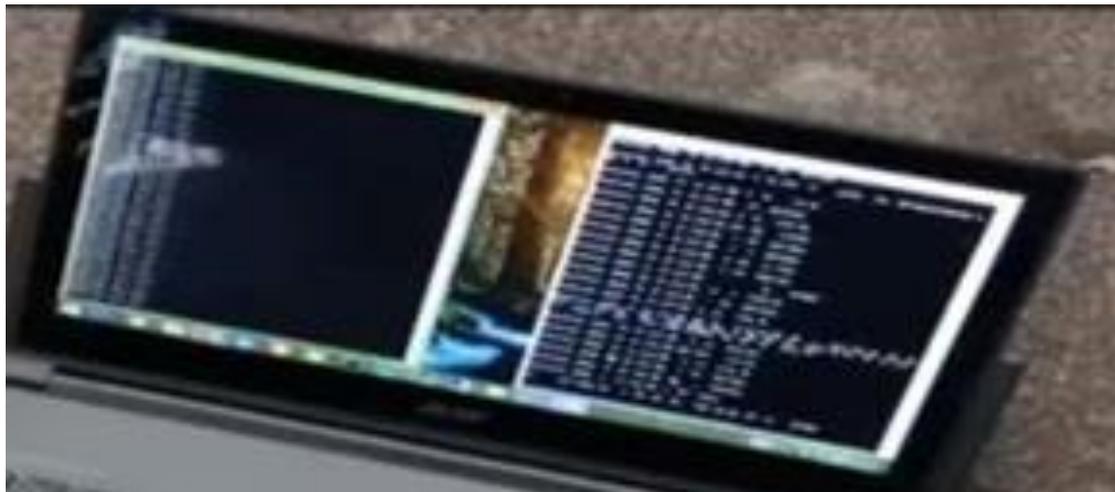


Fig. 5: Transmisión y recepción de datos bidireccional.

Compendio de soluciones en prueba a 39 metros

Problema	Solución
Media luna en la parte frontal de las bases para cajas del sistema electrónico.	Quitar la media luna y poner arcos guía para base corrediza.
Arcos guía generaban desfase del eje focal.	Poner calzas entre las bases corredizas y arcos guía para corregir dicho desfase, solución temporal.
El sistema binocular de las cabezas ópticas no era paralelo entre los tubos.	Uso de separadores diseñados en <i>PVC</i> para poner los tubos en paralelo con la misma separación.
La solución temporal de las calzas tenía que ser corregida ya que presentaba un gran problema a corto plazo.	Placas deslizantes de <i>PVC</i> hechas a mano para mantener los <i>LED</i> en el eje focal de forma constante.

Tabla 1: Relación de problemas-soluciones presentes en la prueba a 39 m.

2.3. PRUEBAS A 118 METROS

Una vez conseguida la distancia superior a los 100 metros, se procedió a probar el sistema *FSO* y corroborar que podía ser capaz de transmitir en dicho trayecto.



Fig. 6: Foto satelital de prueba a 118 m.

Esta prueba fue realizada de manera satisfactoria, evolucionando de pérdidas mínimas a nulas, a través de una mejor alineación de los tubos ópticos.



Fig. 7: Equipo montado para pruebas de 118 metros.

2.4. PRUEBAS A 656 METROS.

La primera longitud propuesta fue la correspondiente a la distancia de las islas en ciudad universitaria con alrededor de 500 metros de vista directa, debido a su proximidad y teórica libertad para ocupar el espacio. Sin embargo, el uso de las instalaciones está restringido y solo se nos permitió el permanecer un día sin lograr el objetivo propuesto, teniendo que elegir una nueva ubicación que

permitiera cumplir el objetivo. La nueva locación escogida contó con 656 metros, en la cual en el primer día se logró comunicación unidireccional con transmisión de paquetes *UDP*. El segundo día se logró nuevamente una comunicación unidireccional en sentido contrario, a lo que se concluyó que el sistema binocular tenía un defecto de paralelismo en los tubos, con base a medidas por medio de niveles y escuadras, dificultando la alineación e impidiendo una comunicación bidireccional a distancias más largas de la anteriormente lograda con este sistema.



Fig. 8: Foto satelital de la primera ubicación en CU (A). Foto satelital de la segunda ubicación con 656 metros (B).

Después de analizar la situación, se propuso e implemento la independización de las cabezas ópticas (tubos) a través de un sistema con 2 grados de libertad en forma de “J”. Para lograrlo, se removieron las antiguas bases y se colocó una nueva estructura semejante a la propuesta dada por el equipo de *RONJA*, adaptándola a nuestras necesidades [5]. Todo este proceso se repartió en varias tareas y tiempo de realización, que se pueden definir como:

- Obtención del material.
- Localización de un taller de manufactura para mayor precisión en corte y perforación de las piezas de soporte.
- Ajuste de trípodes.

- Modificación, ensamblado y soldadura de las piezas.

Aunado a esto se observó que la rigidez presente en los cables coaxiales afectaba en la estructura de los conectores provocando fracturas y desgaste de los mismos. Por ello, se procedió a elaborar nuevos cables más flexibles con nuevos conectores para todo el sistema.

Con todas las mejoras mencionadas, se procedió a realizar una nueva prueba con el nuevo sistema a la misma distancia. Dicha prueba nos proporcionó resultados satisfactorios demostrando que el sistema binocular a mayor distancia era ineficiente dadas las condiciones antes descritas (dada su dependencia de un tubo al otro, donde moviendo el tubo Transmisor, el tubo Receptor también se veía alterado), situación que fue eliminada con el nuevo sistema “J”. Se logró una comunicación bidireccional, así como resultados del protocolo *ICMP* vía *hrPING*, indicando un tiempo de respuesta muy similar a las pruebas de menor distancia [6].

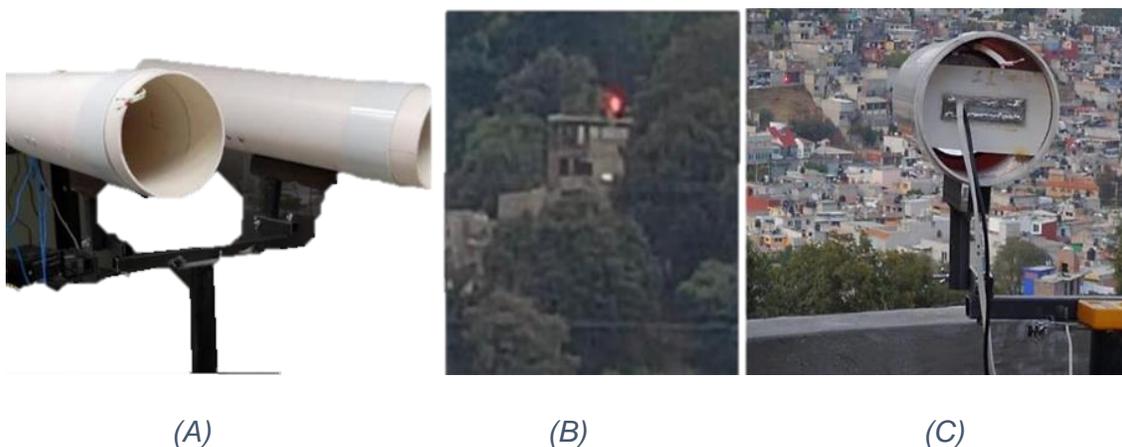
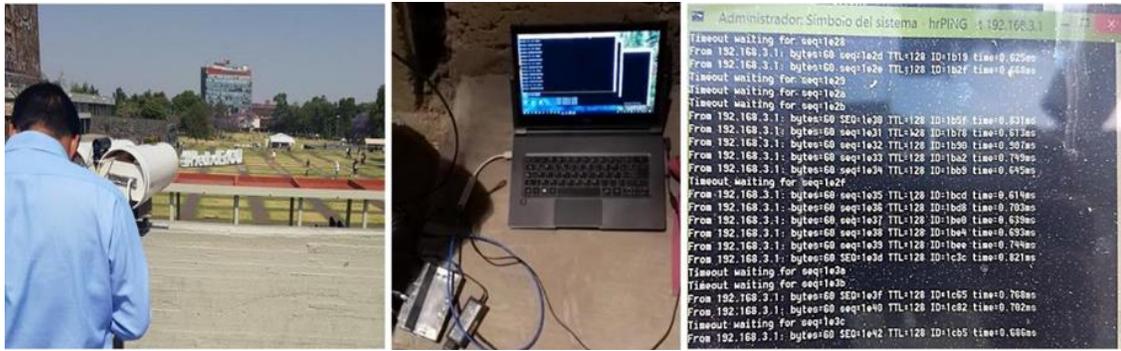


Fig. 9: (A) Modificación con los tubos y los movimientos independientes entre ellos. (B) Vista de la luz del transmisor en su máximo brillo. (C) Prueba a 656 metros con el nuevo sistema en “J”.



(A)

(B)

(C)

Fig. 10: (A) Primera prueba realizada en las instalaciones de la UNAM. (B) Funcionamiento unidireccional con el sistema binocular. (C) Resultado completo con la implementación del sistema en “J”.

Sin embargo, se pudo observar que los movimientos de las bases de PVC manufacturadas a mano incidían en la pérdida de paquetes y también en la pérdida del enlace. A lo que se propuso un rediseño, manufacturación y re ensamble de las mismas. Por lo que se procedió a una investigación y cotización de materiales y procesos de manufactura más precisos, sin agregar mayor peso a la estructura. Se diseñó en *AutoCAD* una primera aproximación y se seleccionó el corte Láser en acrílico [7]. Las muestras en acrílico nos llevaron a la mejora del diseño, modificando parámetros como:

- Reducción del diámetro de las perforaciones para tornillería.
- Ajuste de las dimensiones del contorno de las placas de acrílico.
- Ampliación del contorno central que rodea los *LED* para evitar dispersión de la luz.
- Adición de un sistema de referencia para centrar los *LED*.

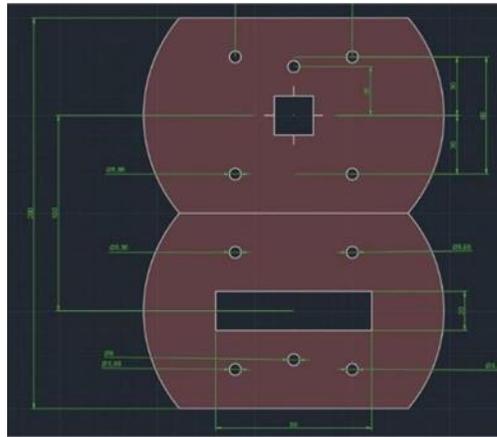


Fig. 11: Muestra del diseño final, de las nuevas caras frontal y trasera para las cajas metálicas.

Debido a que en esta distancia se logró la transmisión bidireccional se optó por aumentar la distancia de transmisión a un kilómetro.

Compendio de soluciones en prueba a 656 metros.

Problema	Solución
Sistema binocular imperfecto, que a distancia fue demasiado notable.	Independización de las cabezas ópticas y retomando los 2 grados de libertad con un sistema mecánico en forma de "J" similar a la propuesta originalmente en el proyecto RONJA.
Gran rigidez de los cables coaxiales iniciales provocaba daños estructurales en los conectores.	Reemplazo por nuevos coaxiales más delgados y flexibles.
Placas de PVC hechas a mano poco precisas y con imperfecciones de manufacturación, que a distancia generaban problemas a corto plazo.	Manufacturar las placas con un material menos endeble y con mayor precisión. A lo que llevó a placas de acrílico cortadas con Láser.

Tabla 2: Relación de problemas solución presentes en la prueba a 656 metros.

2.5. PRUEBAS A 1.06 KILÓMETROS

Para esta prueba hubo mucha dificultad para encontrar una locación que permitiera hacer la prueba final a 1.4 km que el proyecto *RONJA* alcanza, se encontró una locación con 1.06 km en el pueblo de San Nicolás Totolapan, cerca de la locación para la prueba anterior que permitía acceso público.



Fig. 12: Foto satelital de prueba a 1.06 km.

Se realizó una primera prueba, logrando una comunicación unidireccional con las nuevas modificaciones antes mencionadas en un tiempo relativamente menor al presentado en la prueba anterior de 656 m.



Fig. 13: (a) Mayor intensidad de transmisión del punto A (visto desde el punto B), donde se recibió la transmisión (b) unidireccional.

Con esto se observó la necesidad de realizar un sistema mecánico de alineación que permitiera el movimiento de las cabezas ópticas más preciso e independiente de los movimientos conjuntos de dichos dispositivos. El sistema con base a resortes para amortiguar el movimiento del viento y tornillería de rosca fina para movimientos ligeros y con la fuerza suficiente para sostener las cabezas ópticas [8]. Para este último se pensó en un mecanismo tipo tensor.



Fig. 14: Tensor con cuerda estándar (con rosca derecha e izquierda) de venta al público.

Sin embargo, como se puede observar en la **Fig. 14**, este tipo de dispositivos, para su venta comercial, cuenta con un juego entre piezas, que para el objetivo que necesitamos lograr del enfoque, generarían problemas muy graves a esta o mayores distancias. Por ello, y a la dificultad de encontrar comercialmente alguno de gran grado de exactitud, se optó por realizar diversas investigaciones, cotizaciones y diseños que permitieron un libre movimiento, preciso y exacto para los cabezales ópticos. Con todo esto, se tuvo una primera idea:

Cálculo de variación longitudinal del haz de luz con nuevo sistema de tensor personalizado.

Paso de rosca		0.2
a (lado variable del triángulo oblicuángulo)		167.7
b (lado constante del triángulo oblicuángulo)		75
c (lado constante del triángulo oblicuángulo)		150
Coseno del ángulo variable	Ángulo referencia de triángulo rectángulo [°]	
0.894454383	26.56156722	
Ángulo de la variación por paso [°]	Variación angular [°]	Paso de rosca [mm]
26.59570753	0.034140306	0.2
26.64680389	0.085236669	0.5
26.90025936	0.338692137	2
26.71641552	0.154848297	0.91
26.77732987	0.215762645	1.27
Variación Longitudinal por cuarto de vuelta		
Var. Longitudinal [m] a 1000 m	Var. Longitudinal [m] a 1400 m	Var. Longitudinal [m] a 5000 m
0.59586082	0.834205148	2.979304099
1.487661608	2.082726251	7.43830804
5.911361789	8.275906504	29.55680894
2.7026192	3.78366688	13.513096
3.765786365	5.272100911	18.82893182

Tabla 3: Se muestra el efecto de cada tipo de distancia de separación a 1000 metros (o más), partiendo de un sistema trigonométrico.

En función a los datos observados en la **Tabla 3**, se escogió el paso de separación más pequeño que se pudiera fabricar para tener una menor desviación del haz (a la hora de girar el tensor) y lograr un ajuste más fino a 1000 o más metros de distancia entre transceptores. En este caso, estos tensores serán aplicados en la prueba de 1.06 kilómetros. Se fabricaron 4 tensores con paso de 0.453 mm (56 hilos por pulgada) con acero templado para una mayor resistencia, lo que provocó que no se pudiera hacer más pequeño el paso de las cuerdas.



Fig. 17: (A) Se muestra uno de los vástagos siendo procesado para añadirle las cuerdas finas. (B) Se observan las piezas terminadas. (C) Se aprecia el proceso prueba de estos tensores en el taller.



Fig. 18: Tensor fabricado con 0.453 mm de paso o 56 hilos por pulgada.

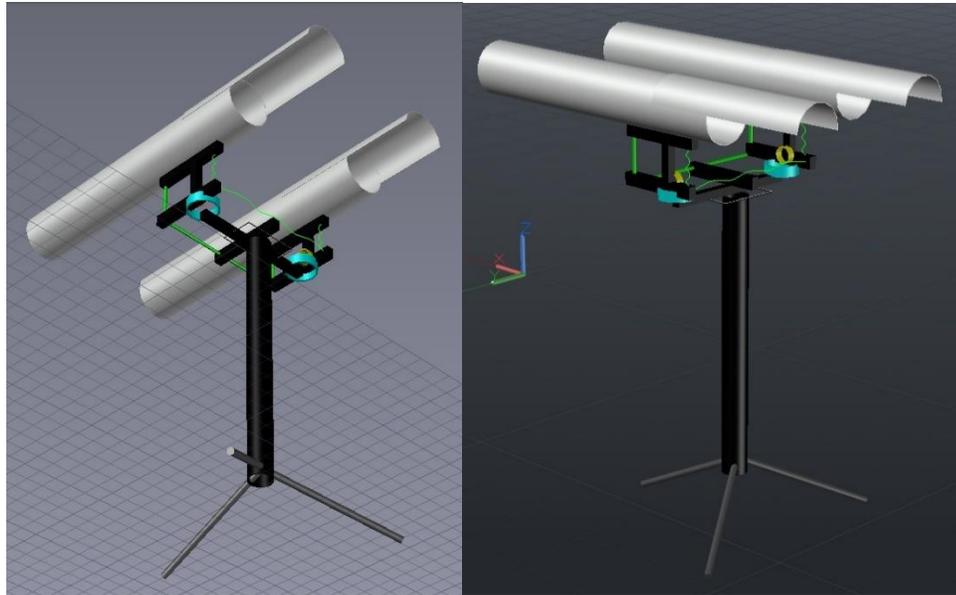


Fig. 19: Muestra de equipo diseñado en AutoCAD con tensores, resortes y rodamientos simulados.

Para alinear y realizar las pruebas con las nuevas modificaciones, se tuvieron diversas dificultades por las condiciones climáticas que se vivieron en la Ciudad de México, como la contingencia ambiental por la excesiva contaminación, lluvias y días nublados. Viendo el lado bueno de las inclemencias del tiempo, se pusieron a prueba las condiciones adversas que vivirá el sistema *FSO* bajo ambientes desfavorables, que se asemejan mucho a la neblina y días de bruma (las cuales son de las condiciones más contraproducentes en cuanto al uso de este tipo de comunicaciones, debido a la similitud de dimensiones de las partículas dispersas junto a las longitudes de onda utilizadas). Para dar una idea del nivel de efecto que se percibe, se puede comparar la cantidad de energía pérdida por la atenuación según la condición presente en el medio con la **Fig. 20**.

Condición	Atenuación
Día limpio	0.19 dB/km
Día nublado	2.58 dB/km
Día lluvioso	12.65 dB/km

Tabla 4: Atenuación atmosférica [9].

Se retornó al campo de pruebas para mejorar el enlace establecido, una vez reducida la contaminación atmosférica, aumentando el voltaje de recepción (mostrado por el *Received Signal Strength Indicator* o *RSSI* de cada transceptor *RSS*), para así poder reducir la pérdida de paquetes. Después de lograr la alineación, se entabló la conexión full dúplex y se ajustó lo más fino posible el haz del Transmisor hacia el Receptor hasta que se logró conseguir un mínimo de paquetes perdidos.

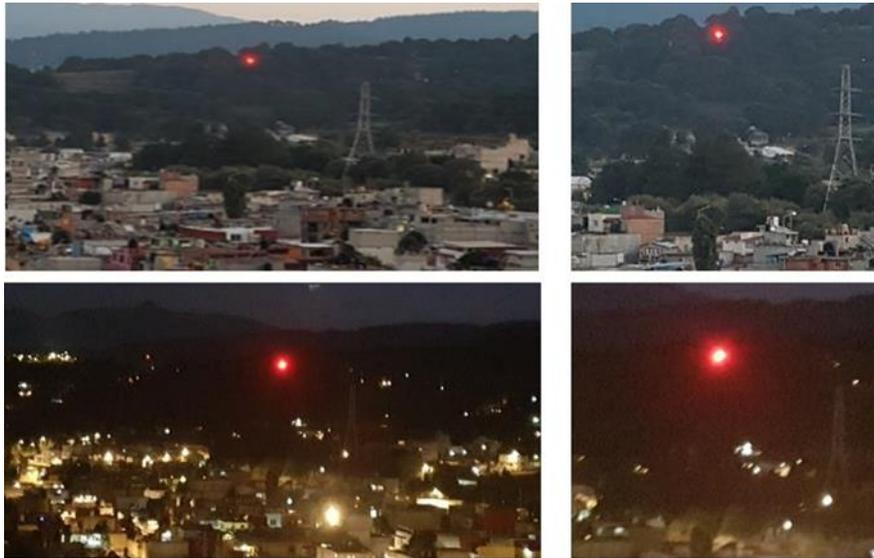
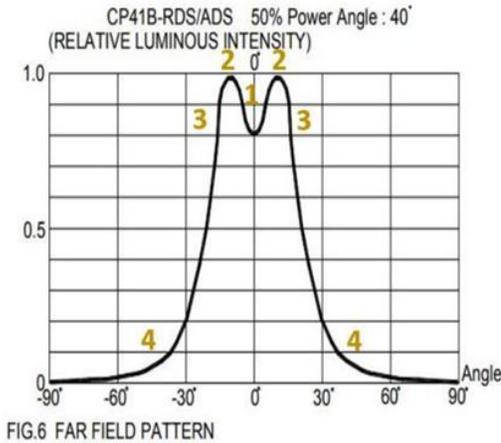


Fig. 22: Prueba vespertina y nocturna del equipo a 1.06 km sin contaminación desde el punto B de la locación.

El hecho de que existen pings que no lograron recibir respuesta (los mostrados bajo la leyenda “Timeout waiting for seq = xxxx”) es debido a la dificultad de capturar la zona de mayor potencia del haz de luz a grandes distancias, todo esto debido a la propia naturaleza de construcción del led emisor. Esto se ilustra en la **Fig. 23**, donde en (A) se muestra el gráfico de las zonas con mayor potencia (emisión de luz) del *LED* con el que fueron diseñados los Transmisores; y en (B), se puede observar físicamente el efecto de dicha distribución (con un valle en el punto central de la emisión) donde el centro se encuentra menor iluminado que el contorno que lo rodea.

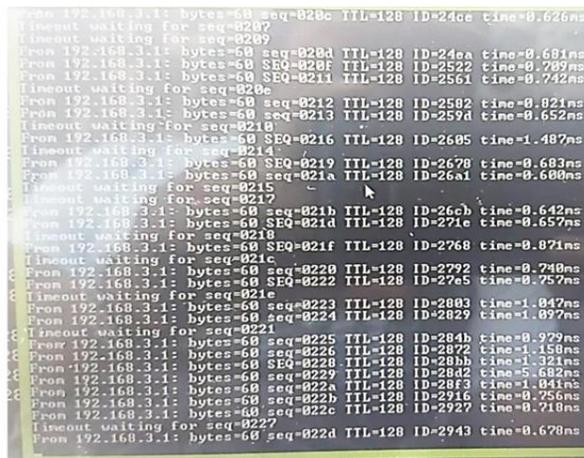


(A)

(B)

Fig. 23: (A) Gráfico de intensidad luminosa del LED rojo utilizado en los módulos de Transmisión [10]. (B) Se pueden observar los diferentes tonos de luminosidad causados por la propia naturaleza del LED: el centro mostrando una menor luminosidad que el anillo que le rodea (1), el anillo más intenso con la mayor concentración de potencia (2), puntos de similar potencia a los picos del anillo de mayor potencia (3) y el efecto aureola provocado por el residuo de energía (4).

El resultado final se puede apreciar en la Fig. 24 (B), donde se muestra una alta recepción de pings con tiempos de un promedio aproximado de 800 microsegundos para la comunicación bidireccional, con el voltaje obtenido para lograr dicho enlace.



(A)

(B)

Fig. 24: (A) Voltaje obtenido en el punto B para la recepción de pings mostrada en (B).

Compendio de soluciones en prueba a 1.06 kilómetros.

Problema	Solución
La necesidad de movimientos más precisos impedían una alineación estable.	Diseño e implementación de mecanismos basados en tensores con hilos finos (cuerda personalizada) para movimientos delicados y más precisión.
Días de contingencia ambiental y lluvias que impidieron una alineación estable con pérdida de paquetes.	Aprovechar esos días no favorables para el sistema FSO, para probar las limitaciones del equipo contra las condiciones atmosféricas.

Tabla 5: Relación de problemas-soluciones presentes en la prueba de 1060 m.

3. MEJORAS AL PROYECTO

Lo anteriormente logrado, además del valor de los resultados da pauta a mejorar el sistema *RONJA* a un sistema *FSO* que complemente a las limitaciones que el anterior tiene para que se adapte a las exigencias de hoy en día para las telecomunicaciones. En estos capítulos se mencionarán y describirán las modificaciones teóricas que podría tener el sistema *RONJA*, que ayuden a potenciar la tasa de transmisión, disminuir la latencia, aumentar la distancia de enlace y recortar el tiempo de alineado, que son las principales problemáticas encontradas en el capítulo anterior.

Uno de los principales problemas que debería resolver este nuevo sistema *FSO* y que también define la modificación de los otros dos módulos es el transmisor, ya que dependiendo de la tecnología usada para transmitir los datos cambia en modo de recibir e incluso de modular los datos. Por ello se iniciará con las propuestas de modificación para este módulo.

3.1. MEJORAS TRANSMISOR

Esta mejora tendrá varias propuestas expuestas ya que dependerá del logro que se quiera alcanzar, así como también qué tan costosa se quiere la modificación.

3.1.1. CAMBIO DE *LED*

Debería ser la propuesta más económica ya que solo conllevaría el cambio de *LED* transmisor, esto debido a que como se vio en la **Fig. 23**, este *LED* tiene la mayor intensidad luminosa en un ángulo definido cargado a los extremos más que a la parte central. Lo que provocó que a la distancia se percibieran varios puntos relativamente pequeños donde se concentraba esta intensidad, dejando un área menor donde enfocar el módulo receptor para mejor recepción; sin embargo, puede considerarse un cambio de *LED* con mayor intensidad lumínica

que conllevaría un controlador de corriente más óptimo y modificación en la tarjeta *PCB*, aumentando el costo de la modificación.

Para lograr este apartado, se debió investigar cada una de las opciones viables para este proyecto. De las principales características a observar son el aumento de potencia o flujo luminoso, la calidad del espectro emitido (un color más definido), características eléctricas adecuadas al funcionamiento de la lógica electrónica del sistema *FSO*, así como la potencia que deberá de ser consumida.

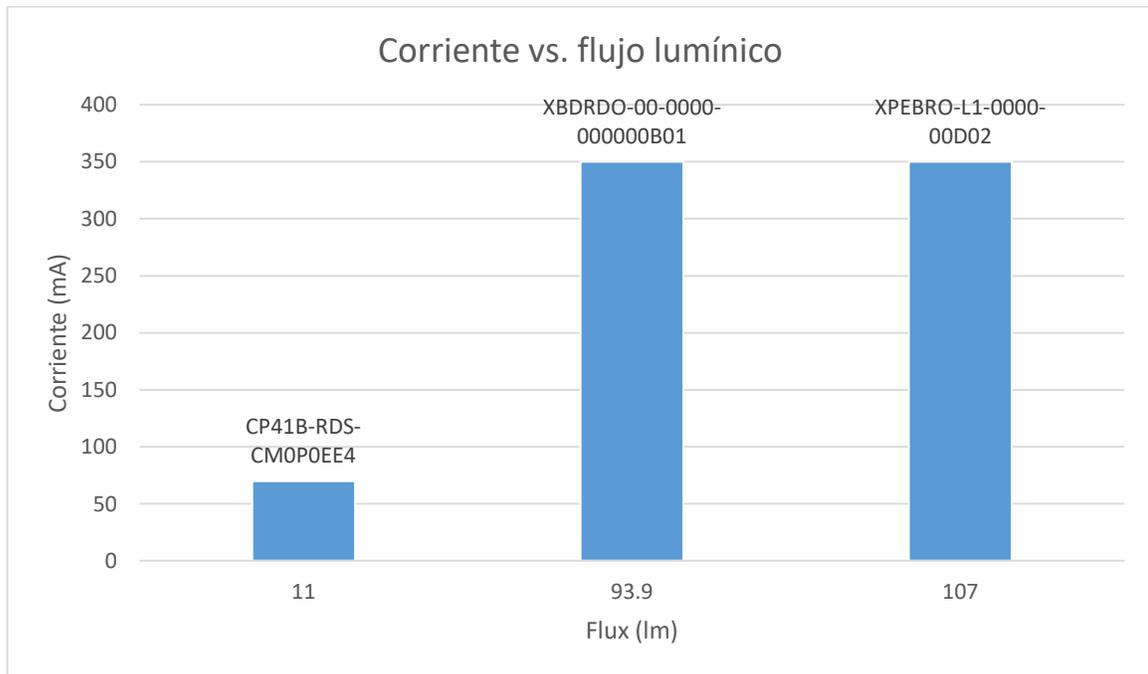


Fig. 25: Ejemplo de LED investigados, con mayor luminosidad [11].

Dentro de todas las opciones conseguidas, se hizo un conglomerado de los *LED* que podrían cumplir con los requisitos necesarios, a partir del *LED* que se usó en el prototipo. Una vez reunido este conjunto, se procedió a hacer una segunda depuración dejando los diodos con (1) mayor flujo luminoso y menor consumo de corriente, y (2) con mayor potencia y una menor corriente. Con base en lo mencionado, se seleccionaron los *LED* finales para realizar las pruebas, los cuales son mostrados en la **Tabla 6**.

LED Actual		LED 1		LED 2	
Parte	Atributos	Parte	Atributos	Parte	Atributos
CP41B-RDS-CM0P0EE4	IF: 70 mA VF: Typ 2.5 V Max 3 V PD: 210 mW λ_p : 628 nm Θ : 40° Flux: 4.4 – 11 lm	XBDRDO-00-0000-000000B01	IF: 350 mA (1 A máx) VF: Typ 2.25 V; Máx 2.6 V PD: 3000 mW λ_p : 620 nm Θ : 140° Flux: 93.9 lm	XPEBRO-L1-0000-00D02	IF: 350 mA (1 A máx) VF: Typ 2.2 V; Máx 2.6 V PD: 3500 mW λ_p : 620 nm Θ : 130° Flux: 107 lm

Tabla 6: LED transmisor actual comparado con los LED seleccionados [12], [13].



Gráfica 1: Comparativa corriente contra flujo luminoso de los LED de la **Tabla 6**.

Con base en la **Tabla 6** y la **Gráfica 1** se puede observar que los *LED* seleccionados funcionan con 5 veces mayor cantidad de corriente que el actual, generando más de 5 veces el flujo lumínico (*Flux*). Además, de que la apertura del ángulo de visualización (Θ) es mucho mayor, el cual es un factor importante al momento de la alineación. La diferencia que existe entre estos 2 *LED* está dada por su régimen de potencia con 500 mA de variación, dando al *LED* de mayor potencia una luminosidad un poco mayor y, por ende, una pérdida en disipación de calor también mayor en comparativa con el *LED* 1. Ambos *LED* son excelentes candidatos para cambiarlos por el actual.

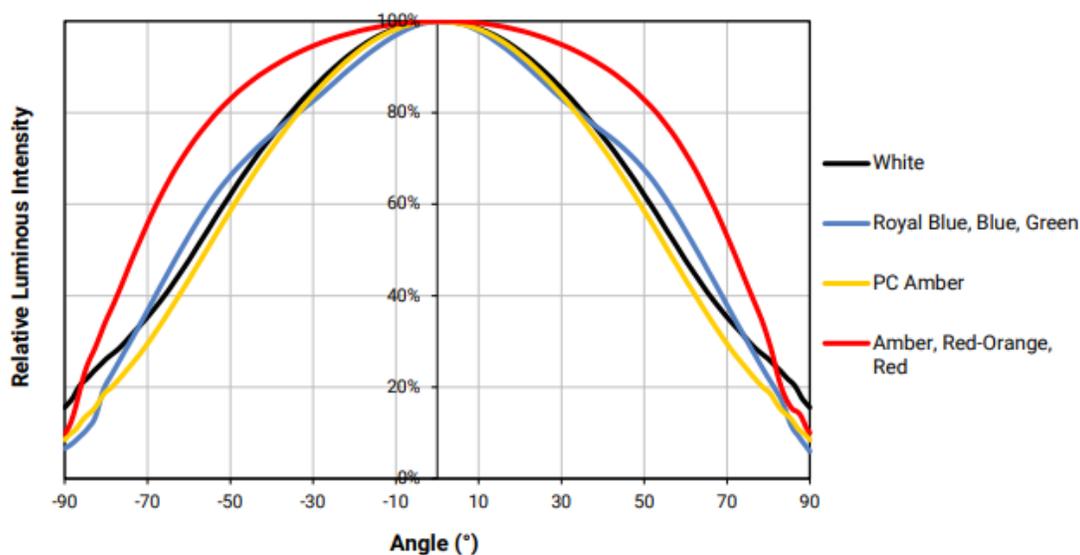


Fig. 26: Gráfico de intensidad luminosa del LED 1 de la **Tabla 6** [13].

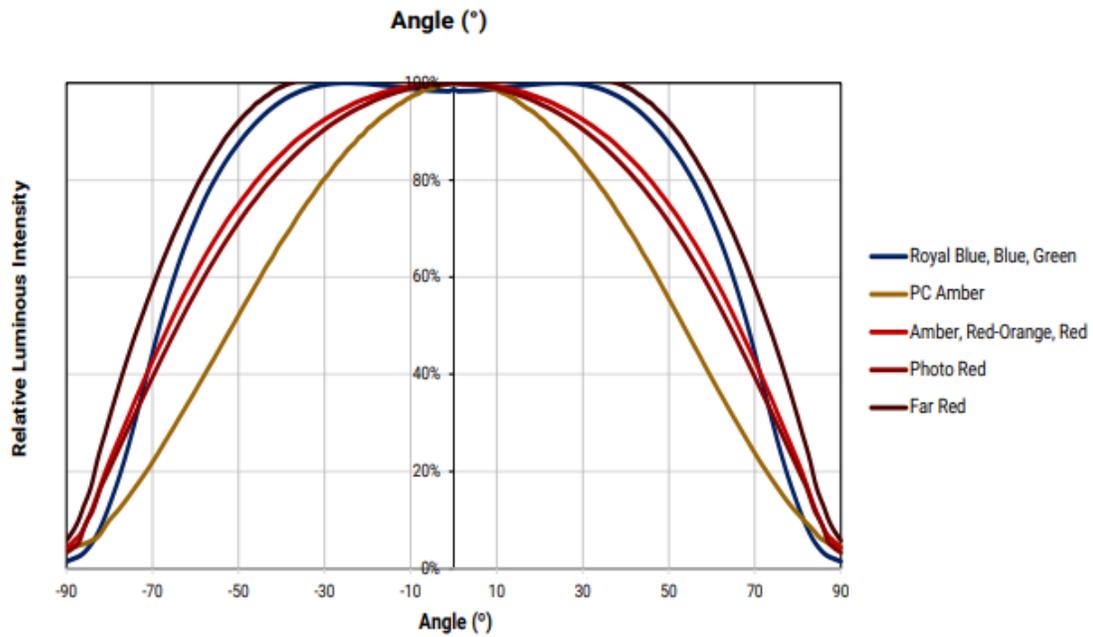


Fig. 27: Gráfico de intensidad luminosa del LED 2 de la **Tabla 6** [12].

El controlador de corriente también debe ser actualizado para entregar la potencia requerida por los nuevos *LED* seleccionados, para estos *LED* se hizo una simulación genérica con *MOSFET* para ejemplificar este controlador y comparar su comportamiento con el transmisor original.

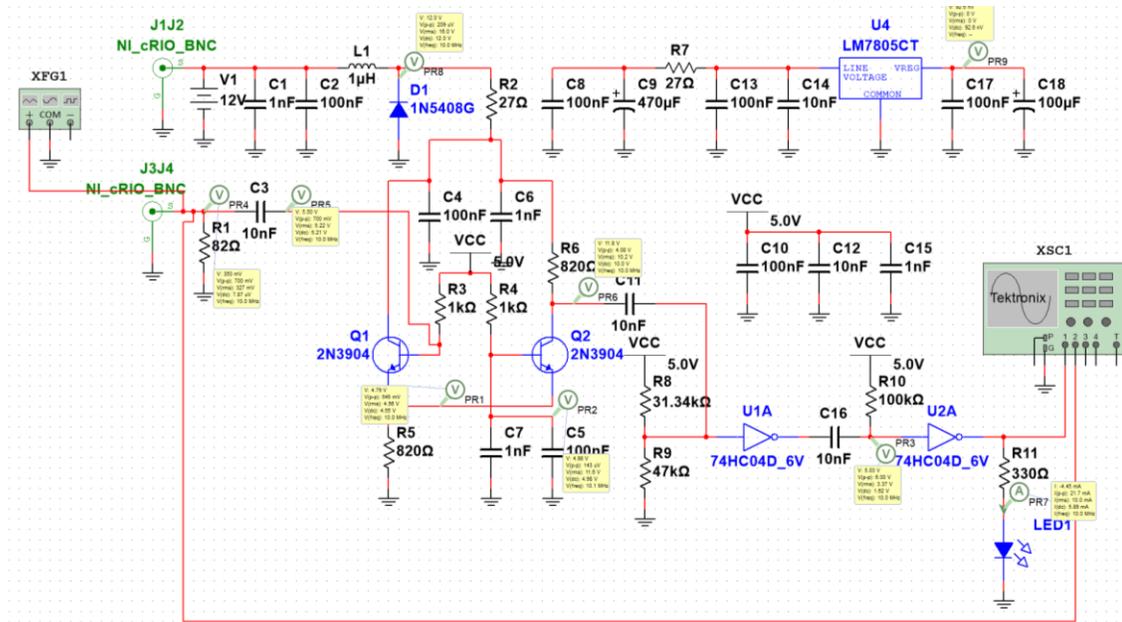


Fig. 28: Simulación del módulo transmisor RONJA en Multisim 14.0.

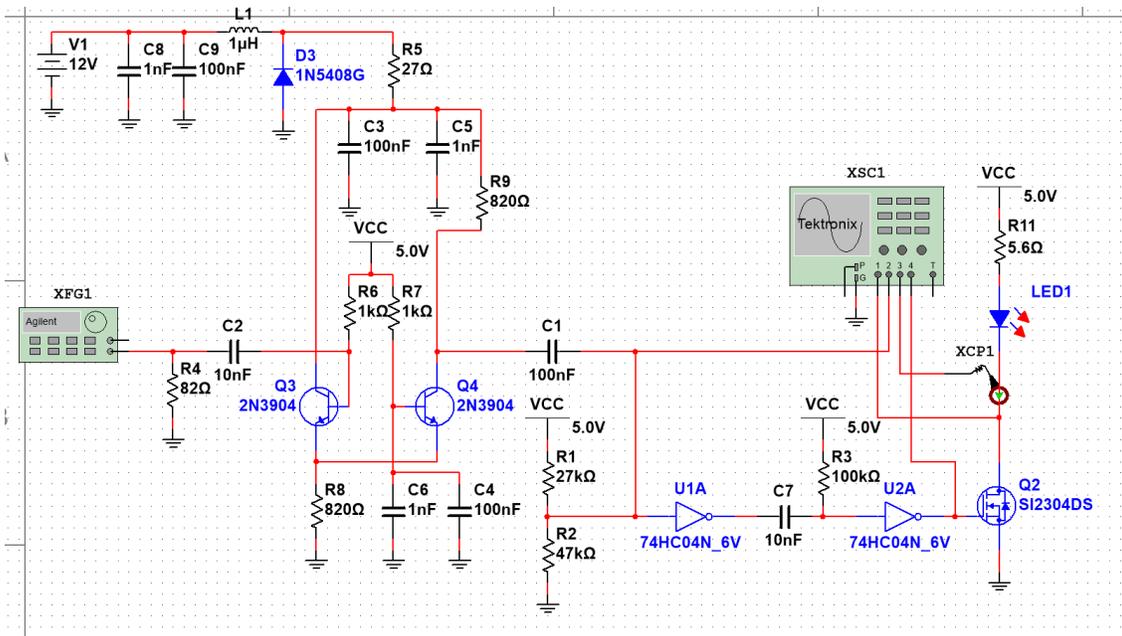
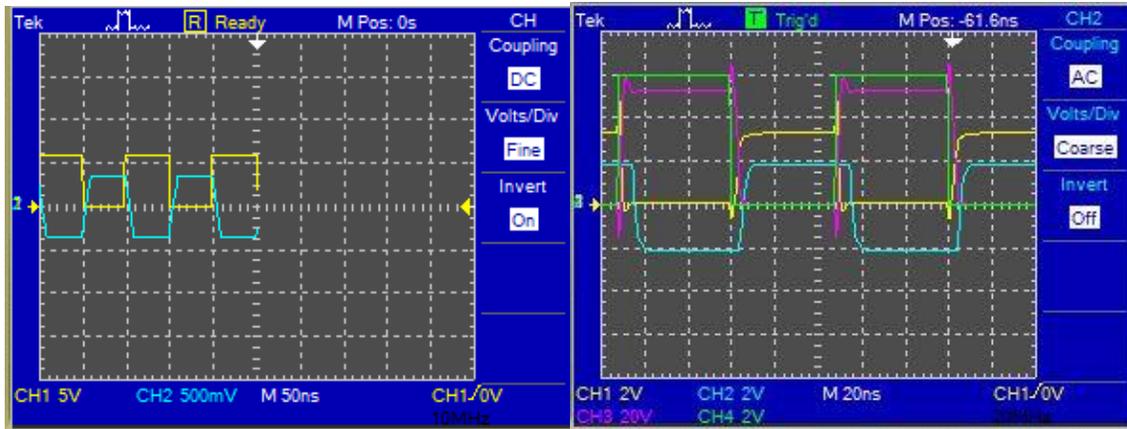


Fig. 29: Simulación del módulo transmisor con MOSFET en Multisim 14.0.



(A)

(B)

Fig. 30: Resultados de las simulaciones en Multisim. (A) Respuesta entrada (amarillo), salida (azul). (B) Respuesta entrada reflejada por el circuito limitador (azul), entrada del Gate (verde), salida (amarillo), corriente del LED (violeta).

A pesar de que el sistema funciona correctamente, se generan aberraciones en la señal de corriente problema que generalmente son comunes con circuitos que inyectan tales cantidades de corriente, esto se resolvía con ayuda de las 15 compuertas inversoras puestas en paralelo que sumaban la corriente entregada al *LED* de forma constante. El problema anterior se puede resolver de la misma forma; sin embargo, eso conllevaría a un aumento de compuertas lógicas exagerado y en la investigación no se encontraron otras compuertas que entregaran una corriente más alta, lo que llevaría al diseño de una compuerta inversora que cumpliera con estas características o la caracterización de los dispositivos conocidos como *drivers*.

3.1.2. ARREGLO DE *LED*

Esta propuesta puede llevarse a cabo sin la necesidad de involucrar el cambio del *LED* del transmisor; sin embargo, esto seguiría limitando el área de mayor intensidad dejando las áreas que se superpusieran como los puntos de mayor luminosidad generando una deformidad de varios puntos luminosos como se puede ilustrar en la siguiente figura. [1], [14].

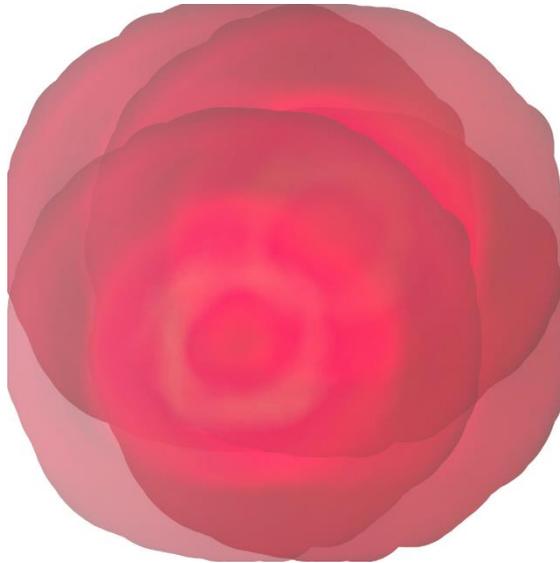


Fig. 31: Ejemplo de superposición de luz de un arreglo de 4 LED.

Aunque este arreglo de *LED* funcionaría para tener mayor redundancia y un área un poco más amplia que permitiría una mejor alineación seguiría habiendo unos puntos más luminosos que otros; sin embargo, no se verían tan afectados esos puntos gracias a la superposición de la luz pero no es lo más óptimo. Lo ideal sería cambiar el *LED* por otro que permitiera con un ángulo de luminosidad más homogéneo evitar esta distorsión y tener una mejor distribución.

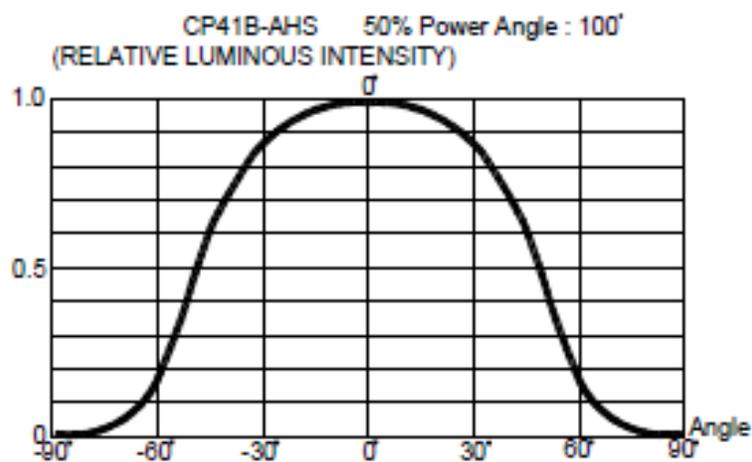


Fig. 32: Muestra de distribución luminosa de LED con las mismas características eléctricas que el original RONJA, solo que en color ámbar a 590 nm [10].

Al igual que la mejora anterior conlleva una modificación en agregar 15 compuertas inversoras por cada *LED* agregado en el arreglo, teniendo que modificar el *PCB* y la caja metálica para las interferencias *EM*. Obteniendo más potencia en la transmisión habría un mayor alcance en la distancia, si se considera este punto podría haber aun mayor alcance combinando el arreglo con los *LED* de mayor potencia de la mejora anterior.

En la investigación se encontró un *LED Driver* con 16 canales de salida y una capacidad de manejo de disparador de corriente constante de 0 a 80 mA compatible con el *LED* actual del proyecto *RONJA* con tecnología *CMOS*, una velocidad de conmutación en la salida de 10 ns y una máxima transferencia de datos de 30 MHz (TCL5922, *Texas Instruments*) [15]. Totalmente compatible para hacer un arreglo con un máximo de 16 *LED* con las características originales del proyecto o cambiando los *LED* con una luminosidad más uniforme como el de la **Fig. 32** que cuenta con las mismas características de energía.

3.1.3. CAMBIO DE TECNOLOGÍA

La tecnología *LED* tiene la ventaja de ser de bajo costo, tener una larga vida útil y que su umbral de corriente sea independiente de la temperatura; sin embargo, tiene una conmutación baja permitiendo tasas de transmisión desde 1 Mbps hasta 300 Mbps [16], [17]. Hoy en día las telecomunicaciones llegan a tener tasas de transmisión por encima de 1 Gbps, por lo tanto la tecnología *LED* no nos sirve para cumplir esta exigencia. Siendo así en este apartado describiremos algunas tecnologías que pudiesen suplantar al *LED* como transmisor.

El primer aumento considerable en la tasa de transmisión lo vemos en la tecnología conocida como Diodos Emisores de Luz de Cavidad Resonante (*RCLED* por sus siglas en inglés, *Resonant-Cavity Light-Emitting Diodes*) al igual que los *LED*, tienen una gran durabilidad y umbral de corriente independiente de la temperatura, y a diferencia de los *LED* convencionales tienen una luz dirigida que fácilmente puede ser acoplada a una fibra óptica; sin embargo, a pesar de

que tiene una tasa de transmisión más alta que el *LED* solo llega hasta una tasa de 500 Mbps[1], [16], [18]–[20].

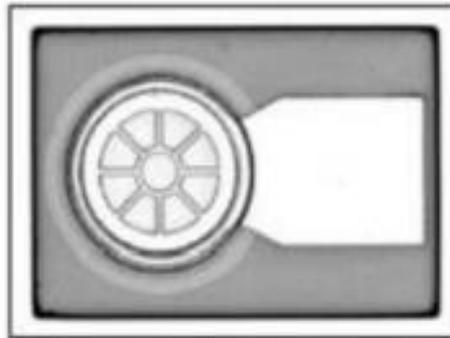


Fig. 33: Ilustración de un LED de cavidad resonante [20].

Dado a que los *RCLED* tienen una luz dirigida, recuerdan al principio de funcionamiento del Diodo Láser o Láser Emisor de Cavidad Resonante (*VCSEL* por sus siglas en inglés, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*) [1], [16], [21], [22], [23]. El Láser cuenta con velocidades de transmisión adecuadas para las tasas de transmisión que se están buscando, por ello empresas como *AOptix*, *LightPointe*, *Hamamatsu* entre otras usaban la tecnología Láser en sus sistemas *FSO* comerciales. Se dice usaban, ya que las primeras dos empresas mencionadas hoy en día se encuentran cerradas permanentemente y *Hamamatsu* a pesar de seguir existiendo como una de las empresas más reconocidas de fotónica, no comercializa su sistema *FSO*.

3.1.3.1. *AOptix*

AOptix era una empresa que ofrecía su sistema *Intellimax@ULL3000* como el único producto de comunicaciones inalámbricas que ofrece ultra baja latencia, este contaba con tecnología híbrida de *FSO* y onda milimétrica para redundancia de flujo de datos, usando para la parte óptica un Láser con longitud de onda de 1550 nm y para la parte de onda milimétrica usaba las bandas de 71-76 GHz y 81-86 GHz, con una tasa de transmisión de 2 Gbps (llegando a ser escalado a 10

Gbps) y con un alcance de hasta 8 km de distancia y auto alineación. Unas de las tecnologías usadas por *AOptix* era la tecnología de óptica adaptativa de curvatura; sin embargo no queda claro si el sistema *Intellimax®ULL3000* contaba con esta tecnología incluida [24]–[26].



Fig. 34: Sistema FSO de AOptix Intellimax® ULL3000, sistema híbrido con tecnología de onda milimétrica [26].

3.1.3.2. LightPointe

LightPointe también ofrecía sistemas *FSO* uno de ellos era el sistema *Aire X-Stream™ Series Free Space Optics* puente inalámbrico punto a punto de ultra baja latencia, este contaba con un arreglo de 4 transmisores *VCSEL* a 850 nm y 4 receptores *APD* (fotodiodo de avalancha) para mayor redundancia, con una tasa de transmisión de 1250 Mbps con un alcance de hasta 2800 m [27]–[29].

Otro sistema que ofrecía esta empresa era el *AireBridge™ SX*, el cual contaba con un transmisor *VCSEL* a 850 nm y un receptor *APD*, con tasas de transmisión de 250 Mbps, 500 Mbps y 1000 Mbps dependiendo de la configuración y un alcance de hasta 1100 m [30], [31].



(A)



(B)

Fig. 35: Sistema LightPointe Aire X-Stream™ Series Free Space Optics (A). Sistema AireBridge™ SX (B) [27], [30].

3.1.3.3. Hamamatsu

“Hamamatsu photon is our business” [32] Es una empresa japonesa reconocida por ser una de las más relevante en el campo de la fotónica, esta empresa colaboro o diseño un sistema llamado *Photoliner™*, no se sabe si este sistema FSO estuvo a la venta o fue diseñado para temas de estudio, dada la poca información que hay disponible. Se sabe que contaba con dos transmisores Láser uno a 1550 nm para transmitir datos y otro de 980 nm utilizado como baliza para fines de seguimiento, contaba con óptica adaptativa haciendo uso de un dispositivo de carga acoplada (CCD) que recibía la señal de 980nm y un detector de cuadrante (QD) que procesaban el movimiento fino de la antena óptica, para que el láser de 1550 nm llegara al acople directo con la fibra óptica por el espejo de punto fino (FPM) [9], [33].

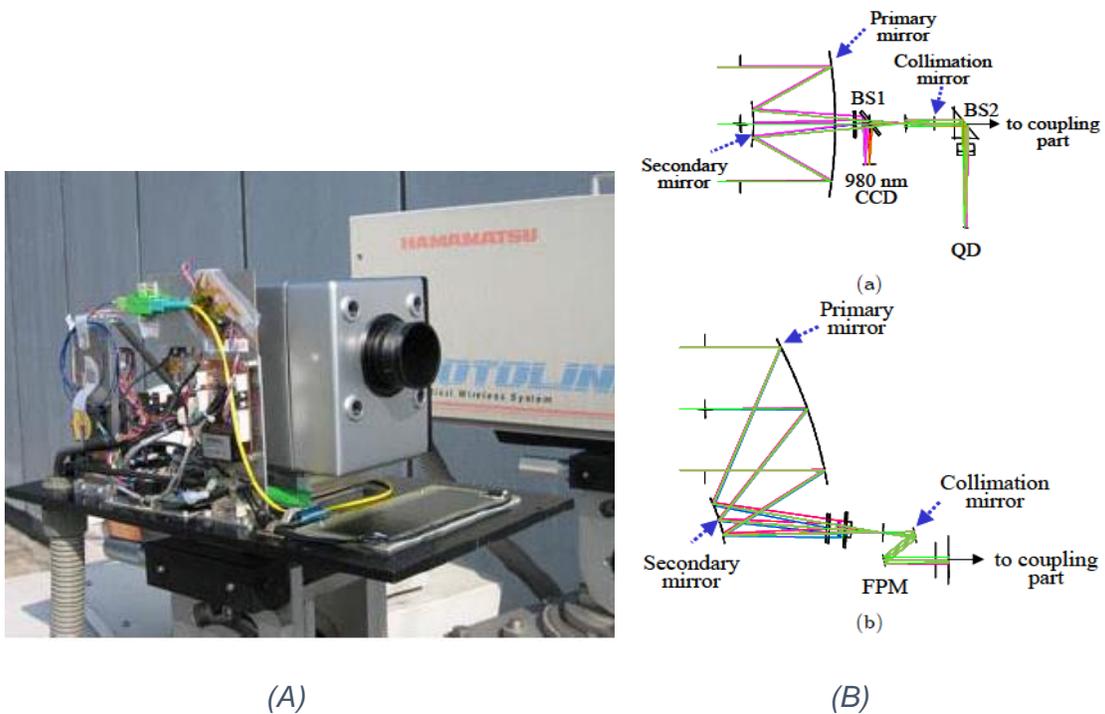
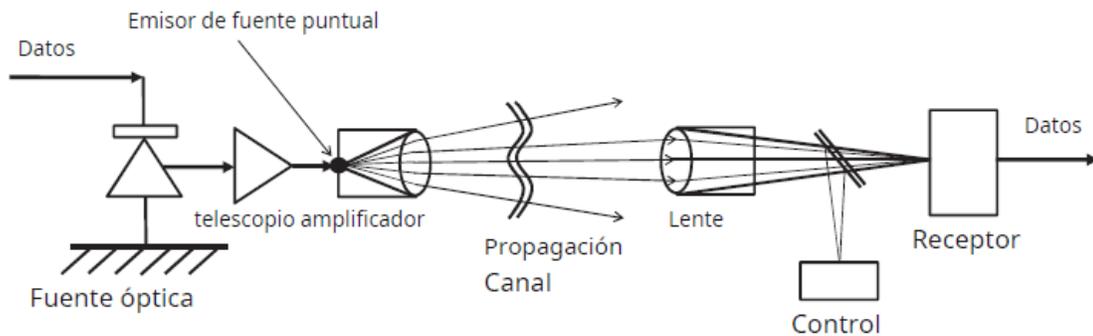


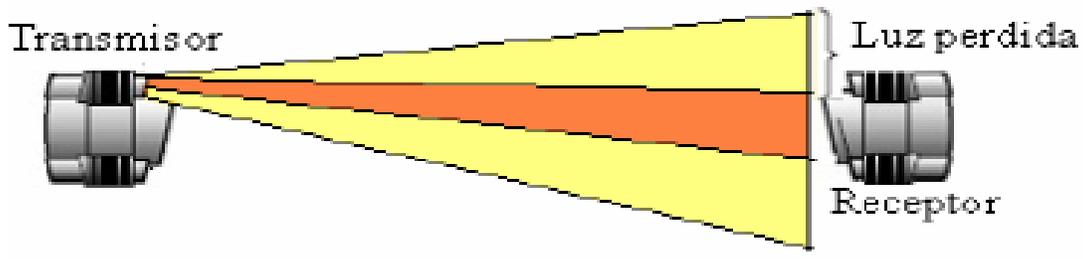
Fig. 36: Sistema FSO Hamamatsu Photoliner™ (A). Óptica adaptativa del sistema (B) [9].

Estas empresas usaron tecnología Láser en infrarrojo, esto tiene varios puntos importantes que considerar. Primer punto importante del porque se usó este tipo de tecnología es debido a las pérdidas ópticas a causa de la divergencia del haz de luz, la naturaleza del *LED* es emitir luz espontanea con un flujo luminoso mostrados en la **Fig. 23**, **Fig. 26**, **Fig. 27** y **Fig. 32** que al expandirse a la distancia diverge más, las lupas o mejor conocidas como lentes convergentes, concentran la divergencia del *LED* para dirigirla lo más posible como si de un Láser se tratase; sin embargo, no toda la luz es redirigida en su totalidad, haciendo que este nuevo haz de luz también tenga divergencia a la distancia. Para el *LED* entre más grande el lente mayor visibilidad, facilidad para alineación y mayor alcance como si de una antena se tratase, el tamaño es directamente proporcional a la ganancia de transmisión y de recepción, ya que entre más grande el lente ayuda a concentrar mayor cantidad de luz en un haz dirigido y mayor luz recibida en el receptor.

El Láser por naturaleza emite luz estimulada dirigida; sin embargo, no es completamente puntual y se ensancha durante su propagación, pero a mucha menor medida que un *LED* siendo teóricamente la propagación lineal del rayo muy precisa, aumentando en gran medida la distancia que se puede recorrer con esta tecnología [34]. Sirviendo de ejemplo para esto, está el experimento de medición lunar con Láser de rubí con ayuda del *Laser Ranging Retro-Reflector (LRRR)* [35].



(A)



(B)

Fig. 37: (A) Propagación y divergencia del haz de luz [36]. (B) Luz transmitida y pérdidas en la recepción [34].

Aunado a esto, otro punto importante es la selección adecuada de la longitud de onda para el enlace *FSO* con Láser debido a que en esta tecnología hay que tener en cuenta la seguridad ocular ya que es una de las restricciones más importantes a nivel potencia de la señal y absorción del ojo humano. Para esto se investigó la respuesta de absorción de luz en ojo humano según la longitud de

onda, donde se encontró que los Láser que emiten radiación a una longitud de onda de 1550 nm o alrededor de 10000 nm se pueden usar de manera más segura que aquellos con 850 nm y 780 nm. Esto se debe a que el fluido vítreo es transparente de los 400 nm a los 1400 nm y los infrarrojos superiores a longitudes de onda de 1400 nm son absorbidas por las partes transparentes del ojo humano, haciendo que no se propague por el fluido vítreo y la energía no se transfiere a la retina [21], [34], [36], [37].

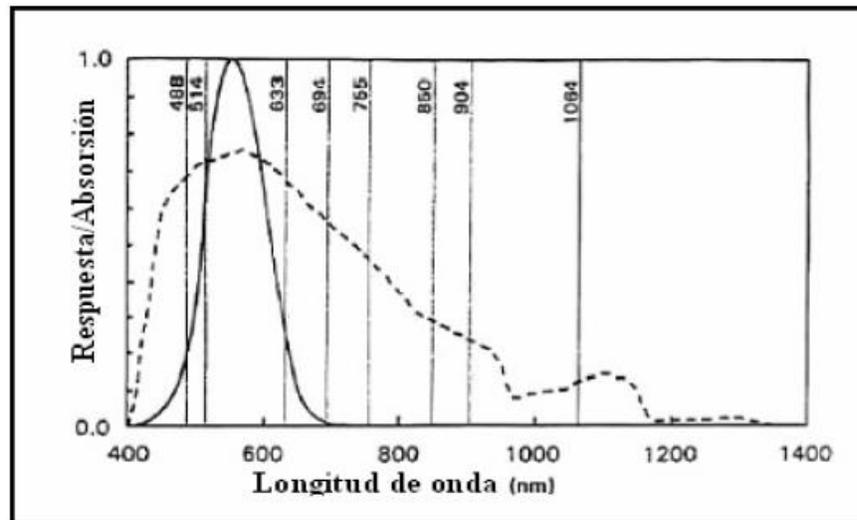


Fig. 38: Absorción de luz por el ojo humano. Siendo la línea continua el espectro de luz visible y la línea punteada la respuesta u absorción a tal longitud de onda [34].

Debido a esta característica de los Láser infrarrojos, el sistema *FSO* de *AOptix* tiene mayor alcance que los sistemas *FSO* de *LightPointe*, ya que pueden transmitir potencias más altas alrededor de 50 veces mayor que los sistemas con longitudes de onda más cortos. Siendo que las longitudes de onda más lejanas al espectro visible dentro del infrarrojo son las más seguras para el ojo humano, estas longitudes podrían ser las más usadas para los sistemas *FSO*. Existen recientemente los Láser de Cascada Cuántica (*QCL*) que operan en la longitud de 10 μm , son Láser compactos de alta potencia con características de frecuencia de hasta 100 GHz de ancho de banda, una tecnología sustancialmente atractiva dado las altas tasas de transmisión que se pueden

lograr; sin embargo, no son todos los puntos importantes a considerar en la elección de la longitud de onda a utilizar, las ondas infrarrojas también se ven afectadas por la absorción atmosférica que atenúan la señal transmitida [21], [38].

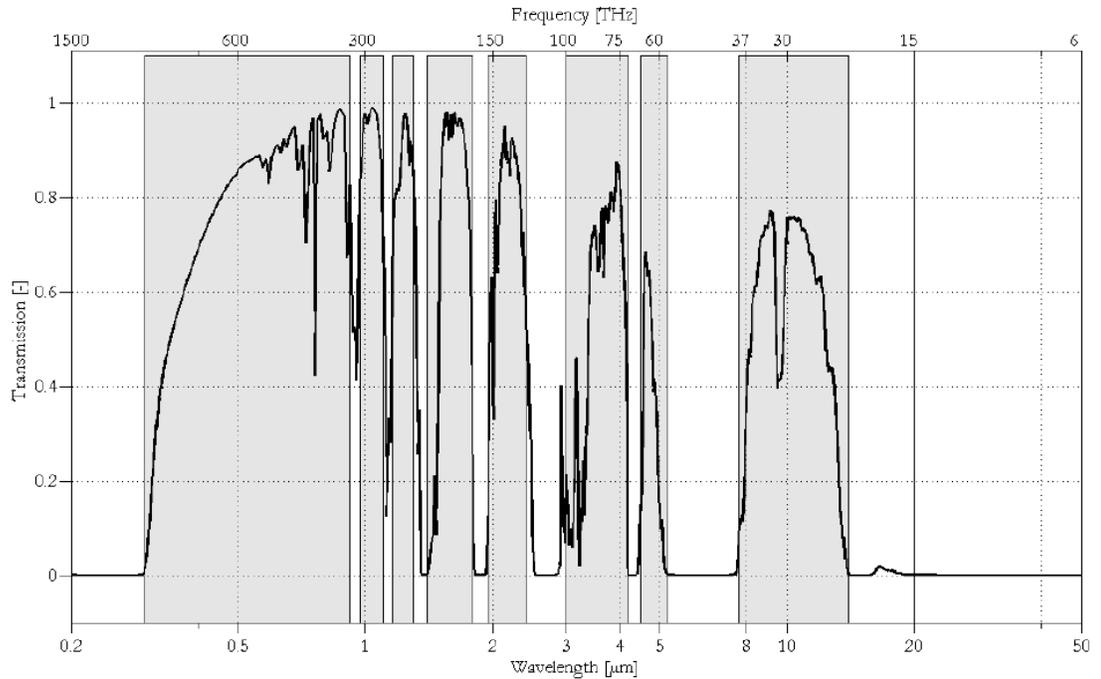


Fig. 39: Transmisión atmosférica de 0 km a 120 km de altitud. Las ventanas de transmisión atmosférica están resaltadas en color gris [37].

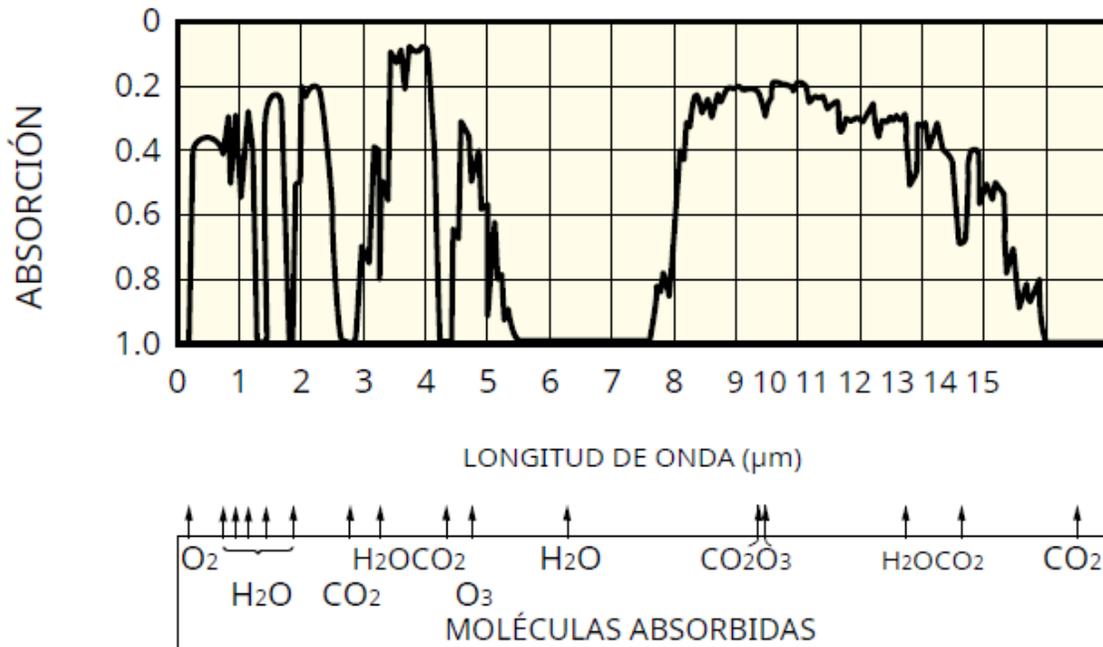


Fig. 40: Absorción atmosférica en la superficie del mar [39].

Como se ve en la **Fig. 39**, las longitudes de onda de 10 μm tienen menor transmisión que las longitudes de 1550 nm y 850 nm en alturas mayores al nivel del mar, con respecto a la comparativa con la **Fig. 40**; Por lo tanto, los QCL aunque pueden transmitir datos con una tasa más alta solo lo pueden hacer a distancias más reducidas. Los Láser a 850 nm tienen una transmisión casi igual que los Láser a 1550 nm; sin embargo esta longitud de onda es absorbida por el ojo humano por lo que se envía con potencias reducidas que a su vez reducen el alcance. Dejando a los Láser de 1550 nm como la tecnología con mayor alcance, siendo también una buena opción la longitud de onda entre los 3 μm a los 4 μm para transmisiones a nivel del mar; sin embargo, en la investigación no se encontraron Láser que emitan en estas longitudes de onda.

Alternativamente, mediante la tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (*WDM* por sus siglas en inglés, *Wavelength Division Multiplexing*) podría aumentarse la capacidad del ancho de banda, para cualquier Láser seleccionado [9], [34], [40].

3.2. MEJORAS RECEPTOR

Las mejoras en el módulo receptor aunque son dependientes de la mejora seleccionada en el módulo transmisor, también pueden tener mejoras independientes que ayuden en la alineación.

3.2.1. CAMBIO DE FOTOSENSOR

Teniendo en cuenta que solo se quiere hacer una modificación sencilla que no aumente mucho el costo, se puede actualizar el fotodiodo PIN por uno con mayor sensibilidad espectral a 620 nm, de las opciones conseguidas se decidió como candidato la siguiente opción:

Fotodiodo actual		Fotodiodo candidato	
Parte	Características	Parte	Características
BPV10	VR: Typ 5 V Max 60 V λ : 380 - 1100 nm λ_p : 920 nm $S(\lambda)$ @ 620nm: 0.3 – 0.33 A/W TR: 2.5 ns	PS1.0-6B- TO52S1.3	VR: Typ 5 V Max 30 V λ : 350 - 1100 nm λ_p : 920 nm $S(\lambda)$ @ 620nm: 0.4 – 0.44 A/W TR: 10 ns

Tabla 7: Comparativa del fotodiodo actual con el seleccionado [41], [42].

Con base a la **Tabla 7** se observa que sus características son muy similares; la diferencia se encuentra en la sensibilidad espectral relativa ($S(\lambda)$) a la longitud de onda del *LED* transmisor, en el cual el fotodiodo candidato tiene mayor a sensibilidad a 620 nm, pero sacrificando un poco de velocidad respuesta.

3.2.2. CAMBIO DE TECNOLOGÍA

Para una mejor respuesta y sensibilidad en la recepción se propone un cambio en la tecnología, como se vio con las empresas antes mencionadas estas usaban

fotodiodos de avalancha (*APD*) son fotodiodos que se caracterizan por su alta velocidad y alta sensibilidad que multiplica internamente la fotocorriente cuando se aplica voltaje inverso, esta característica reduce el efecto del ruido y se logra una relación señal-ruido (*S/N*) más alta que el fotodiodo *PIN*, además de una excelente linealidad.

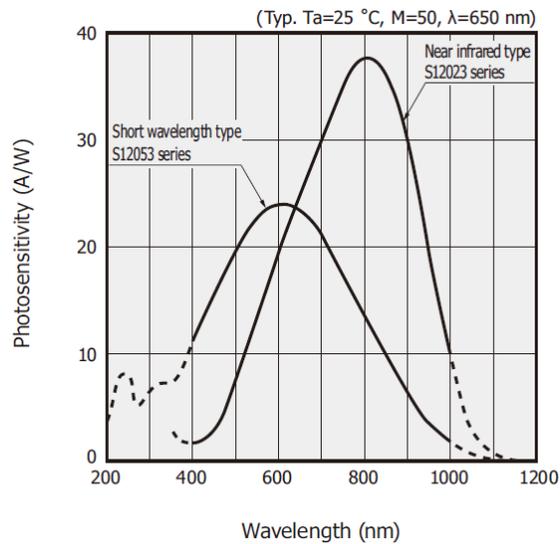


Fig. 41: Respuesta espectral APD Hamamatsu. Con picos en luz visible 600 nm e infrarrojo cercano con pico en 800 nm [43].

Con ayuda de un programa de simulación llamado *OptiSystem* se pueden simular sistemas *FSO* colocando las características eléctricas del transmisor y receptor, así como del medio con distancia y atenuación. Usando este programa se corroboró el funcionamiento del *ADP* con respecto al *PIN* usando un Láser en 1550 nm en diferentes distancias y atenuaciones, con referencia a un cambio de tecnología tanto en transmisor como receptor [34].

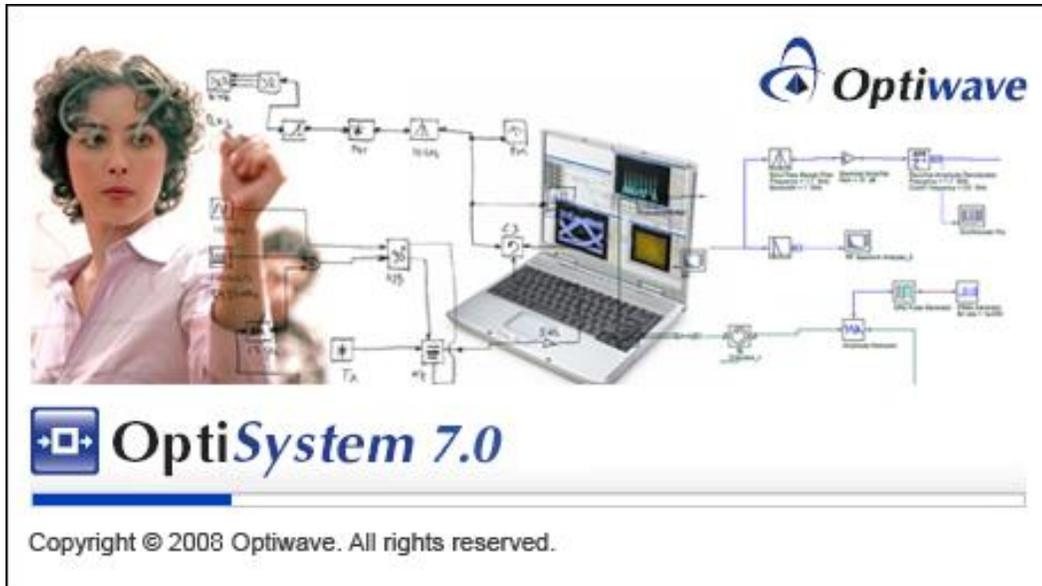


Fig. 42: Programa de simulación para sistemas ópticos.

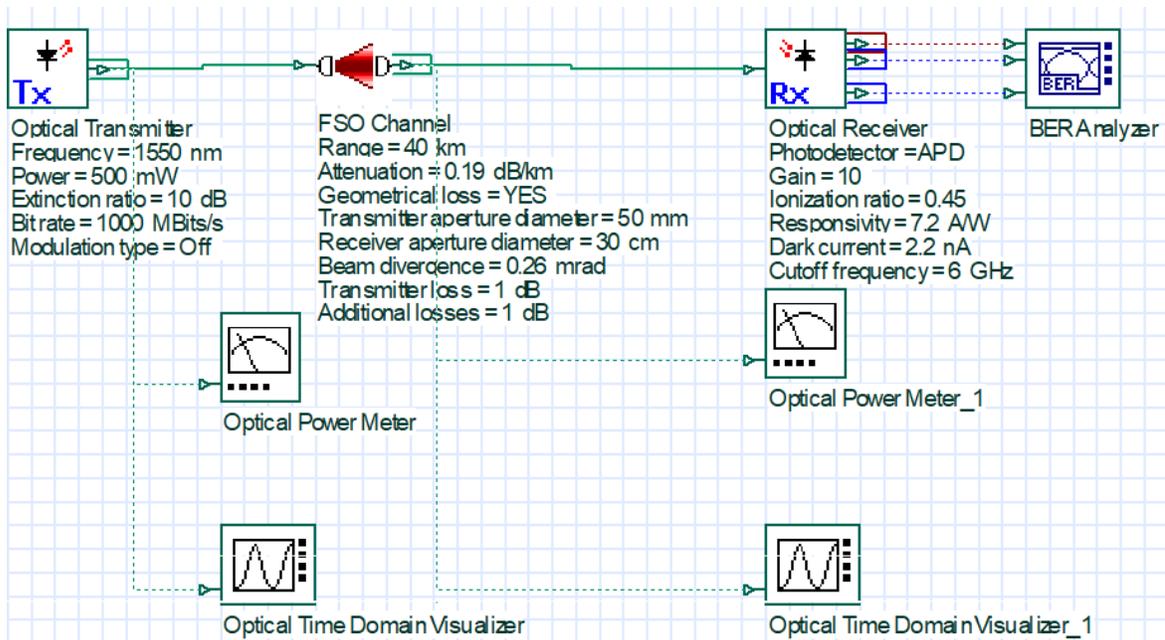


Fig. 43: Ilustración de los componentes de la simulación necesarios para su funcionamiento.

Dispositivo	Marca y Características	2 km A 15 dB/km	7 km A 3 dB/km	40 km A 0.19 dB/km
Láser teórico	Calculado en específico para alcanzar 2 km con 15 dB/km de atenuación.			
InGaAs APD Hamamatsu G8931-04	Photosensitive area 0.04 mm ² Peak Wavelength: 1550 nm Photosensitivity Typ.: 0.9 A/W Dark current: 40 nA Cutoff freq: 4 GHz Gain: 30			
InGaAs PIN Hamamatsu G9801	Photosensitive area 2.54 mm ² Peak Wavelength: 1550 nm Photosensitivity Typ.: 0.95 A/W Dark current: 0.02 nA Cutoff freq: 2 GHz			

Tabla 8: Simulación FSO con Láser teórico en OptiSystem [44], [45].

Dispositivo	Marca y Características	2 km A 15 dB/km	7 km A 3 dB/km	40 km A 0.19 dB/km
Láser SemiNEx TO9-161	Output Power (CW): 330 mW Wavelength: 1550 nm			
InGaAs APD Hamamatsu G8931-04	Photosensitive area 0.04 mm ² Peak Wavelength: 1550 nm Photosensitivity Typ.: 0.9 A/W Dark current: 40 nA Cutoff freq: 4 GHz Gain: 30			
InGaAs PIN Hamamatsu G9801	Photosensitive area 2.54 mm ² Peak Wavelength: 1550 nm Photosensitivity Typ.: 0.95 A/W Dark current: 0.02 nA Cutoff freq: 2 GHz			

Tabla 9: Simulación FSO con Láser SemiNEX en OptiSystem [44]–[46].

Dispositivo	Marca y Características	2 km A 15 dB/km	7 km A 3 dB/km	40 km A 0.19 dB/km
Láser FB-M1550-500TO3	Fibercom Ltd. Output Power (CW): 500 mW Wavelength: 1550 nm			
InGaAs APD Hamamatsu G8931-04	Photosensitive area 0.04 mm ² Peak Wavelength: 1550 nm Photosensitivity Typ.: 0.9 A/W Dark current: 40 nA Cutoff freq: 4 GHz Gain: 30			
InGaAs PIN Hamamatsu G9801	Photosensitive area 2.54 mm ² Peak Wavelength: 1550 nm Photosensitivity Typ.: 0.95 A/W Dark current: 0.02 nA Cutoff freq: 2 GHz			

Tabla 10: Simulación FSO con Láser Fibercom en OptiSystem [44]–[47].

Como se puede apreciar con las tres simulaciones el *APD* tiene mejor respuesta que el *PIN*, teniendo una respuesta más uniforme en la salida del *Bit Error Rate (BER)* en todas las distancias y atenuaciones establecidas en la simulación, siendo más evidente en la primera simulación con un Láser teórico la deficiencia del *PIN* para responder a las distancias y atenuaciones asignadas. Estas simulaciones nos dan un buen acercamiento al comportamiento que tendrían estos dispositivos físicamente.

3.2.3. CAMBIO DE LENTES

Uno de los primeros inconvenientes a resolver en esta mejora es la aberración esférica presente en la zona de recepción, que es una característica común en las lentes de lupa comerciales de bajo costo debido a su fabricación con superficies esféricas. Esta aberración es la disparidad de que los haces de luz no sean concentrados por la lente en un único punto (foco), sino que se genera una zona de incongruencia, donde algunos de estos haces no caen sobre el foco óptimo, dispersando la energía a poder captar y dificultando el encontrar el punto de señal máxima. Este punto es importante ya que no solo la forma sino también las dimensiones y material de la misma causan una reducción a la potencia lumínica enviada/recibida y así mismo en la alineación de los equipos [14], [34].

Se realizó una investigación del conjunto de software que estaban enfocados al ramo óptico (como *Oslo* o *Zemax*) los cuales están enfocados al diseño de lentes por ello fueron descartados ya que se necesitaría un conocimiento más concreto de óptica para poder utilizarlos y crear una lente totalmente personalizada para el propósito. Utilizando otro software llamado *OpTaliX®*, se logró hacer una simulación aproximada del comportamiento de los haces de luz en lentes esféricas; sin embargo se necesitó hacer una investigación sobre lentes comerciales que permitieran solucionar este problema.

Fig. 44: Programas software de diseño óptico.

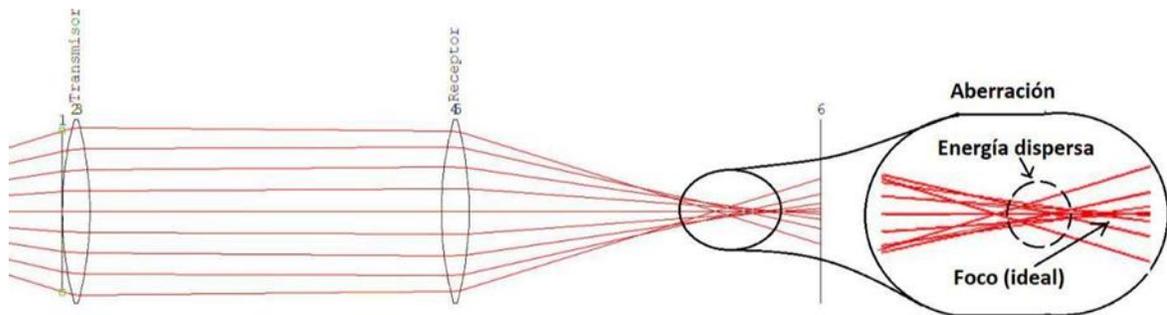


Fig. 45: Simulación en OpTaliX® de la dispersión de luz debido a las lentes esféricas.

Se encontró en la investigación que la incorporación de lentes esféricas corrige el inconveniente antes mencionado y permite tener una mayor captación de energía lumínica, una menor pérdida de información y una mejor alineación entre transmisor y receptor. Como primer paso al mejoramiento del sistema óptico, se encuentran en el mercado algunas opciones de lupas esféricas que permiten ser incorporadas al modelo sin tener que llegar al diseño de una lente óptica específica, este tipo de lentes se caracterizan por tener una forma similar a una porción de esfera, aunque no sea estrictamente esférica. Este tipo de lentes se encuentran incorporadas en el campo de la optometría y en algunos lentes de realidad virtual [16].

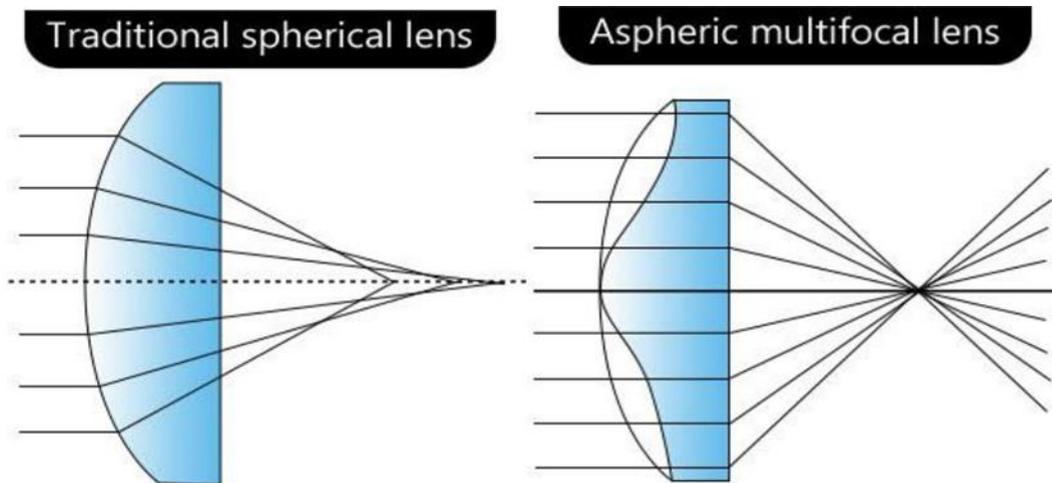


Fig. 46: Lentes esféricas contra lentes asféricas.

3.2.4. ÓPTICA ADAPTATIVA

Como se vio con la empresa *Hamamatsu* esta tecnología permite hacer una alineación más precisa del receptor; esto siempre y cuando, el receptor esté en línea de vista directa con el transmisor, haciendo una mejor concentración y orientación de los haces de luz para que incidan en el caso de *Hamamatsu* directamente a un acople con fibra óptica, en el caso de *RONJA* en el sensor fotosensible que puede ser *PIN* o *APD* si se agrega esta mejora al sistema *FSO*; sin embargo, al igual que *Hamamatsu*, *AOptix* también usa un acople directo con fibra óptica, por lo que este sistema también puede ser aplicado al *FSO* mejorado de *RONJA* [9], [48]–[50]. Claramente esta tecnología no es barata, ya que este tipo de sistemas tienen sistemas micro-electro-mecánicos (*MEMS*, por sus siglas en inglés *Micro-Electro-Mechanical System*) para mover los espejos de manera precisa; los llamados espejos deformables o *MEMS mirrors*, también se necesitarían sensores como son el *CCD* y *QD* o sensor de frente de onda, además de un sistema de control que maneje la información recibida por los sensores.

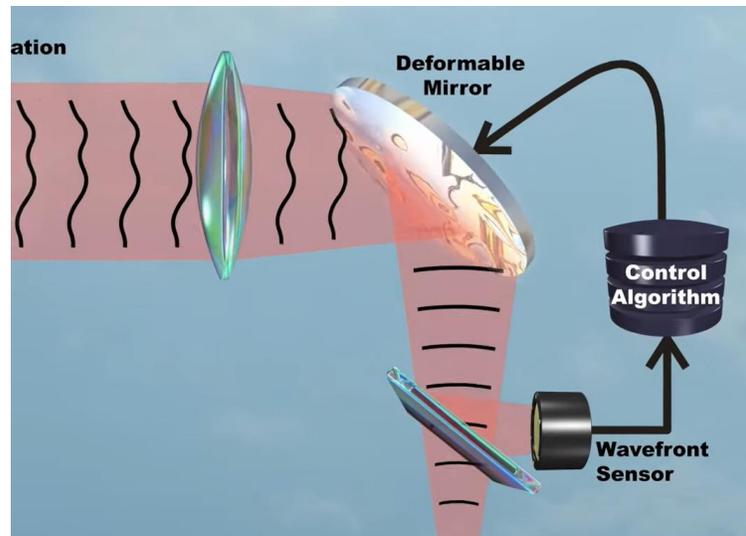


Fig. 47: Sistema de óptica adaptativa de AOptix [51].

3.2.5. FILTRO DE ESPECTRO

Adicionalmente con o sin óptica adaptativa se puede agregar un filtro de espectro en las cabezas ópticas, estos filtros son cristales que están diseñados de manera especial con diferentes materiales que permiten pasar ciertas longitudes de onda a través de ellos, esto ayudaría a filtrar toda longitud de onda no deseada en el sistema que pueda provocar falsos positivos, falsos negativos o fallos en la respuesta del foto-sensor debido a la sensibilidad con otras longitudes de onda.



Fig. 48: Filtro de espectro IR.

3.3. MEJORAS INTERFACE

La interface Twister recibe los datos desde una *PC* por medio de *cable Ethernet* en 10base-T, con una tasa de transmisión de 10 Mbps, utilizando la codificación Manchester y colocando una señal de 1 MHz como protección en caso de no enviar datos (Protección para evitar interferencias provocadas por la luz solar) [52]. Luego de procesar los datos estos son enviados al transmisor para luego llegar al receptor con una modulación *On-Off Keying (OOK)*. La señal es amplificada y enviada de regreso a la interface que detecta los datos y los envía a la *PC*. Este es el comportamiento típico del módulo twister, la limitación está en que sus componentes están seleccionados para funcionar con Ethernet 10base-T a una tasa de transmisión de 10 Mbps. Para una modificación sencilla de los módulos TX y RX, esta tecnología sería suficiente para seguir funcionando como interface; sin embargo, sí el objetivo es aumentar la tasa de transmisión esta interface es insuficiente para lograrlo.

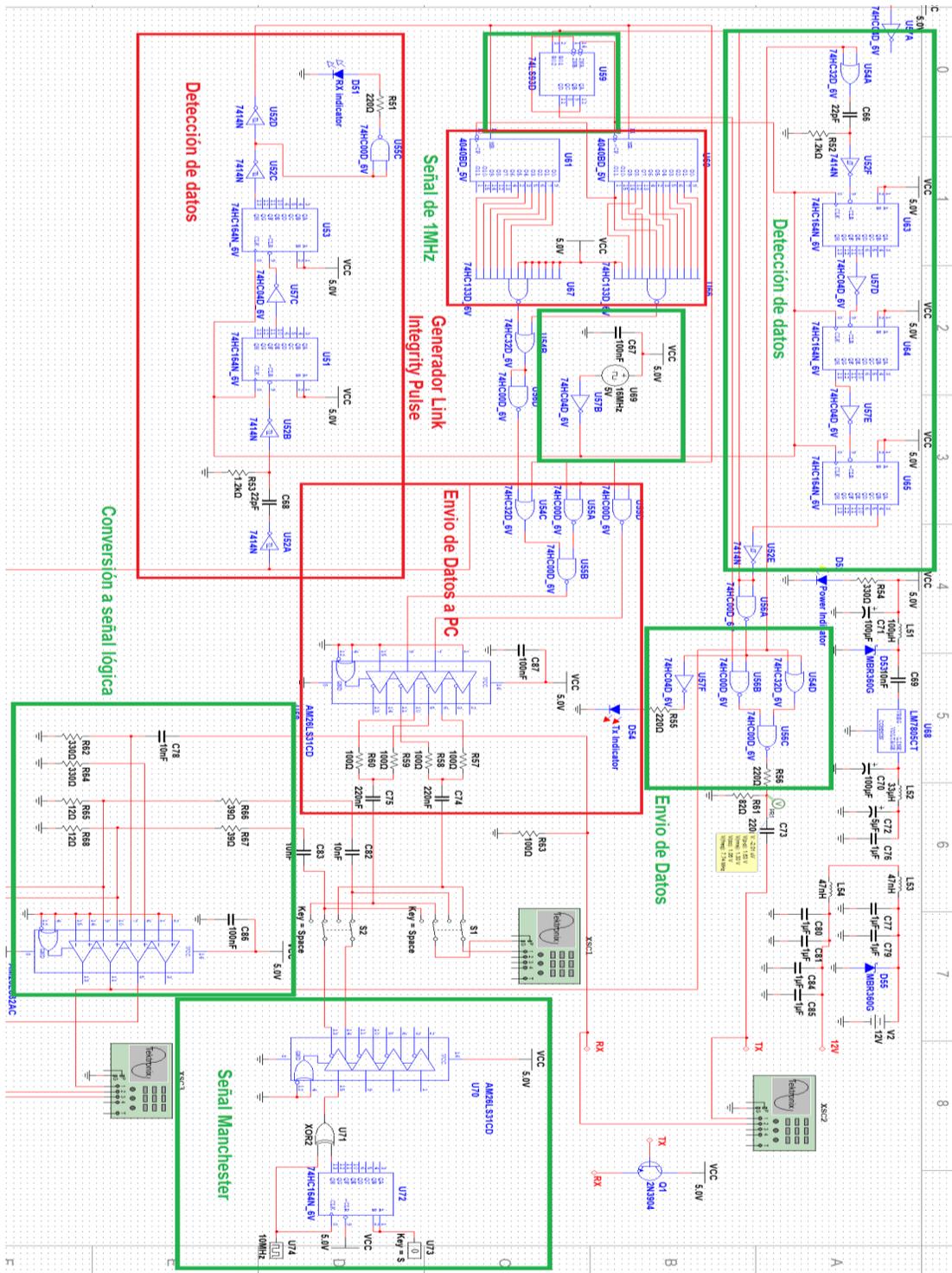


Fig. 49: Interface Twiter Simulada en Multisim 14.0. Sección transmisor en color verde. Sección Receptor en color rojo.

3.3.1 INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍAS DIGITALES EN UN SOLO CHIP

Dada su construcción a base de varios circuitos digitales y su interconexión a los módulos de transmisión y recepción, donde cada uno de estos presenta cierta latencia y tiempos de respuesta variados que incrementan conforme la cantidad de ellos se encuentren conectados en serie, el Twister presenta una oportunidad de mejora muy amplia al reducir el número de estos componentes al mínimo necesario para su funcionamiento.

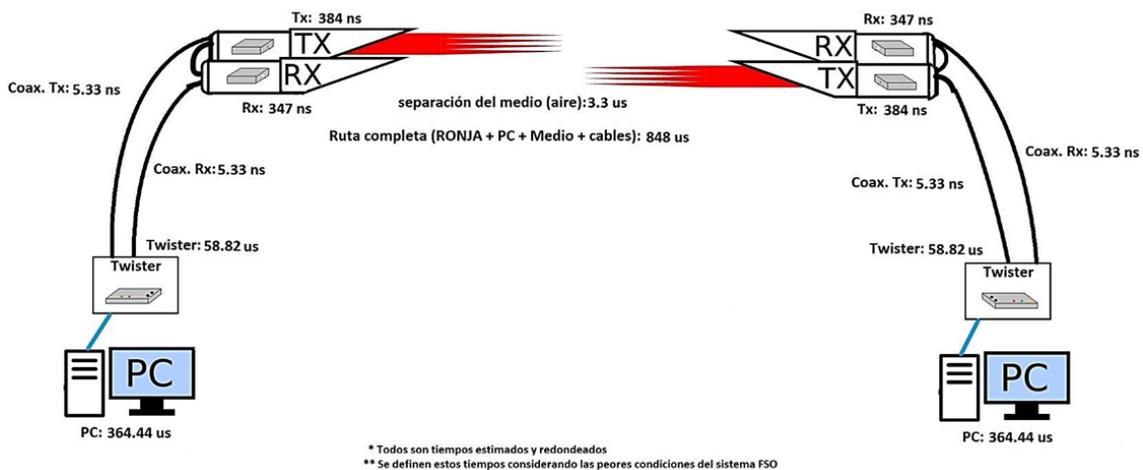


Fig. 50: Esquema de latencia actual RONJA.

El objetivo principal en la actualización del Twister es la reducción al mínimo de latencia, tanto de las conexiones (cableado y conectores) hacia los módulos de transmisión y recepción, como aquella debida a los circuitos integrados individuales y las pistas en la tarjeta de circuito impreso que los interconectan.

La actualización del Twister conlleva el rediseño de la tarjeta de circuito impreso incorporando componentes actualizados, así como el uso de un microcontrolador (*Arduino*, *PIC*, *ARM*, *MSP*), un *FPGA* o, en su defecto, un microprocesador (*Raspberry*, *Beaglebone*) para la sustitución de todos los circuitos integrados innecesarios, reduciendo así la latencia a sólo la del chip sustituto y que realiza todas las tareas pertinentes del módulo y los periféricos que requiera, así como la reducción en espacio y de consumo de energía requerida en este módulo [53]–[55].



Fig. 51: Microcontrolador, FPGA, Microprocesador.

Estas tecnologías además de hacer la función del Twister también pueden procesar la información en el control de la óptica adaptativa y reducir la latencia de la interconexión de los módulos estando integrado en las cabezas ópticas con una conexión vía *Ethernet* a *PC* o de fibra óptica para conexión con un *Switch*; sin embargo, habrá elementos que no podrán ser sustituidos por esta tecnología, como es el caso del Láser driver del transmisor, el amplificador de transimpedancia, el amplificador diferenciador (respuesta de filtro paso alto) y amplificador limitador en el receptor [52]. Para estos sistemas se encontró con una investigación que *Maxim integrated* de *Analog Devices*, cuentan con circuitos integrados de estas características incorporados en algunos transceptores *SFP* (del inglés *Small Form-factor Pluggable transceiver*), estos transceptores soportan canal de fibra que en forma similar al *FSO* utiliza los mismos componentes para funcionar; por lo tanto, pueden ser incorporadas al proyecto con su debida caracterización en conjunto con los demás componentes [16].

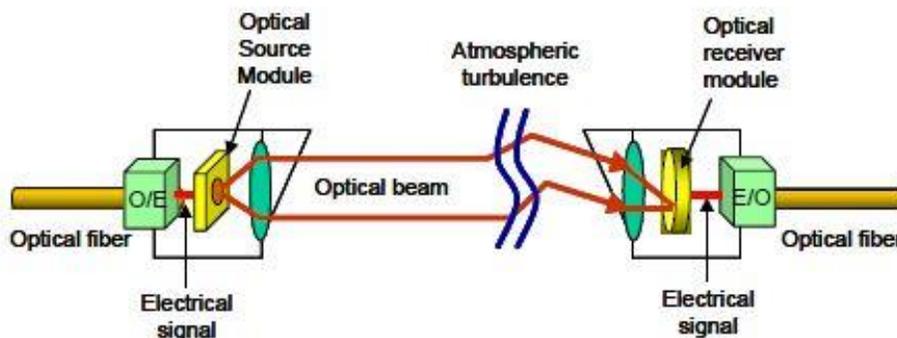


Fig. 52: Sistema FSO usando convertidor O/E y E/O [9].

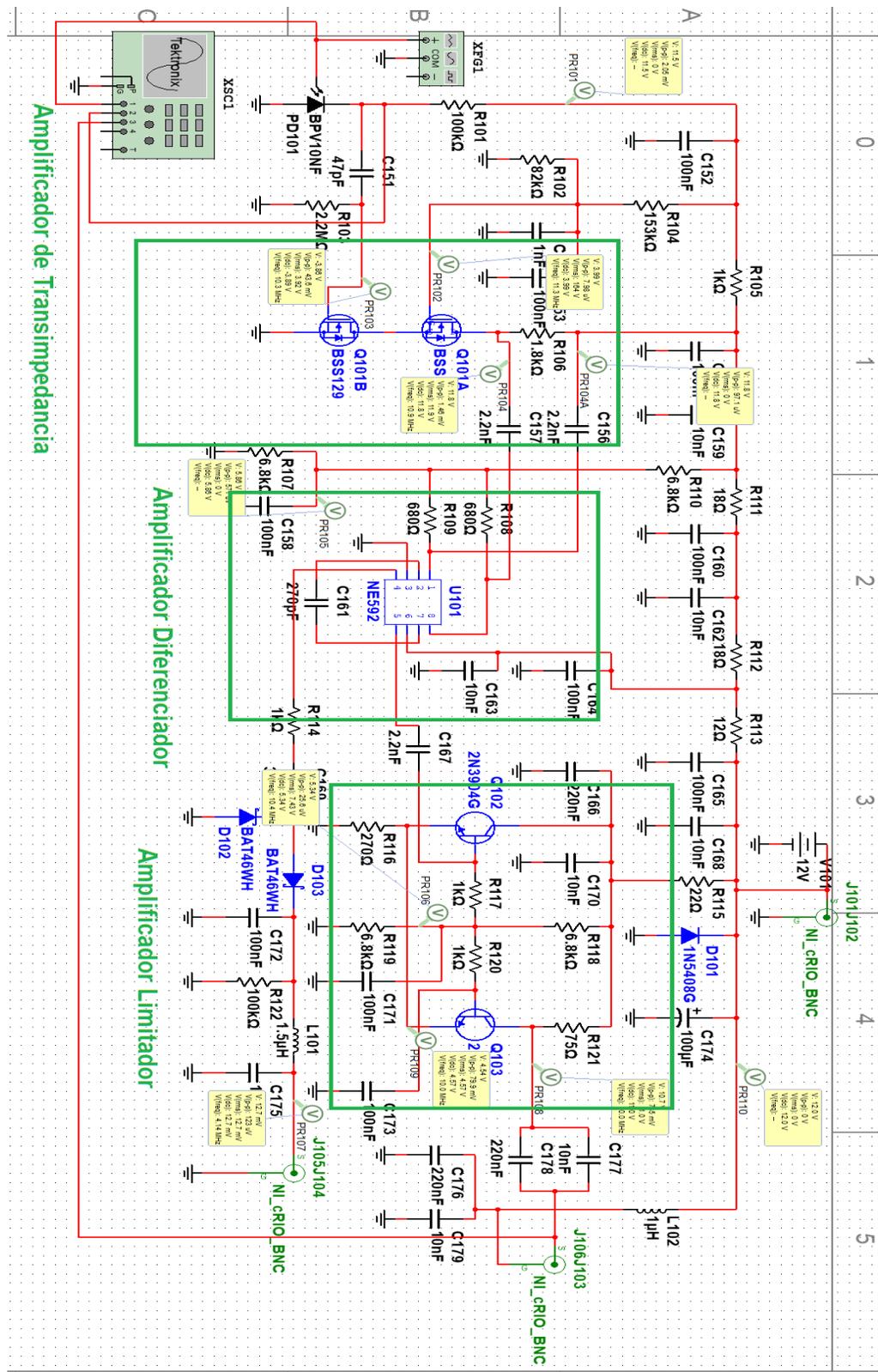


Fig. 53: Simulación del receptor en Multisim 14.0. Señalización de las etapas del circuito.

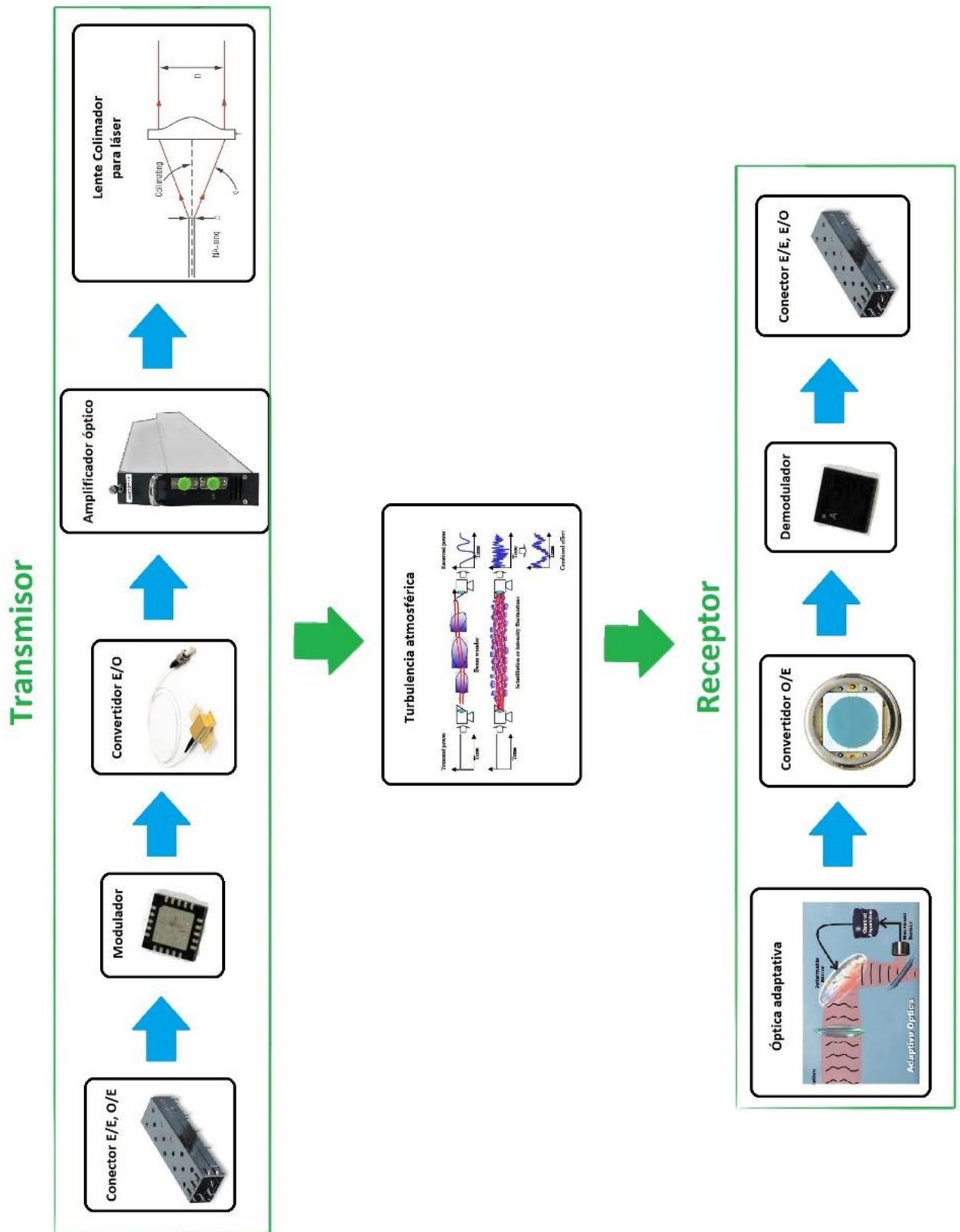


Fig. 54: Esquema de propuesta FSO con convertidor O/E y E/O.

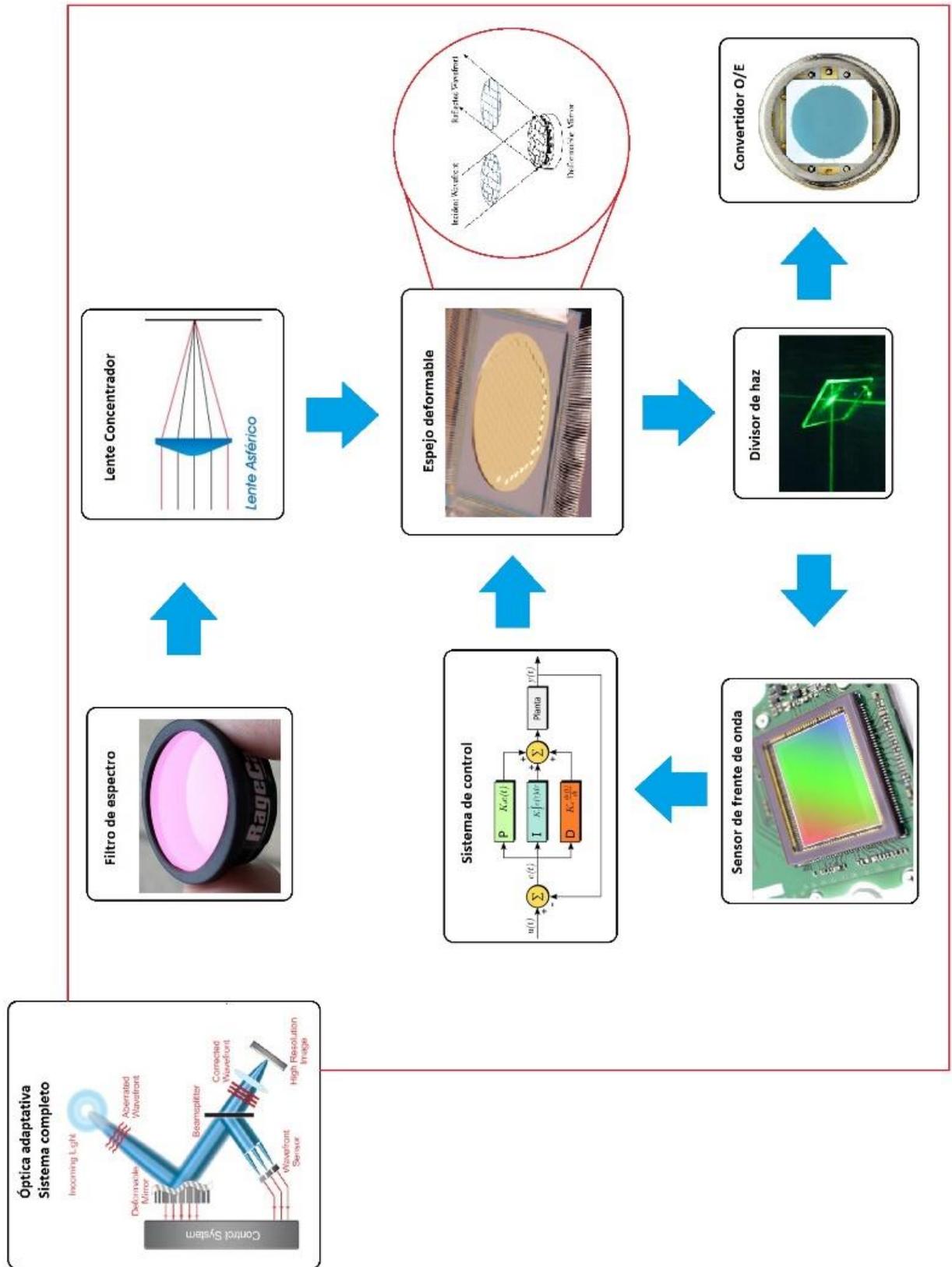


Fig. 55: Esquema del sistema de óptica adaptativa [49].

3.3.2. ELIMINACIÓN DE LA INTERFACE

Esta propuesta está basada en que el sistema *FSO* tiene conexión vía fibra óptica, las conexiones ópticas por fibra ya tienen el proceso de modulación incluido en la señal; por lo tanto, no tendría sentido volver a convertir la señal óptica a eléctrica para volver a convertirla en óptica, si es que no se quiere cambiar la forma de la modulación. Siendo esta la razón, se puede acoplar un amplificador óptico en la fibra de entrada para aumentar la señal y poderla transmitir por el *FSO*, incluso usando óptica adaptativa como *AOptix* lo propone tanto en la transmisión como recepción; sin embargo, con que solo se utilice en la recepción es suficiente para enviar la señal óptica a un acople directo con fibra.

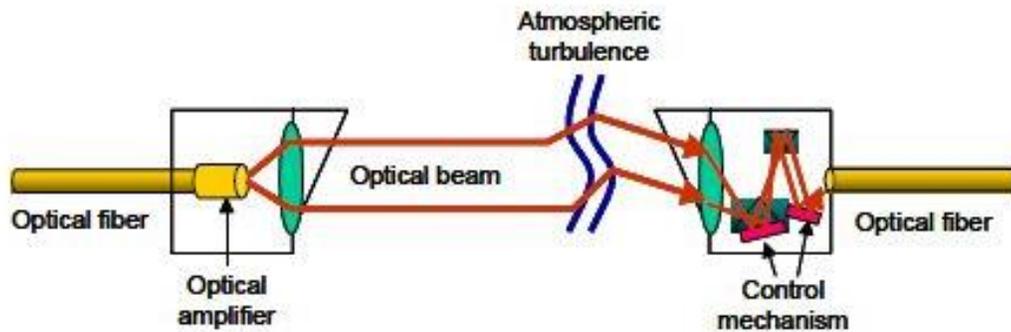


Fig. 56: Sistema FSO que no utiliza conversiones O/E y E/O con una conexión directa de haz a fibra [9].

3.4. SISTEMA MÉCANICO DE ALINEACIÓN

El actual sistema de sujeción, soporte y alineación se encuentra compuesto por tubería cuadrada de acero cortada en tramos, tornillería en los ejes de rotación y tensores que nos permiten el ajuste fino de arriba abajo e izquierda derecha.

Este sistema se encuentra adaptado a las posibilidades del prototipo inicial el cual cuenta con deficiencias como el peso (que genera una mala distribución); además, las dimensiones deben ser cambiadas, así como la reubicación de elementos e incorporación de otros que permitan un mejor manejo y una orientación más sencilla.

Tomando en cuenta las condiciones en que se encuentra el actual prototipo y que para futuras pruebas posiblemente necesite ser aún un sistema móvil debido a la dificultad para encontrar lugares disponibles con la distancia suficiente para pruebas a mayor alcance, se propone el uso de un sistema de rodamientos con elementos de bloqueo, así como de horquillas con tensores de paso fino que nos permitan el giro sobre los ejes de rotación de una manera sencilla y de forma precisa hacia el objetivo y que no cuente con demasiados elementos mecánicos extra. Un sistema de alineación de telescopio cumple con las condiciones adecuadas; sin embargo habría que adaptar un sistema similar que soporte el peso de las cabezas ópticas.



Fig. 57: Sistema de alineación de telescopio.

Para un sistema fijo se puede optar por los establecidos por *RONJA* o *AOptix* ya que este sistema sería la versión final del proyecto que pueda ser colocado en una torre de telecomunicaciones sobre un mástil de acero vertical estable, solo con la tornillería necesaria para hacer el ajuste fino de la orientación de las cabezas ópticas arriba abajo e izquierda derecha [56].

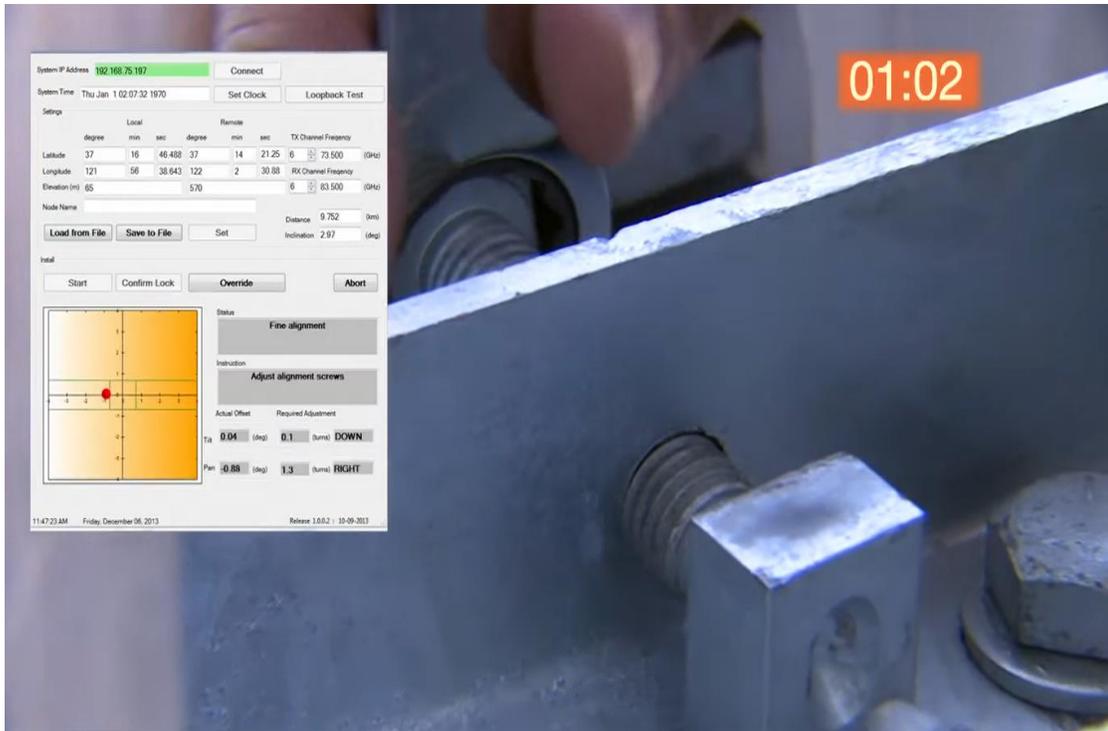


Fig. 58: Tornillería de ajuste fino de AOptix [56].



Fig. 59: Sistema de montaje en mástil de acero vertical estable [56].

4. CONCLUSIONES

Se implementó y probó con éxito un prototipo de transceptor óptico de espacio libre de 10 Mbps full-dúplex que cumple con el estándar *IEEE802.3* para redes Ethernet a una distancia de 1.06 km. Se encontraron obstáculos en el camino a este propósito que fueron solucionados de manera rápida y eficiente.

Los sistemas *FSO* tienen un gran potencial como solución al problema de la última milla, que son el principal problema a resolver con estos equipos; sin embargo, pueden tener incluso un alcance mayor utilizando las tecnologías sofisticadas para el manejo de la luz visible e infrarroja. El proyecto *RONJA* da un acercamiento a estas tecnologías de manera económica, que para ciertas aplicaciones pueden ser suficientes y que cualquier persona con escasos conocimientos de electrónica pueda construir este dispositivo. Ahora aplicando conocimientos de electrónica, mecánica y óptica, este proyecto puede aumentar su capacidad enormemente compitiendo incluso con las tecnologías existentes en el mercado y con las exigencias de las mismas en tasa de transmisión de datos, alcance y ultra baja latencia.

Estas tecnologías investigadas no solo funcionan para telecomunicaciones electrónicas, sino también para tecnologías más robustas como es el caso de los telescopios espaciales; ejemplificando esto, la *NASA* lanzó el 25 de diciembre del 2021 el telescopio espacial *James Webb* el primer telescopio con mayor alcance hasta el momento y que en palabras menores, vendría siendo un receptor óptico de infrarrojos con óptica adaptativa, similar al trabajo que hace un *PIN* o un *APD* en el caso de *FSO*, solo que con un espectro más amplio de objetivos, rangos de longitud de onda más grandes y en lugar de recibir datos de red se hace espectroscopia [57].

5. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] J. F. Torres Rufo, "Contribución al estudio de Servicios Soportados sobre Redes VLC (Visible Light Communications)," *Renew. Energy*, vol. 4, no. 6, pp. 1–251, 2015.
- [2] K. "clock" Kulhavý and Twibright Labs, "RONJA," 2016. [Online]. Available: <http://ronja.twibright.com/>.
- [3] J. Söderberg, "Free space optics in the czech wireless community: Shedding some light on the role of normativity for user-initiated innovations," *Sci. Technol. Hum. Values*, vol. 36, no. 4, pp. 423–450, 2011.
- [4] B. F. Němec, "Optické pojítka mezi dv ě ma po č íta č i „ RONJA 10Mb / s “,” pp. 44–50, 2005.
- [5] K. "clock" Kulhavý and Twibright Labs, "RONJA Holders," 2016. [Online]. Available: <http://ronja.twibright.com/holder/index.php>.
- [6] B. L. Adámek, "Bezdrátový p ř enos dat," 2006.
- [7] P. Sádecký, "Optické pojítka," p. 14, 2005.
- [8] B. F. Němec, "OPTICKÝ BEZKABELOVÝ PŘENOS OPTICAL CABLELESS TRANSMISSION," pp. 51–56, 2010.
- [9] K. Kamugisha, "Studies on Performance of Ultra High Speed Free-Space Optical Communication Systems 超高速光空間通信システムにおける伝播特性の研究," pp. 1–165, 2007.
- [10] I. Cree, "Cree ® P4 LED CP41B-RDS / ADS CP41B-RFS / AFS CP41B-RHS / AHS Product Family Data Sheet," pp. 1–11, 2017.
- [11] I. Cree, "CREE LED," 2022. [Online]. Available: <https://cree-led.com/>.
- [12] I. Cree, "CREE XLamp ® XP-E2 LEDs," pp. 1–45, 2021.
- [13] I. Cree, "CREE XLamp ® XB-D LEDs," pp. 1–42, 2021.

- [14] J. Vítězslav, V. Jiří, and Z. Stanislav, *23 rd Conference and Exhibition on OPTICAL COMMUNICATIONS 2011 Scientific Section Proceedings Optics from Mb / s to Tb / s*. 2011.
- [15] Texas Instrument, "TLC5922 LED DRIVER," pp. 1–26, 2009.
- [16] F. Scheire and D. Schouppe, "Design of a NRZ gigabit optical receiver with equalization for PCS fiber," 2012.
- [17] J. A. Simpson, "A 1 Mbps Underwater Communications System using LEDs and Photodiodes with Signal Processing Capability," *ReVision*, 2007.
- [18] C. J. Wang *et al.*, "InGaN resonant-cavity light-emitting diodes with porous and dielectric reflectors," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2020.
- [19] E. F. Schubert., Y.-H. Wang, A. Y. Cho, L.-W. Tu, and G. J. Zyzdik, "Resonant cavity light-emitting diode," *Buddh. Thought*, pp. 921–923, 1991.
- [20] I. Lasermate Group, "155Mbps 650nm RCLED Chip," no. 909, pp. 1–3.
- [21] J. Mikołajczyk *et al.*, "Analysis of free-space optics development," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 653–674, 2017.
- [22] C. Tangtrongbenchasil, "Ubiquitous Optical Wireless Communication Using Optical Micro-Cell System (光マイクロセルシステムによるユビキタス光無線通信)," p. 110, 2008.
- [23] M. A. Chancey, "SHORT RANGE UNDERWATER OPTICAL COMMUNICATION LINKS," 2005.
- [24] Aoptix, "Intellimax ® ULL3000," pp. 1–2, 2014.
- [25] AOptix, "Introducing AOptix IntelliMax Backhaul Challenges and Solutions," pp. 1–20.
- [26] AOptix Youtube. 2016.

- [27] LightPointe Communications, "Aire X-Stream Series Free Space Optics Ultra-Low Latency Point-to-Point Wireless Bridge," pp. 1–2, 2014.
- [28] J. W. Srague, "FREE SPACE OPTICS AND WIRELESS BROADBAND RADIO FREQUENCY TECHNOLOGY: BRINGING HIGH- SPEED NETWORK ACCESS TO THE LAST MILE," *Security*, pp. 1–183, 2002.
- [29] S. R. Kosice, *Electrical Engineering and Informatics II*. 2011.
- [30] LightPointe Communications, "AireBridge SX," pp. 1–2, 2014.
- [31] A. S. Petr Severa, "RONJA – optické pojítko," pp. 1–34, 2007.
- [32] Hamamatsu, "Hamamatsu Photon is our Business," 2022. [Online]. Available: <https://www.hamamatsu.com/us/en.html>.
- [33] B. Abdelmoula, "Study on Transmission Characteristics of Optical Wireless Communication Systems," *Lancet Neurol.*, vol. 9, no. 12, p. 1153, 2010.
- [34] J. C. ING. Suarez Serrano, "TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN ÓPTICA EN EL ESPACIO LIBRE (FSO): FUNDAMENTOS TEÓRICOS, TECNOLOGÍAS Y APLICACIÓN.," pp. 1–118, 2014.
- [35] J. Chapront, M. Chapront-Touzé, and G. Francou, "Determination of the lunar orbital and rotational parameters and of the ecliptic reference system orientation from LLR measurements and IERS data," 1999. [Online]. Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999A%26A...343..624C/abstract>.
- [36] I. K. Son and S. Mao, "A survey of free space optical networks," *Digit. Commun. Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 67–77, 2017.
- [37] H. Henniger and O. Wilfert, "An introduction to free-space optical communications," *Radioengineering*, vol. 19, no. 2, pp. 203–212, 2010.
- [38] Hamamatsu, "Quantum Cascade Lasers Hamamatsu," 2021. [Online]. Available:

<https://www.hamamatsu.com/us/en/product/lasers/semiconductor-lasers/qcls.html>.

- [39] Hamamatsu, “Characteristics and use of infrared detectors,” *Infrared Phys.*, pp. 1–43.
- [40] A. Malik and P. Singh, “Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges,” *Int. J. Opt.*, 2016.
- [41] V. Semiconductors, “Vishay Semiconductors Silicon PIN Photodiode BPV10,” pp. 1–5, 2002.
- [42] FirstSensor, “First Sensor PIN PD Data Sheet,” pp. 1–2, 2019.
- [43] Hamamatsu, “Si APDの特性と使い方,” pp. 1–9, 2021.
- [44] Hamamatsu, “InGaAs APD Photoreceivers G8931 series,” *Http://Www.Hamamatsu.Com/Us/En/Index.Html*, vol. 125, pp. 1–4, 2019.
- [45] Hamamatsu, “InGaAs PIN photodiodes G9801 series,” *Http://Www.Hamamatsu.Com/Us/En/Index.Html*, no. 2, pp. 1–3, 2015.
- [46] Semi Nex Laser Diodes, “SemiNEX TO9-161,” 2022. [Online]. Available: https://mrp.seminex.com/PI_Sheet.aspx?seminex_part_pk=341.
- [47] Laser Diode Technologies, “Laser FB-M1550-0500TO3.”
- [48] S. Marcos *et al.*, “Vision science and adaptive optics, the state of the field,” *Vision Res.*, vol. 132, pp. 3–33, 2017.
- [49] Claire Max, NSF Center for Adaptive Optics, U. of C. at S. C. and D. L. L. N. Laboratory, and A. A. S. 197th Meeting, “INTRODUCTION TO ADAPTIVE OPTICS AND ITS HISTORY,” *Image (Rochester, N. Y.)*, no. 831, pp. 1–7, 2014.
- [50] S. A. Burns, A. E. Elsner, K. A. Sapoznik, R. L. Warner, and T. J. Gast, “Adaptive optics imaging of the human retina,” *Prog. Retin. Eye Res.*, vol. 68, pp. 1–30, 2019.

- [51] AOptix, *Adaptative Optics AOptix*. 2014.
- [52] B. Benedetti, L. González, and M. Roubaund, “Desarrollo de un Transceptor basado en Optica de Espacio Libre,” 2016.
- [53] J. Ramírez, A. Shrestha, S. Parthasarathy, and D. Giggenbach, “Gigabit laser ethernet transceiver for free-space optical communication systems,” *Opt. InfoBase Conf. Pap.*, pp. 1–4, 2014.
- [54] J. Matyás, “RONJA TWISTER POMOCI´ FPGA FPGA-BASED RONJA TWISTER,” pp. 3–63, 2011.
- [55] J. Matyáš, “FPGA-Based RONJA Twister,” pp. 1–2, 2011.
- [56] AOptix, *Point Acquire Track AOptix*. 2014.
- [57] NASA, ESA, and CSA, “Infrared Detectors James Webb,” <https://webb.nasa.gov/>, 2022. [Online]. Available: <https://webb.nasa.gov/content/about/innovations/infrared.html>.

6. ÍNDICE DE IMÁGENES

<i>Fig. 1: Prueba de Laboratorio a 20 cm de distancia entre TX y RX.</i>	7
<i>Fig. 2: Sistema mecánico binocular</i>	8
<i>Fig. 3: Foto satelital de prueba a 39 metros.</i>	9
<i>Fig. 4: Separadores para tubos de PVC (A). Primer modelo de desplazamiento para los módulos TX y RX dentro de los tubos (B). Placas de PVC para nuevo modelo de desplazamiento de módulos (C).</i>	10
<i>Fig. 5: Transmisión y recepción de datos bidireccional.</i>	10
<i>Fig. 6: Foto satelital de prueba a 118 m.</i>	12
<i>Fig. 7: Equipo montado para pruebas de 118 metros.</i>	12
<i>Fig. 8: Foto satelital de la primera ubicación en CU (A). Foto satelital de la segunda ubicación con 656 metros (B).</i>	13
<i>Fig. 9: (A) Modificación con los tubos y los movimientos independientes entre ellos. (B) Vista de la luz del transmisor en su máximo brillo. (C) Prueba a 656 metros con el nuevo sistema en "J".</i>	14
<i>Fig. 10: (A) Primera prueba realizada en las instalaciones de la UNAM. (B) Funcionamiento unidireccional con el sistema binocular. (C) Resultado completo con la implementación del sistema en "J".</i>	15
<i>Fig. 11: Muestra del diseño final, de las nuevas caras frontal y trasera para las cajas metálicas.</i>	16
<i>Fig. 12: Foto satelital de prueba a 1.06 km.</i>	17
<i>Fig. 13: (a) Mayor intensidad de transmisión del punto A (visto desde el punto B), donde se recibió la transmisión (b) unidireccional.</i>	17
<i>Fig. 14: Tensor con cuerda estándar (con rosca derecha e izquierda) de venta al público.</i>	18
<i>Fig. 15: Diagrama representativo de la idea del diseño basado en tensores.</i>	19
<i>Fig. 16: Diagrama representativo de la nueva modificación de tensores, con un único tornillo y separación de 0.25 mm entre cuerda y cuerda.</i>	20
<i>Fig. 17: (A) Se muestra uno de los vástagos siendo procesado para añadirle las cuerdas finas. (B) Se observan las piezas terminadas. (C) Se aprecia el proceso prueba de estos tensores en el taller.</i>	22

<i>Fig. 18: Tensor fabricado con 0.453 mm de paso o 56 hilos por pulgada.</i>	22
<i>Fig. 19: Muestra de equipo diseñado en AutoCAD con tensores, resortes y rodamientos simulados.</i>	23
<i>Fig. 20: Vista desde el punto alto de la pruebas a 1.06 km en un día normal de contaminación (A). Un día de contingencia ambiental (B).</i>	24
<i>Fig. 21: Recepción de paquetes con contaminación atmosférica. (A) Resultados Recepción de paquetes (1), envío UDP (2), ping (3) y hrping (4), indicando comunicación bidireccional. (B) Ampliación del tiempo mostrado por hrping.</i>	24
<i>Fig. 22: Prueba vespertina y nocturna del equipo a 1.06 km sin contaminación desde el punto B de la locación.</i>	25
<i>Fig. 23: (A) Gráfico de intensidad luminosa del LED rojo utilizado en los módulos de Transmisión [10]. (B) Se pueden observar los diferentes tonos de luminosidad causados por la propia naturaleza del LED: el centro mostrando una menor luminosidad que el anillo que le rodea (1), el anillo más intenso con la mayor concentración de potencia (2), puntos de similar potencia a los picos del anillo de mayor potencia (3) y el efecto aureola provocado por el residuo de energía (4).</i>	26
<i>Fig. 24: (A) Voltaje obtenido en el punto B para la recepción de pings mostrada en (B).</i>	26
<i>Fig. 25: Ejemplo de LED investigados, con mayor luminosidad [11].</i>	29
<i>Fig. 26: Gráfico de intensidad luminosa del LED 1 de la Tabla 6 [13].</i>	31
<i>Fig. 27: Gráfico de intensidad luminosa del LED 2 de la Tabla 6 [12].</i>	32
<i>Fig. 28: Simulación del módulo transmisor RONJA en Multisim 14.0.</i>	33
<i>Fig. 29: Simulación del módulo transmisor con MOSFET en Multisim 14.0.</i>	33
<i>Fig. 30: Resultados de las simulaciones en Multisim. (A) Respuesta entrada (amarillo), salida (azul). (B) Respuesta entrada reflejada por el circuito limitador (azul), entrada del Gate (verde), salida (amarillo), corriente del LED (violeta).</i>	34
<i>Fig. 31: Ejemplo de superposición de luz de un arreglo de 4 LED.</i>	35
<i>Fig. 32: Muestra de distribución luminosa de LED con las mismas características eléctricas que el original RONJA, solo que en color ámbar a 590 nm [10].</i>	35

<i>Fig. 33: Ilustración de un LED de cavidad resonante [20].</i>	37
<i>Fig. 34: Sistema FSO de AOptix Intellimax® ULL3000, sistema híbrido con tecnología de onda milimétrica [26].</i>	38
<i>Fig. 35: Sistema LightPointe Aire X-Stream™ Series Free Space Optics (A). Sistema AireBridge™ SX (B) [27], [30].</i>	39
<i>Fig. 36: Sistema FSO Hamamatsu Photoliner™ (A). Óptica adaptativa del sistema (B) [9].</i>	40
<i>Fig. 37: (A) Propagación y divergencia del haz de luz [36]. (B) Luz transmitida y pérdidas en la recepción [34].</i>	41
<i>Fig. 38: Absorción de luz por el ojo humano. Siendo la línea continua el espectro de luz visible y la línea punteada la respuesta u absorción a tal longitud de onda [34].</i>	42
<i>Fig. 39: Transmisión atmosférica de 0 km a 120 km de altitud. Las ventanas de transmisión atmosférica están resaltadas en color gris [37].</i>	43
<i>Fig. 40: Absorción atmosférica en la superficie del mar [39].</i>	44
<i>Fig. 41: Respuesta espectral APD Hamamatsu. Con picos en luz visible 600 nm e infrarrojo cercano con pico en 800 nm [43].</i>	46
<i>Fig. 42: Programa de simulación para sistemas ópticos.</i>	47
<i>Fig. 43: Ilustración de los componentes de la simulación necesarios para su funcionamiento.</i>	47
<i>Fig. 44: Programas software de diseño óptico.</i>	52
<i>Fig. 45: Simulación en OpTaliX® de la dispersión de luz debido a las lentes esféricas.</i>	52
<i>Fig. 46: Lentes esféricas contra lentes asféricas.</i>	53
<i>Fig. 47: Sistema de óptica adaptativa de AOptix [51].</i>	54
<i>Fig. 48: Filtro de espectro IR.</i>	54
<i>Fig. 49: Interface Twiter Simulada en Multisim 14.0. Sección transmisor en color verde. Sección Receptor en color rojo.</i>	56
<i>Fig. 50: Esquema de latencia actual RONJA.</i>	57
<i>Fig. 51: Microcontrolador, FPGA, Microprocesador.</i>	58
<i>Fig. 52: Sistema FSO usando convertidor O/E y E/O [9].</i>	58

<i>Fig. 53: Simulación del receptor en Multisim 14.0. Señalización de las etapas del circuito.</i>	59
<i>Fig. 54: Esquema de propuesta FSO con convertidor O/E y E/O.</i>	60
<i>Fig. 55: Esquema del sistema de óptica adaptativa [49].</i>	61
<i>Fig. 56: Sistema FSO que no utiliza conversiones O/E y E/O con una conexión directa de haz a fibra [9].</i>	62
<i>Fig. 57: Sistema de alineación de telescopio.</i>	63
<i>Fig. 58: Tornillería de ajuste fino de AOptix [56].</i>	64
<i>Fig. 59: Sistema de montaje en mástil de acero vertical estable [56].</i>	64

7. ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Relación de problemas-soluciones presentes en la prueba a 39 m. ...</i>	11
<i>Tabla 2: Relación de problemas solución presentes en la prueba a 656 metros.</i>	16
<i>Tabla 3: Se muestra el efecto de cada tipo de distancia de separación a 1000 metros (o más), partiendo de un sistema trigonométrico.</i>	21
<i>Tabla 4: Atenuación atmosférica [9].</i>	23
<i>Tabla 5: Relación de problemas-soluciones presentes en la prueba de 1060 m.</i>	27
<i>Tabla 6: LED transmisor actual comparado con los LED seleccionados [12], [13].</i>	30
<i>Tabla 7: Comparativa del fotodiodo actual con el seleccionado [41], [42].</i>	45
<i>Tabla 8: Simulación FSO con Láser teórico en OptiSystem [44], [45].</i>	48
<i>Tabla 9: Simulación FSO con Láser SemiNEX en OptiSystem [44]–[46].</i>	49
<i>Tabla 10: Simulación FSO con Láser Fibercom en OptiSystem [44]–[47].</i>	50

ANEXOS

8. ANEXOS

8.1. ANEXO A Envío de datos UDP

```
/*Envia datos vía UDP dirigido*/
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Net;
using System.Net.Sockets;
using System.IO;
using System.Threading;

namespace ReadData
{
    class Program
    {
        public static string SYN = (Convert.ToChar(22)).ToString();
        public Boolean done = true;
        public Boolean exception_thrown = false;
        public Boolean flag = false;
        public Socket s;//= new Socket(AddressFamily.InterNetwork,
SocketType.Dgram, ProtocolType.Udp);
        public IPAddress broadcast;// =
IPAddress.Parse("192.168.1.50");
        public int port = 0;
        public IPEndPoint ep;//= new IPEndPoint(broadcast, 7);
        public Thread thread;
        public string path = "";
        public ulong msgnum = 1;// 1052;// 46720;// 1052;//1064;//
1063;
        public bool flagnum = false;
        public Program(Socket s, IPAddress ip, int port)
        {
            this.s = s;
            this.broadcast = ip;

            this.port = port;
            this.ep = new IPEndPoint(broadcast, port);
        }
        public void setPath(string p)
        {
            path = p;
        }

        static void Main(string[] args)
        {
```

```

        Console.WriteLine("Sending messages to broadcast via
UDP.");

        Program[] mandarNcanales = new Program[4];
        mandarNcanales[0] = new Program(new
Socket(AddressFamily.InterNetwork, SocketType.Dgram,
ProtocolType.Udp),

IPAddress.Parse("192.168.0.1"),

                                12123);

mandarNcanales[0].setPath(@"C:\Users\orteg\Documents\MSG\MSG");
        mandarNcanales[0].thread = new
Thread(mandarNcanales[0].sendData);
        mandarNcanales[0].thread.Start();
    }

    public void sendData()
    {
        while (done)
        {
            string pathFIX = path + msgnum.ToString() + ".dat";
            string fileFIX =
@"C:\Users\orteg\Documents\ResultadoFIX_2-27-07-17.txt";
            byte[] sendbuf = File.ReadAllBytes(pathFIX);
            string dataFix = File.ReadAllText(pathFIX);
            try
            {
                if (dataFix.Contains("FIX"))
                {
                    flag = false;
                    using (StreamWriter sw =
File.AppendText(fileFIX))
                    {
                        byte[] fixbytes =
Encoding.ASCII.GetBytes(SYN);

                                s.SendTo(fixbytes, ep);
                                Console.WriteLine("Len SYN: {0}",
fixbytes.Length);
                    }
                }
                else
                {

                    flag = true;
                    if (flag)
                    {
                        s.SendTo(sendbuf, ep);
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```


8.2. ANEXO B Recepción de datos UDP

```
/* Receptor de UDP dirigido */
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Net;
using System.Net.Sockets;
using System.IO;
using System.Threading;
namespace WriteData
{
    class Program
    {
        public Boolean done = true;
        public Boolean exception_thrown = false;
        public UdpClient listener;
        public IPAddress ip;
        public IPEndPoint ep;
        public int listenPort = 0;
        public long msgnum = 1;
        public string path = "";
        public Thread thread;
        public Byte[] data = new Byte[256];
        Program(int port, IPAddress ip_p, UdpClient s)
        {
            listener = s;
            ip = ip_p;
            listenPort = port;

            ep = new IPEndPoint(ip, listenPort);
            msgnum = 1;
        }
        static void Main(string[] args)
        {
            Program[] canales = new Program[2];
            canales[0] = new Program(7,
                IPAddress.Parse("192.168.2.74"),
                new UdpClient(7)
            );
            canales[0].setPath(@"C:\Users\orteg\Documents\Visual
Studio 2017\Projects\WriteData\MSGNews\MSG");
            canales[0].thread = new Thread(canales[0].Recibe);
            canales[0].thread.Start();
            Console.WriteLine("Sending messages to broadcast vía
UDP.");
        }
        public void setPath(string s)
    }
}
```

```

    {
        path = s;
    }
    public void Recibe()
    {
        while (done)
        {
            try
            {
                string path_aux = path + msgnum.ToString() +
".dat";

                data = listener.Receive(ref ep);
                File.WriteAllBytes(path_aux, data);
            }
            catch (Exception send_exception)
            {
                exception_thrown = true;
                Console.WriteLine("Exception {0}",
send_exception.Message);
            }
            if (exception_thrown == false)
                Console.Write(".");
            else
            {
                exception_thrown = false;
                Console.WriteLine("The exception indicates the
message was not sent\n");
            }
            msgnum += 1;
        }
    }
}
}
}

```